

CALCUL AUX ÉLÉMENTS FINIS POUR L'ÉTUDE SISMIQUE DES BÂTIMENTS DU LMJ

FINITE ELEMENT CALCULATIONS FOR SEISMIC DIMENSIONNING OF THE LMJ STRUCTURES

Denis ETIENNE, Dominique REGALLET
BOUYGUES TP

Jean-Marc JAEGER, Michel BUE
SETEC TPI

1. INTRODUCTION

Le Laser MegaJoule est un énorme bâtiment nucléaire pour l'étude expérimentale des plasmas à haute densité. Il est situé sur le site du CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) et du CESTA (Centre d'Etude Scientifique et Technique d'Aquitaine), à environ 30 Kms au sud de Bordeaux (France). Le client est la Direction des Applications Militaires du CEA. Les essais qui seront réalisés au LMJ consistent à tirer avec 240 faisceaux laser, correspondant à une énergie de 1.8MJ, sur une cible de 2mm de diamètre en Deuterium Tritium.

Bien que situé dans une zone faiblement sismique, le CEA impose une vérification très stricte des structures béton sous l'effet du séisme. Cela se traduit par la nécessité de très gros modèles tri-dimensionnel aux éléments finis, la prise en compte de l'interaction sol-structure en considérant plusieurs hypothèses de raideurs de sol, et par l'utilisation d'une méthode de calcul sismique propre au CEA (pseudo-statique).

La géométrie complexe de certains bâtiments comme le Hall d'Expérience, avec une multitude d'ouvertures dans les voiles et dalles nécessaires pour le process, des voiles circulaires, des positions de voiles changeant à chaque niveau ... induit une forte complexité du modèle et la nécessité d'utiliser un programme permettant d'automatiser le calcul des forces sismiques, d'un grand nombre de combinaisons, puis des efforts dans chaque élément sous chaque combinaison linéaire, et enfin le calcul du ferrailage à disposer.

1. INTRODUCTION

Laser MegaJoule is a huge nuclear building for experimental study of high density plasmas. It is located at the site of CEA (French agency for nuclear energy) and of CESTA (scientific and technic study center of Aquitaine), at about 30 kms south of Bordeaux (France). The customer is the Direction of the Military Applications of the CEA. The tests which will be realised in the LMJ will consist in "shooting" with 240 laser bundles, representing an energy of 1.8MJ, on a 2mm diameter target made up of Deuterium Tritium.

Although located in a poorly seismic zone, the CEA imposes a severe checking of the concrete structures under seismic loading. That results in the necessity of very big finite element three-dimensional models, by taking into account the soil-structure interaction as well as several assumptions concerning ground stiffness, and by applying a seismic loading method particular to the CEA (pseudo - static).

The complex geometry of some buildings like the Experience Hall, with a multitude of openings in the walls and floors related to the process, circular walls, location of many walls changing at each level... leads to a high complexity of the model and the need for using a software making it possible to automate the calculation of the seismic loadings, of a great number of combinations of actions, then the efforts in each element under each linear combination, and finally the calculation of reinforcement to be laid out.

Cet article traite de l'analyse sismique du Hall d'Expérience effectué avec le code ANSYS, en détaillant plus particulièrement comment SETEC TPI a modifié et utilisé son post-processeur ARMATEC pour automatiser tous les calculs.

2. DESCRIPTION DU PROJET LASER MÉGAJoule

Les dimensions de l'ensemble du LMJ sont 300m en longueur, entre 100 et 150m en largeur et jusqu'à 40m en hauteur. Cela représente environ 140 000m³ de béton, 16 000 tonnes d'acier (pour le ferrailage des éléments en béton armé).

Il est composé de plusieurs blocs indépendants, séparés par des joints.

Au milieu se trouve le bloc principal, le Hall d'Expérience, fondé sur un radier de 2.50m d'épaisseur, avec des dimensions en plan de 75mx76m. Il est délimité par un mur de 2.00m d'épaisseur. Il comporte également un voile circulaire intérieur de 1.0m d'épaisseur et de 33m de diamètre, entourant le cœur du process, et des gaines béton latérales Nord et Sud fondées sur le même radier mais complètement indépendantes du reste de la structure (voir fig. 2). 8 planchers intermédiaires sont situés entre les 2 voiles épais. Le niveau supérieur du radier est à -16.90, le terrain naturel étant à la cote -4.70. Le Hall est fermé par une dalle de couverture béton de 1.40m d'épaisseur au niveau +23.70, et couvert par une toiture métallique supportée par les gaines béton Nord et Sud. Le joint entre ces gaines Nord et Sud et le voile de 2.0m d'épaisseur est dicté par les déplacements sous séisme, et vaut 15cm au niveau supérieur.

A l'est et à l'ouest se trouvent 4 Halls Laser, chacun constitué d'une Table Laser protégée par une toiture métallique. Ces halls sont séparés par un couloir central fondé sur pieux. Ils sont délimités au nord et au sud par des locaux techniques (pour la climatisation, pour l'énergie électrique pour les faisceaux laser, ...)

Les tables Laser, le couloir central et les locaux techniques sont des ouvrages complètement indépendants.

Des locaux techniques, des bureaux et le hall d'entrée sont situés au nord et au sud du hall d'Expérience.

La conception de ces ouvrages consiste dans des dalles portées par des voiles de contreventement ou par des poutres et poteaux.

Une des particularités réside dans le grand nombre d'ouvertures dans les voiles et dalles nécessaires pour le process, plus particulièrement dans le voile circulaire intérieur du Hall d'Expérience comme montré sur la fig. 2, ce qui complique les modèles de calcul.

That paper deals with the seismic analysis of the Experience Hall performed with ANSYS program, showing in particular the way SETEC TPI has supplemented and used its post-processor ARMATEC to automate the calculation tasks.

2. DESCRIPTION OF THE LASER MEGAJOULE PROJECT

The overall dimensions of the LMJ building are 300m length, between 100 and 150m wide, and up to 40m height. It represents about 140 000m³ of concrete, 16 000 tons of steel (for concrete reinforcement).

It is composed of several independent blocks, separated by joints.

At the middle is the main block, the 'Experience Hall' founded on a 2.50m thick bottom slab, with horizontal dimensions 75mx76m. It is delimited by a 2.00m thick wall. It also has an inside 1.00m thick circular wall (33m diameter), surrounding the heart of the process, and lateral (North and South) concrete shafts which are founded on the same bottom slab but completely independant of the rest of the structure (see fig. 2.). Between the two thick walls are 8 intermediate floors. Top level of the foundation bottom slab is -16.90, ground level being at -4.70. The hall is closed by a 1.40m thick top concrete slab at level +23.70, and covered by a metallic roof which is supported by the North and South concrete shafts. The joint between north and south shafts and the 2.00m thick wall is governed by seismic displacements of the shafts and is 15cm at top level.

At east and west are 4 'Laser Halls', each made up of a laser table protected by a metallic roof. These halls are separated by a central gallery founded on piles. They are bordered at north and south by technical rooms (for air-conditionning system, energy for laser, ...).

Laser tables, central gallery and technical rooms are completely independant structures.

At south and north of the Experience Hall are technical rooms, offices and reception hall.

The conception of these structures consists in slabs supported by diaphragm walls or by beams and columns.

A particularity is the high quantity of holes in walls and slabs needed for the process, specially in the inside circular wall of the Experience Hall as shown on fig. 2, which complicates the calculation model.

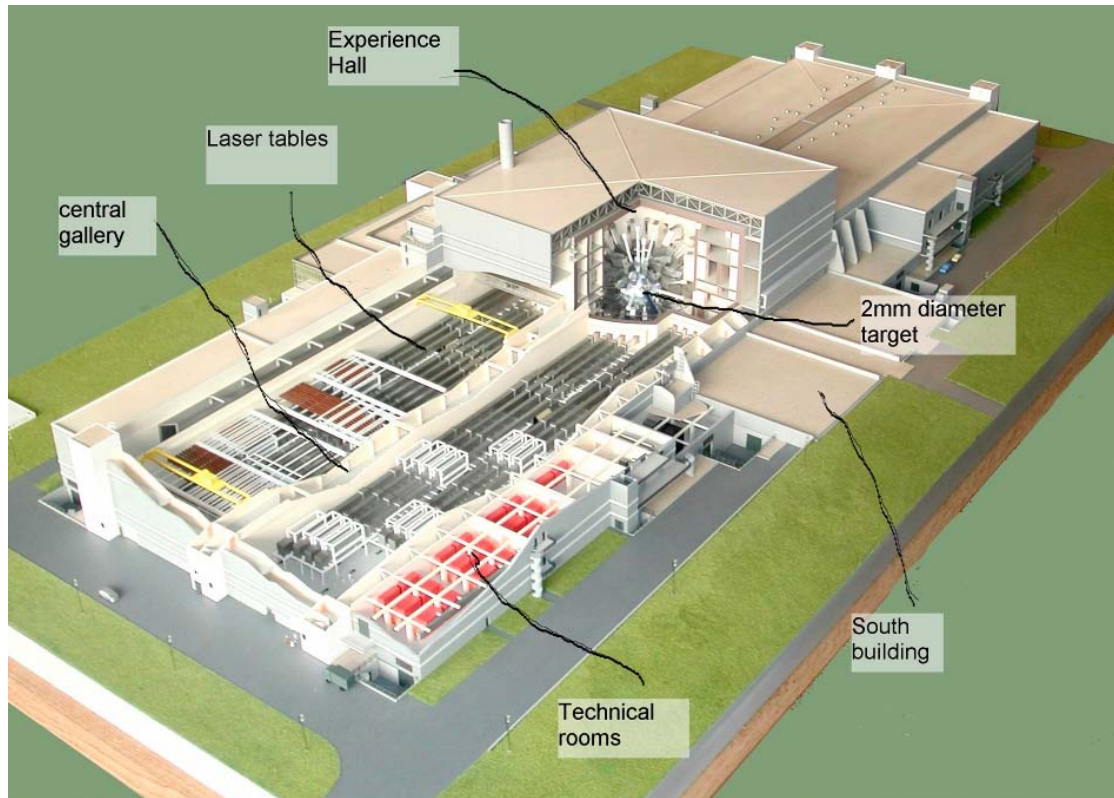


Figure 1 - Maquette du LMJ / Model of the LMJ buildings

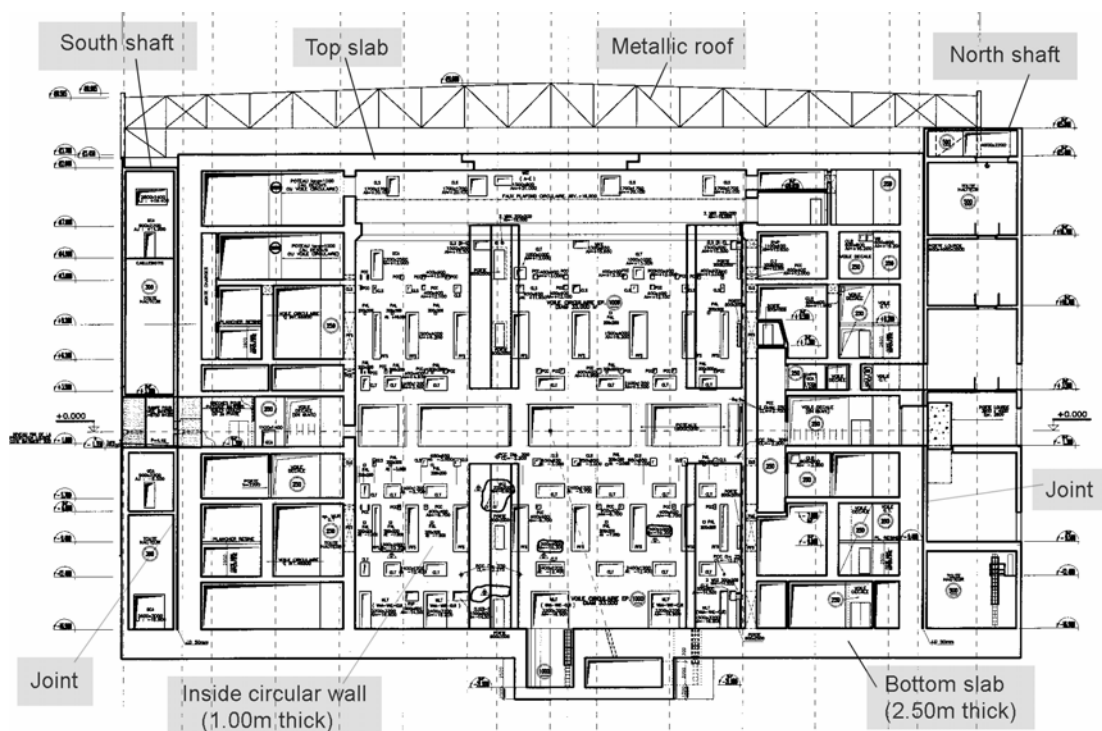


Figure 2 – Coupe transversale du Hall d'Expérience / Cross section of the Experience Hall

3. ÉTUDE SISMIQUE DU HALL D'EXPÉRIENCE

3.1. Modèle 3D Ansys

Un modèle ANSYS aux éléments finis de l'ensemble du Hall d'Expérience a été réalisé, qui devait être suffisamment détaillé pour permettre par la suite le calcul d'exécution de tout le ferrailage. C'est pour cette raison que toutes les ouvertures dont une des deux dimensions était supérieure à 1.0m devait être modélisées : cela signifie plus de 1500 ouvertures, situées soit dans les dalles, voiles plans ou voiles circulaires (voir fig. 4). Des procédures spécifiques ont été développées afin de faciliter la réalisation du modèle :

- les 3 coordonnées de chaque coin de chaque ouverture (et de chaque dalle ou voile) ont été d'abord extraites des plans AUTOCAD.
- ensuite des macro commandes ANSYS ont été développées, lisant ces données et créant le 'modèle solide' adéquat : les surfaces planes sont progressivement taillées avec les trémies

Le modèle contient finalement 92 000 nœuds et 37 000 éléments (coques et poutres). La création du modèle, y compris la génération des cas de charges et l'étude sismique, ont pris environ 6 mois.

3. SEISMIC ANALYSIS OF THE EXPERIENCE HALL

3.1. Ansys Three Dimensional model

A complete ANSYS finite element model of the experience hall has been performed, which had to be precise enough to allow further execution calculations of the whole reinforcement. That's why every hole whose one dimension was over 1.00m had to be taken into account : this means more than 1500 holes, situated either in slabs, plane walls or circular walls (see fig. 4). Specific procedures were developed in order to help creating the model :

- the 3 coordinates of each corner of each hole (as well as of each wall or slab) were first extracted from AUTOCAD drawings
- then specific ANSYS macro-instructions have been developed, which read these data, and create the adequate "solid model" : plain surfaces are progressively carved with holes...

The model finally contains 92 000 nodes, and 37 000 elements (shells and beams). The creation of the model, including generation of load cases and seismic analysis, took approximately 6 months.

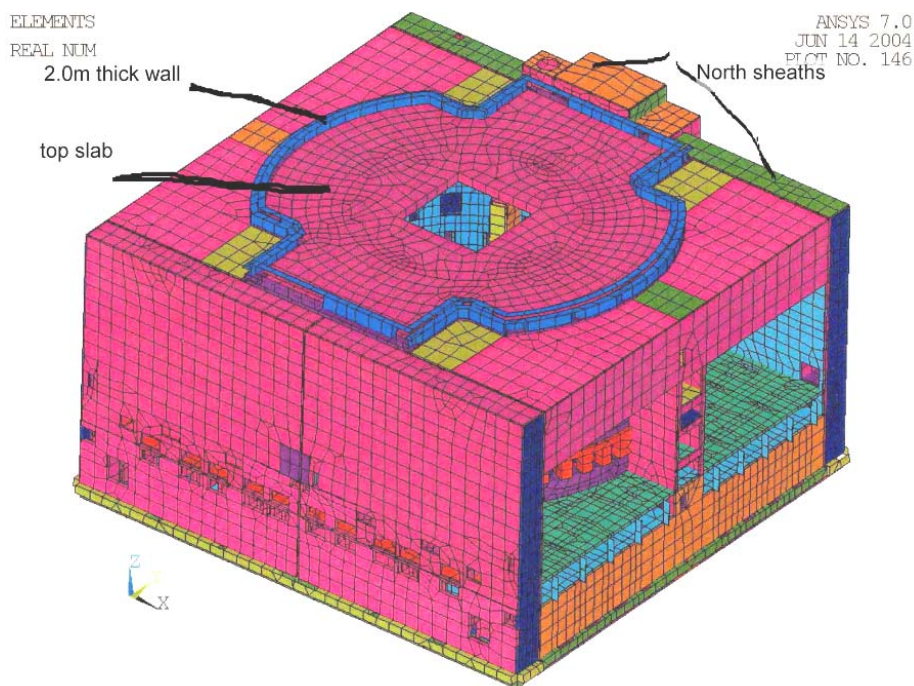


Figure 3 – Modèle 3D ANSYS / Full ANSYS 3D model

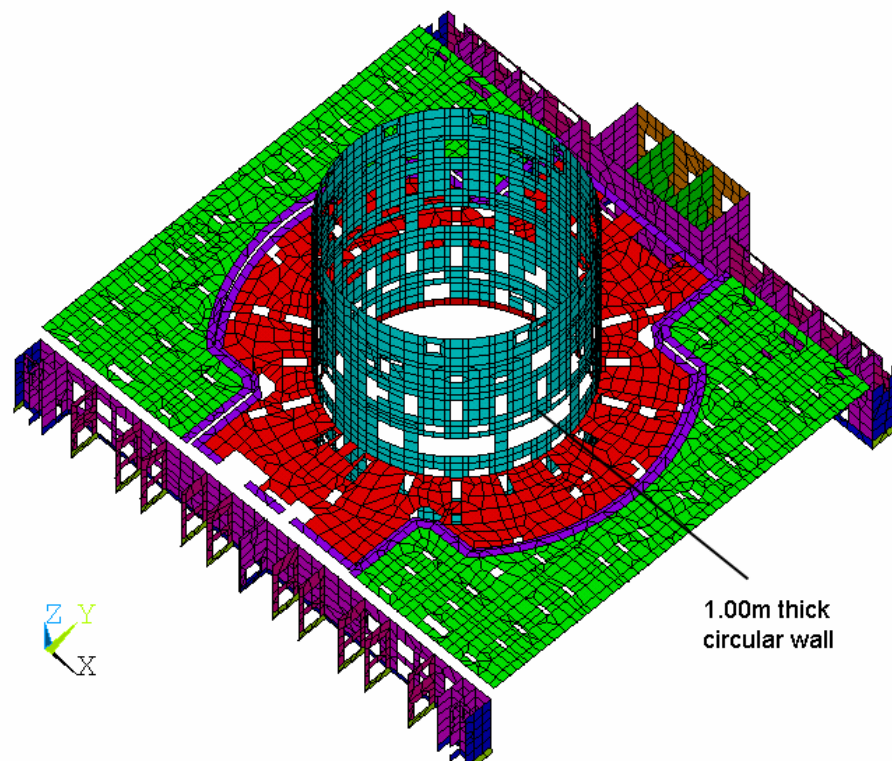


Figure 4 – Modèle 3D ANSYS : radier et voile circulaire de 1.0 m d'épaisseur
ANSYS 3D model:ground floor slab and 1.0m thick circular wall

3.2. Calcul statique

Plus de 330 cas de charges élémentaires ont été pris en compte, incluant charges permanentes et charges variables (charges d'exploitations : les charges ont été appliquées sur des surfaces élémentaires afin d'obtenir par la suite les combinaisons les plus défavorables ; vent ; neige ; température ; sous pression de la nappe)

Il a été ensuite nécessaire de considérer un nombre énorme de combinaisons, afin de fournir in fine les combinaisons ELS (état limite de service) et ELU (état limite ultime) utilisées pour la vérification de la structure et le calcul du ferrailage. Le post-processeur ARMATEC, développé par SETEC TPI, a été utilisé pour fournir ces combinaisons, ce que les codes aux éléments finis ne font généralement pas très bien.

ARMATEC est capable de déterminer des "enveloppes" (solicitations extrêmes à chaque nœud de la structure ; par exemple pour les éléments coques, ces efforts sont : F_{xx} , F_{yy} , F_{xy} = efforts de membrane (kN/ml) ; M_{xx} , M_{yy} , M_{xy} = moments de flexion et torsion (kN.m/ml) ; V_{xz} et V_{yz} = efforts tranchants), et conserve les sollicitations concomitantes. Cela est absolument nécessaire pour une détermination correcte du ferrailage.

3.2. Static analysis

More than 330 elementary load cases have been considered, concerning permanent loads as well as variable loads (live loads : the loads were applied on elementary areas in order to be later able to produce the most unfavourable combinations ; wind ; snow ; temperature ; water underpressures...)

It was then necessary to perform a huge number of combinations, in order to finally produce the ELS (serviceable limit state) and ELU (ultimate limit state) combinations needed for justification of the structure, and determination of the reinforcement. The software ARMATEC, developed by SETEC TPI, has been used to perform these combinations that finite element softwares usually do not perform very well.

ARMATEC is able to determine "envelopes" (extreme efforts at each node of the structure ; for example for shell, these efforts consist in : F_{xx} , F_{yy} , F_{xy} = in plane solicitations (kN/ml) ; M_{xx} , M_{yy} , M_{xy} = bending and torsional moments (kN.m/ml) ; V_{xz} and V_{yz} = shear efforts), and keeps the concomitant solicitations. Such a feature is absolutely necessary for a correct reinforcement determination.

3.3. Interaction sol structure

Concernant l'analyse dynamique, l'interaction sol structure a été étudiée par 'Geodynamique et Structure', qui a déterminé les courbes d'impédances : raideurs globales et amortissements globaux sous le radier, en fonction de la fréquence d'excitation. Les courbes ont été établies dans la plage de fréquence 1 Hz à 10 Hz avec un pas de 1 Hz :

- K_x, K_y, K_z = raideurs en translations dans les directions correspondantes (MN/m)
- K_{rx}, K_{ry}, K_{rz} = raideurs en rotation dans les directions correspondantes (MN.m/rd)
- $\eta_x, \eta_y, \eta_z, \eta_{rx}, \eta_{ry}, \eta_{rz}$ = pourcentage d'amortissement (%)

3 hypothèses de sol ont été prises en compte : minimale (0.67 Gm), moyenne (Gm) et maximale (1.50 Gm), Gm étant le module dynamique moyen du sol.

La raideur et l'amortissement du sol sont modélisés par des ressorts uniformes horizontaux (X et Y) et verticaux (Z) k_x, k_y, k_z (en MN/m³) et les coefficients d'amortissements correspondants, attachés aux nœuds du radier. Une analyse dynamique itérative a été nécessaire pour caler ces raideurs et amortissements à la fréquence du mode fondamental pour chaque direction de séisme (car la fréquence du mode fondamental dépend fortement de la raideur du sol).

Les relations entre raideurs globales et ressorts uniformes introduits dans le modèle sont les suivantes.

Pour une direction de séisme X, considérant la fréquence fondamentale dans la direction X :

- $k_x = K_x / S$ (S = surface du radier)
- $k_y = K_y / S$
- $k_z = K_{ry} / (b h^3 / 12)$, avec b = largeur (dans la direction Y) du radier, h sa longueur dans la direction X.

Cela signifie que la raideur verticale uniformément répartie k_z a été choisie afin de représenter la bonne raideur en rotation K_{ry} .

Le principe est le même pour le séisme suivant Y : $k_z = K_{rx} / (h b^3 / 12)$.

Pour le séisme vertical, on considère simplement $k_z = K_z / S$, calé à la fréquence du mode fondamental en Z.

Ainsi, pour une hypothèse de sol, nous avons dû considérer 3 modèles (1 par direction de séisme), différant seulement par les ressorts de sol, et donc effectuer 3 calculs dynamiques + détermination itérative des ressorts et amortissements.

3.3. Soil structure interaction

As concerns dynamic analysis, the soil structure interaction has been studied by 'Geodynamique et Structure', who determined the impedance curves : global stiffness and global damping under the bottom slab, depending on the frequency of motion ; the curves were established for the frequency range 1 Hz to 10 Hz by step of 1 Hz :

- K_x, K_y, K_z = translation stiffnesses in corresponding directions (MN/m)
- K_{rx}, K_{ry}, K_{rz} = rocking stiffnesses in corresponding directions (MN.m/rd)
- $\eta_x, \eta_y, \eta_z, \eta_{rx}, \eta_{ry}, \eta_{rz}$ = damping ratios (%)

3 assumptions were made concerning the soil's characteristics : minimum (0.67 Gm), average (Gm) and maximum (1.50 Gm), Gm being the average dynamic modulus of the soil.

The soil's stiffness and damping is modeled by horizontal (X and Y) and vertical (Z) uniformly distributed springs k_x, k_y, k_z (in MN/m³) and adequate damping ratios, attached to nodes of the bottom slab. An iterative dynamic analysis was necessary to adjust these stiffnesses and damping ratios to the frequency of the fundamental mode for each earthquake direction (as the fundamental frequency depends highly on the soils's stiffness).

The relations between the global stiffnesses and the uniformly distributed springs introduced in the model are the following.

For an X earthquake direction, considering the fundamental mode frequency in X direction :

- $k_x = K_x / S$ (S = area of the bottom slab)
- $k_y = K_y / S$
- $k_z = K_{ry} / (b h^3 / 12)$, with b = width (in Y direction) of the bottom slab, h its length in X direction.

This means that the distributed vertical stiffness k_z was chosen in order to get a correct rocking stiffness K_{ry} .

The principle is the same for an Y earthquake direction : $k_z = K_{rx} / (h b^3 / 12)$.

For a vertical earthquake direction, we simply considered $k_z = K_z / S$, retrofitted at the fundamental frequency in Z direction.

Thus, for a soil assumption, we had to consider three models (one per seismic direction), differing only by the soil springs, and thus to achieve three dynamic analysis + iterative determination of springs and damping ratios.

Pour les 3 hypothèses de sol (0.67 Gm, Gm, 1.5Gm), cela se traduit par $3 \times 3 = 9$ modèles et calculs dynamiques.

3.4. Calcul dynamique

La description ci-après s'applique à chacun des 9 calculs.

L'analyse modale a été réalisée avec ANSYS, la seule difficulté de cette étape étant liée à la taille du modèle et au nombre de modes à calculer afin d'obtenir une masse modale suffisamment proche de la masse totale de la structure, 170 000 tonnes.

Il est vite apparu que suite à la forte "massivité" de la structure (beaucoup de voiles, voiles épais) ainsi qu'à la relative souplesse du sol, le nombre de modes à calculer pouvait être plutôt faible : la somme des masses modales dépasse 99% de la masse totale avec seulement 40 modes. Cela a aidé bien sûr à avoir un temps de calcul tout à fait raisonnable.

En fonction des caractéristiques de sol, le mode fondamental pour chaque direction de séisme variait entre 1.8 et 2.8Hz, et correspond à une translation d'ensemble de la structure dans le sol. Ces modes fondamentaux sont de ce fait associés à de très forts pourcentages d'amortissements (au delà de 20%), le plus souvent générés par l'amortissement géométrique dans les fondations, et non par la déformation du béton.

As 3 soil assumptions are made (0.67 Gm, Gm, 1.5Gm), this leads to $3 \times 3 = 9$ models and dynamic analyses.

3.4. Dynamic Analysis

The description hereafter applies to each one of the 9 analyses.

The modal analysis was performed with ANSYS, the only difficulty of this task being related with the model's size and the number of modes to calculate in order to get a sum of modal masses close enough to the total mass of the structure, 170 000 tons.

It quickly appeared that due to the great "massiveness" of the structure (many walls, thick walls...) as well as to the relatively low soil's characteristics, the number of modes to calculate could be rather low : the sum of the modal masses is over 99% the total mass with only 40 modes. This helped of course to keep a calculation time quite reasonable.

Depending on soil's characteristics, the fundamental mode for each earthquake direction arises between 1.8 and 2.8 Hz, and corresponds to a global translation of the structure into the soil. These fundamental modes are thus associated with high damping ratios (over 20%), mostly generated by geometric damping through foundations, and not by the concrete deformation.

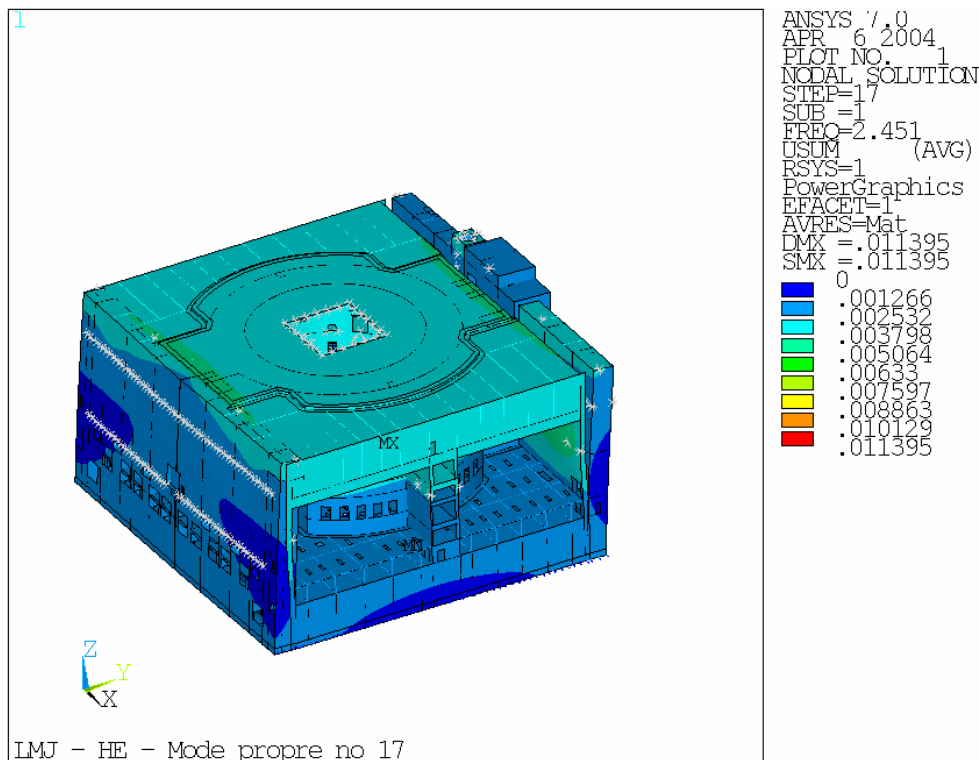


Figure 5 – Analyse dynamique : mode fondamental en Y / Dynamic analysis: Y direction fundamental mode

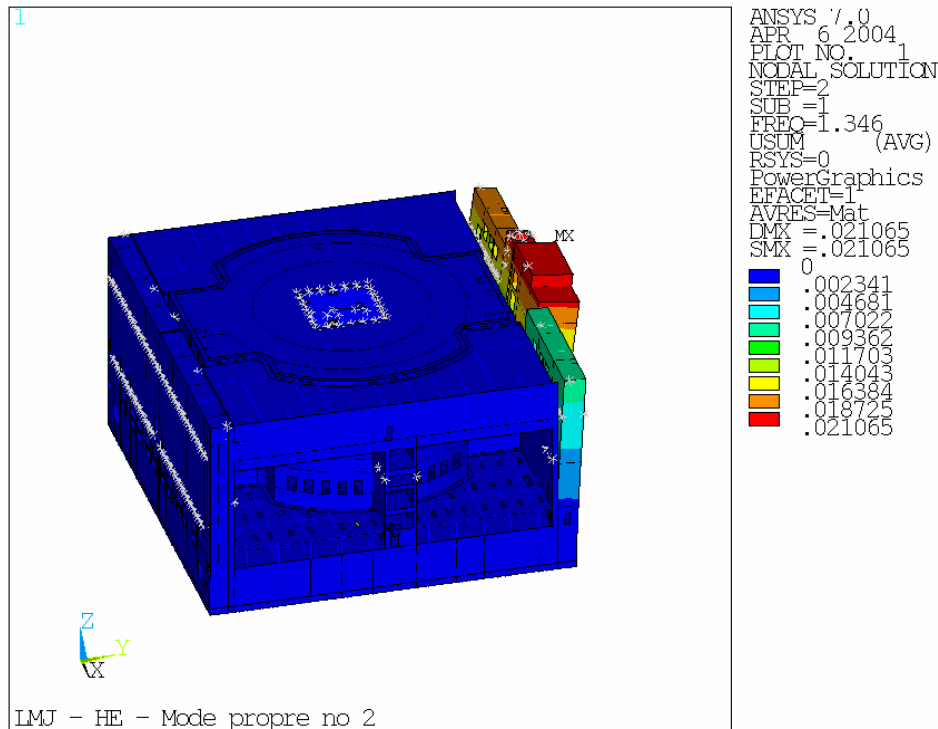


Figure 5 – Analyse dynamique : mode des gaines nord en Y / Dynamic analysis: Y direction North shafts mode

3.5. Analyse spectrale

La réponse modale au séisme, en terme de déplacements et accélérations, est effectuée avec une analyse spectrale classique : le séisme est défini par des spectres de réponse établis pour différentes valeurs d'amortissements. Pour le Hall d'Expérience, nous avons dû faire 2 études distinctes, et considéré l'effet le plus défavorable des 2 :

- une première étude prenant en compte le "spectre élastique", sans aucun coefficient de comportement ; la structure est supposée garder un comportement élastique, suivant les règles RFS (Règles Fondamentales de Sécurité)
- ensuite une seconde étude considérant un "spectre de dimensionnement" (voir fig. 7) associé à un coefficient de comportement, suivant les règles françaises "PS92" (règles applicables aux bâtiments) ; le coefficient de comportement a été pris égal à 1.4 dans les directions horizontales pour le calcul des efforts, et 1.0 pour le calcul des déplacements.

La réponse de chaque mode dépend de sa fréquence et de son facteur de participation pour la direction de séisme considéré.

3.5. Spectral Analysis

The modal response to seism, in terms of displacements and accelerations, is determined through a classical spectral analysis : the seismic hazard is defined through response spectra established for different values of damping ratios. As concerns the experience hall, we had to make 2 separate studies, and consider at last the most unfavourable effects of these 2 :

- a first study taking into account the "elastic spectrum", without any behaviour coefficient ; the structure is then supposed to keep an elastic behaviour, according to RFS rules (Fundamental Safety Rules)
- then a second study in which a "dimensionning spectrum" is considered (see fig. 7) associated with a behaviour coefficient, according to the french "PS 92" rules (rules applying to buildings) ; the behaviour coefficient was taken equal to 1.4 in horizontal directions for the calculation of efforts, and 1.0 for the calculation of displacements.

The response of each mode then depends on its natural frequency, and its participation factor to the considered earthquake.

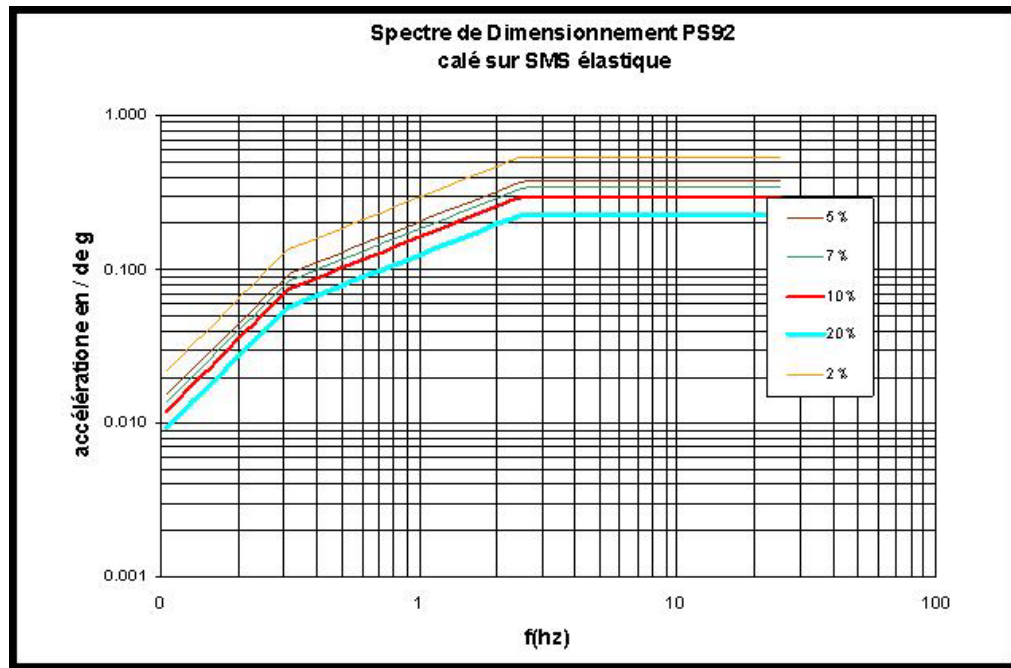


Figure 7 – Spectre de dimensionnement / Seismic dimensioning spectrum

3.6. Calcul pseudo statique

3.6.1 Méthode pseudo statique

La méthode pseudo statique consiste tout d'abord à calculer pour chaque direction de séisme les accélérations maximales de chaque noeud de la structure, et d'appliquer ces accélérations aux masses de la structure afin d'obtenir des forces statiques équivalentes : $F_k = M_k \cdot \gamma_k$ à chaque noeud k .

Une telle méthode présente pour le CEA plusieurs avantages :

- de meilleures possibilités pour vérifier les calculs comparé aux méthodes usuelles (pour lesquelles les efforts résultent directement de combinaisons CQC sur les sollicitations, et non sur les accélérations)
- ayant déterminé les niveaux d'accélérations, il est beaucoup plus facile de réaliser par la suite (si nécessaire) des modèles locaux de n'importe quelle partie de la structure, et d'appliquer le chargement sismique.

Plus précisément, pour chacune des 3 hypothèses de sol (0.67 Gm, Gm, 1.5Gm), les opérations suivantes ont été effectuées :

A) Analyse modale

Calcul des premiers modes jusqu'à obtenir une masse participante pour chaque direction de séisme supérieure ou égale à 90% de la masse totale (voir paragraphe précédent).

3.6. Pseudo static calculation

3.6.1 Pseudo static method

The pseudo static method consists first in calculating for each earthquake direction the maximal accelerations of each node of the structure, and then applying these accelerations to the structure masses in order to obtain equivalent static forces : $F_k = M_k \cdot \gamma_k$ at each node k .

Such a method presents for CEA several advantages :

- better possibilities to control calculations than with usual methods (where seismic efforts result from a direct CQC combination of sollicitations, and not accelerations).
- having determined levels of accelerations, it is far more easier to make later (if necessary) local models of any part of the structure, and apply the seismic loading.

More precisely, for each of the 3 ground's hypotheses (0.67 Gm, Gm, 1.5Gm), the following operations are made :

A) Modal analysis

Calculation of the first modes until to obtain a participating mass for each earthquake direction greater or equal to 90 % of the total mass (described in previous chapter).

Si cette condition n'est pas remplie, prenant en compte tous les modes entre 0 et 35Hz, on complète par un pseudo mode qui est calculé de manière à représenter avec les modes sélectionnés la réponse à une accélération constante uniforme. L'accélération spectrale correspondant à la fréquence et à l'amortissement du dernier mode retenu est appliquée à ce pseudo mode. Dans cette phase, les ressorts de sol et coefficients d'amortissements sont calés par itération sur les fréquences des modes fondamentaux (voir paragraphe précédent).

B) Accélération

Pour chaque direction de séisme i , la réponse des modes retenus est calculée avec la méthode spectrale classique. Une combinaison quadratique de ces réponses modales est ensuite effectuée (Combinaison Quadratique Complète) afin d'obtenir les accélérations CQC γ_{ix} , γ_{iy} , γ_{iz} (suivant les directions X, Y et Z) à chaque nœud de tout le modèle ANSYS, et aussi les torseurs CQC des réactions d'appuis Fix , Fiy , Fiz , Mix , Miy , Miz , au centre de gravité du radier (F pour forces et M pour moments).

C) Génération d'un cas de charge pseudo statique

Pour chaque direction de séisme i , le calcul "pseudo statique" consiste à appliquer sur le même modèle 3D (avec les raideurs de sol dynamiques) le champ d'accélération précédemment obtenu : à chaque nœud sont appliquées des forces égales au produit des accélérations (γ_{ix} , γ_{iy} , γ_{iz}) du nœud par la masse affectée à ce nœud.

Les accélérations CQC n'ayant pas de signe, la règle suivante est appliquée :

- les accélérations dans la direction de séisme considérée i sont prises positives.
- les deux accélérations orthogonales sont prises avec le signe qu'elles ont dans le mode fondamental pour la direction de séisme i .

D) Vérification des torseurs des réactions d'appuis

Le calcul pseudo statique pour la direction de séisme i fournit un torseur de réactions d'appuis F^*_{ix} , F^*_{iy} , F^*_{iz} , M^*_{ix} , M^*_{iy} , M^*_{iz} au centre de gravité du radier. Nous devons vérifier que ce torseur est supérieur ou égal à celui CQC calculé à l'étape B. Nous calculons pour cela la force et le moment résultants suivants :

$$F_{icqc} = \left\| \overrightarrow{F_{icqc}} \right\| = \sqrt{(Fix^2 + Fiy^2 + Fiz^2)}$$

$$M_{icqc} = \left\| \overrightarrow{M_{icqc}} \right\| = \sqrt{(Mix^2 + Miy^2 + Miz^2)}$$

Le même calcul est effectué avec le torseur des réactions d'appuis pseudo statiques F^*_{ix} , F^*_{iy} , F^*_{iz} , M^*_{ix} , M^*_{iy} , $M^*_{iz} \rightarrow$ résultantes F_{IPS} et M_{IPS} .

If this condition is not satisfied considering all the modes between 0 and 35Hz, the set of modes is completed with a pseudo mode which is calculated so as to represent with the selected modes the response to a uniform constant acceleration. The spectral acceleration corresponding to the frequency and damping of the last selected mode is applied to that pseudo mode. In this phase, the soil springs and damping ratios are iteratively adjusted on the frequencies of the fundamental modes (see previous chapters).

B) Accelerations

For each seismic direction i , the response of the selected modes is calculated with the classical spectral method. A quadratic combination of these modal responses is then performed (Complete Quadratic Combination method) in order to get the CQC accelerations γ_{ix} , γ_{iy} , γ_{iz} (in X, Y and Z directions) at each node of the full ANSYS model, and also the global CQC supported reactions Fix , Fiy , Fiz , Mix , Miy , Miz , at the gravity center of the bottom slab (F for forces, M for moments).

C) Generation of a pseudo-static load case

For each seismic direction i , the "pseudo static" calculation consists in applying on the same 3D model (with dynamic soil stiffness) the acceleration field previously obtained : at each node are applied forces equal to the multiplication of the accelerations (γ_{ix} , γ_{iy} , γ_{iz}) of the node by the mass attached to that node.

CQC accelerations having no sign, the following rule applies :

- *the accelerations in the considered earthquake direction i are taken positive*
- *the two perpendicular accelerations are considered with the sign they have in the fundamental mode for the seismic direction i .*

D) Checking of support resultant reactions

*The pseudo static calculation for earthquake direction i gives a global supported reactions F^*_{ix} , F^*_{iy} , F^*_{iz} , M^*_{ix} , M^*_{iy} , M^*_{iz} at the gravity center of the bottom slab. We have to check that they are greater or equal to the CQC ones calculated at stage B. We thus calculate the following resultant force and moment :*

$$F_{icqc} = \left\| \overrightarrow{F_{icqc}} \right\| = \sqrt{(Fix^2 + Fiy^2 + Fiz^2)}$$

$$M_{icqc} = \left\| \overrightarrow{M_{icqc}} \right\| = \sqrt{(Mix^2 + Miy^2 + Miz^2)}$$

*The same calculation is performed with pseudo static supported reactions F^*_{ix} , F^*_{iy} , F^*_{iz} , M^*_{ix} , M^*_{iy} , $M^*_{iz} \rightarrow$ resultants F_{IPS} and M_{IPS} .*

Les rapports $\lambda_F = F_{ICQC} / F_{IPS}$ et $\lambda_M = M_{ICQC} / M_{IPS}$ sont calculés, et doivent être tous les deux plus petits que 1.0.

Si cela est le cas (ie pseudo statique supérieur à CQC), le chargement et les résultats pseudo statique actuels sont conservés.

Si cela n'est pas le cas, les accélérations (γ_{ix} , γ_{iy} , γ_{iz}) sont multipliées par ce facteur correctif λ , et un nouveau calcul pseudo statique est réalisé.

E) Nous avons alors à considérer 3 (hypothèses de sol) x 3 (directions de séisme) x 2 (spectres de réponse) = 18 calculs pseudo statiques.

3.6.2. Chargement automatique avec ARMATEC

De part le grand nombre de noeuds et d'analyses dynamiques, la génération des charges pseudo statiques a nécessité un développement spécifique dans notre post-processeur ARMATEC. Le fonctionnement est le suivant :

- Génération à partir d'ANSYS de plusieurs fichiers textes contenant toutes les informations nécessaires :
 - données générales sur les modes : fréquences, facteurs de participation, coefficients d'amortissement.
 - déformées modales : 1 fichier texte par mode, contenant les déplacements à chaque noeud du modèle pour le mode considéré.
 - un fichier supplémentaire contenant la masse de chaque noeud.
- ARMATEC utilise ces données (ainsi que la réponse spectrale) pour effectuer les tâches suivantes :
 - calcul du coefficient de réponse de chaque mode
 - calcul des accélérations à chaque noeud (combinaison CQC sur les modes)
 - génération d'un fichier macro ANSYS (fichier texte) qui va appliquer les bonnes forces à chaque noeud du modèle
- Les fichiers MACRO sont alors exécutés dans ANSYS, et les cas de charges pseudo statiques calculés.
- Ces cas de charges peuvent alors être traités comme des cas de charges ordinaires : combinaisons, calcul de ferrailage, voir ci-après.

The fractions $\lambda_F = F_{ICQC} / F_{IPS}$ and $\lambda_M = M_{ICQC} / M_{IPS}$ are calculated, which must be both lower than 1.0.

If it is the case (eg. pseudo static superior to CQC), the current pseudo static loading and results are kept.

If it is not the case, the accelerations (γ_{ix} , γ_{iy} , γ_{iz}) are multiplied by that correcting factor λ , and a new pseudo static calculation is performed.

E) We thus have to consider 3 (soil hypothesis) x 3 (earthquake directions) x 2 (response spectra) = 18 pseudo static calculations.

3.6.2. Automatic loadings with ARMATEC

Due to the number of nodes and number of dynamic analyses, the generation of pseudo static loadings needed a specific development in our post-processor ARMATEC. This worked in the following way :

- generation with ANSYS of several "text files" containing all the needed informations:
 - general informations on modes : frequencies, participation factors, damping ratios
 - modal shapes : 1 text file per mode, containing the displacements at each node of the model for the considered mode
 - one extra file containing the mass of each node
- ARMATEC used these data (as well as the reponse spectra) to perform the following tasks :
 - calculation of the response coefficient of each mode
 - calculation of accelerations at each node (CQC combination on modes)
 - generation of an ANSYS macro-file (text file) that will apply the adequate forces at each node of the model
- The macro-files were then executed in ANSYS, and pseudo-static load cases were calculated
- These load cases could then be operated exactly as ordinary load cases: combinations, reinforcement calculation, see hereafter.

4. CALCUL DU FERRAILLAGE DANS LE HALL D'EXPERIENCE

Comme précisé ci-dessus, le post-processeur ARMATEC effectue principalement 2 tâches ;

- combinaisons et enveloppes des cas de charges (avec valeurs concomitantes)
- calculs béton armé et justifications, y compris calcul des aciers longitudinaux, mais aussi : vérification de la contrainte béton, vérification du cisaillement, etc ...

Il a été développé en 1999 pour les études d'exécution de la digue de Monaco (structure flottante en béton précontraint, avec des limitations sévères des ouvertures de fissures).

Au sujet du ferrailage, ARMATEC détermine à chaque nœud les sections nécessaires (en cm^2/ml) pour les 4 nappes : Inf_X, Sup_X, Inf_Y, Sup_Y où Inf et Sup correspondent chacun à une face, et X, Y sont les deux directions du ferrailage. Les résultats sont présentés sous forme de cartographies couleurs, permettant une interprétation aisée, et par la suite la définition du ferrailage pratique. Voir figures 8 et 9.

Pour le projet du LMJ, SETEC TPI a produit 1400 plans d'exécution (coffrage + ferrailage).

4. REINFORCEMENT CALCULATION OF THE EXPERIENCE HALL

As said above, the post-processor ARMATEC mainly performs two tasks :

- combinations and envelopes of load cases (with concomitant values)
- concrete calculations and justifications, including longitudinal reinforcement calculations, but also : concrete stress checking, shear checking, etc.

It was developed in 1999 for the execution studies concerning the Monaco dyke (floating prestressed concrete structure, where crack width had to be severely limited).

As concerns reinforcement, ARMATEC determines at each node the sections needed (in cm^2/ml) for the 4 layers : Inf_X, Sup_X, Inf_Y, Sup_Y where Inf and Sup means one face and the other, and X, Y are the two directions of the reinforcement. The results are presented as color maps, allowing an easy interpretation, and later definition of the practical reinforcement. See figures 8-9.

For the LMJ project, Setec TPI made 1400 execution drawings (formwork + reinforcement).

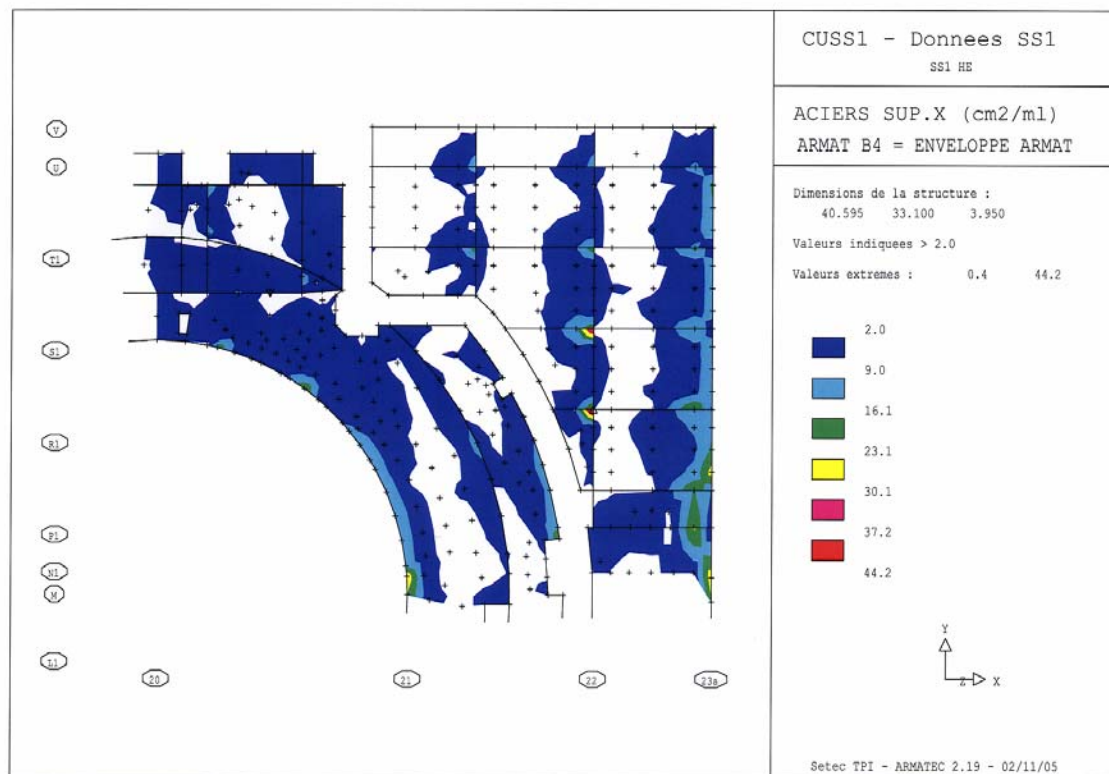


Figure 8 – Ferrailage théorique calculé par ARMATEC (séisme ELU) / Slab theoretical reinforcement calculated by ARMATEC – seismic ULS

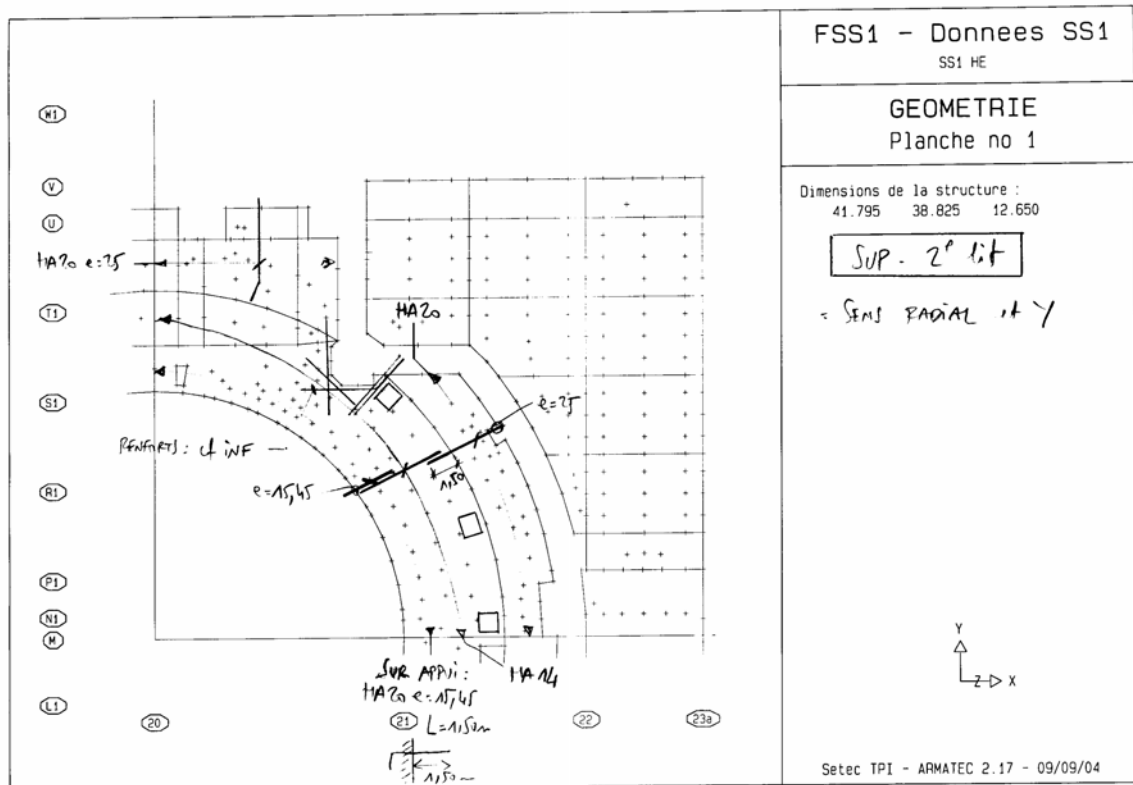


Figure 9 – Ferrailage réel (séisme ELU) / *Slab practical reinforcement – seismic ULS*