

FRADOC--5-1

R5

**PROTECTION SISMIQUE DES ÉQUIPEMENTS
CIVILS ET INDUSTRIELS ESSENTIELS**

**EARTHQUAKE PROTECTION OF ESSENTIAL
CIVIL AND INDUSTRIAL EQUIPMENTS**

BOURRIER, P. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 75-Paris (France)

LE BRETON, F.; THEVENOT, A. FRAMATOME, 92-Paris-la-Defense (France)

IX-1 PROTECTION SISMIQUE DES ÉQUIPEMENTS CIVILS ET INDUSTRIELS ESSENTIELS

EARTHQUAKE PROTECTION OF ESSENTIAL CIVIL AND INDUSTRIAL EQUIPMENTS

Pierre BOURRIER *, Francis LE BRETON **, Alain THÉVENOT ***

ABSTRACT

This document presents the principal reflexions concerning seismic engineering applications for equipment and the attitude of the non-employment towards these structures.

The notion of essential equipment is then pointed out as well as the main particularities of equipment considered as structures. A methodology is shortly presented about hospitals and telecom centers. Some know-how rules are explained for the anti-seismic design of equipment.

Obviously, analytical and experimental methods describe moreover, are to be kept in mind. Finally, this document illustrated a few pathological examples encountered after an earthquake.

IX-1.1 INTRODUCTION

Des l'origine, le séisme a manifesté ses effets les plus terribles au travers des constructions. C'est ainsi, au terme de la tenue de tel ou tel type d'ouvrage qu'on définit le degré sismique : « degré VII ... écroulement de minarets, de mosquées ou d'églises mal construites ».

La conséquence du séisme sur les constructions a un caractère captif et monopolisateur. Le nombre des victimes enfouies sous les décombres, le caractère visuel et spectaculaire des effondrements frappent les esprits du public et de la communauté scientifique.

Dans ces conditions, le travail des chercheurs et l'attention des constructeurs se sont mobilisés essentiellement pour améliorer et accroître la protection parasismique des constructions ; et incontestablement, de grands progrès ont été réalisés dans le domaine de la construction parasismique, principalement au travers des dispositifs constructifs.

Aujourd'hui, les efforts accordés se consacrent un peu plus au contenu qu'au contenant, c'est-à-dire plus aux équipements qu'aux bâtiments qui les abritent

Les équipements civils et industriels constituent une vaste gamme et se distinguent fortement des structures, au sens génie civil, telles que bâtiments, charpentes, etc.

Ils représentent, en outre, un ensemble plus discret, moins perceptible et moins spectaculaire. Mais certains d'entre eux s'avèrent être essentiels et critiques face au risque sismique.

IX-1.2 LES ASPECTS SPÉCIFIQUES DES ÉQUIPEMENTS

Les différences d'analyse entre les bâtis et les équipements se fondent sur trois registres.

* Partenaire, Techniques Associées-Conseil, Consultant à la SOCOTEC — Professeur adjoint de Mécanique à l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

** Ingénieurs à FRAMATOME, Secteur Etudes.

1.2.1 LA VARIÉTÉ

On rencontre parmi les équipements un nombre considérable d'appareils offrant une variété d'utilisation, de destination et donc de *forme* (géométrie) et de matériau (loi de comportement). A côté de machines classiques, telles que des pompes, des vannes, des tuyauteries, des moteurs diesel ou électriques, des bidons, des échangeurs, etc., dont les comportements sont bien décrits dans les techniques de l'ingénieur, on trouve des équipements plus particuliers, inattendus, voire surprenants, machines transfert de combustibles, épilucheuse de mandarines, bloc de visée optique, bras ou rotules artificiels, ventilateurs, isolateurs, etc. Encore convient-il de nuancer cette classification, car il existe bien des types de pompes et on en fabrique encore de nouvelles.

La diversité est aussi de règle pour ce qui concerne les matériaux. Les aciers, qu'ils soient inoxydables ou « bons à ferrer les ânes » sont souvent répertoriés. Il en va de même des métaux non ferreux les plus usuels tels que le cuivre, le titane ou le molybdène, mais la rencontre de synthétiques époxy ou de fibres de carbone, de balsa, de toile, de plexiglas apporte toujours des surprises. Et là aussi les extrapolations sont à éviter. Par exemple, le choix pour des raisons chimiques (corrosion) d'aluminium pur fait sortir des tables et des normes reperonnées en mécanique ou bien l'utilisation d'acier réfractaire aux environs de 1000 °C demande des campagnes d'essais délicates.

1.2.2 LA COMPLEXITÉ

Cette complexité est variable. Une tuyauterie, même équipée de ses vannes, clapets et auxiliaires, reste plus appréhendable qu'un moteur diesel ou un groupe frigorifique. On sent déjà poindre à cet égard un besoin de *schématisation* : il faut distinguer l'utilité vis-à-vis du comportement mécanique en écartant des pièces, des assemblages ou des sous-composants qui, s'ils ont été l'objet de labeur en Bureau d'Etudes, ne collaborent pas au fonctionnement mécanique de manière essentielle. Par exemple, une vanne, par son caractère massif, intervient principalement par effet d'inertie sur une ligne de tuyauterie et point n'est besoin, à *priori*, d'entrer dans l'analyse locale de composants élémentaires. Lors de l'analyse d'un bidon, il convient aussi d'apprécier la prise en compte des piquages et suivant leur diamètre, leur position, ils seront à négliger ou non.

Une autre cause de complexité, est la présence de pièces mobiles dans les équipements. Cela introduit des jeux, des liaisons unilatérales (système de fermeture) sont des grands déplacements (arbre en rotation, pont perché retractable, bras télémanipulateur). Toutes ces pièces mobiles, ces assemblages et mécanismes subtils amèneront, par la suite, une réflexion fondamentale sur les besoins ou non de la voie expérimentale.

1.2.3 LA FONCTIONNALITÉ

Une distinction fondamentale intervient dans le choix des *critères constructifs*. Outre la stabilité, l'intégrité de la structure, qui sont des exigences classiques, on est en droit de demander à un équipement de continuer à fonctionner dans des conditions définies. Ainsi, il faut s'assurer d'une part du niveau correct des contraintes

internes et des réactions sur le supportage, et d'autre part, on peut être amené à introduire des limitations sur les *déplacements* (déglingage des arbres, de commande de disjoncteurs, l'espacement de diélectriques) ou bien sur les *accélérations* (tenue d'équipements électriques ou électroniques dans les armoires de commande par exemple).

Dans l'élaboration de ces critères, il n'est pas de règle a priori autres que celles des codes de construction tels R.C.C.M., A.S.M.E., C.O.D.A.P., A.P.L., D.I.N., etc. Ces critères sont essentiellement liés aux contraintes. En ce qui concerne le fonctionnement, cela doit être défini dans les spécifications techniques du matériel c'est-à-dire tolérance de focalisation de canons à électrons, tolérance d'accélération sur des radars ou des antennes, jeu maximum dans des mécanismes de commande de barres de contrôles, etc. Souvent, malheureusement, les spécifications sont incomplètes à ce sujet, et il faut alors porter une attention particulière aux dispositions générales qui répondent à l'exigence sibylline : « le constructeur fera la démonstration qu'en toute circonstance son matériel conserve son opérationnalité ».

A ces considérations, il conviendra d'ajouter la notion de *coût* de remplacement ou de réparation qu'il s'agisse du *coût direct* (changement d'une tuyauterie déchirée) ou du *coût indirect* (remplacement de matériels noyés à cause de la fuite de la tuyauterie précédente) voire de la perte d'exploitation résultante.

IX-1.3 LES ÉQUIPEMENTS ESSENTIELS FACE AU RISQUE SISMIQUE

1.3.1 Si l'on examine les conséquences d'un séisme sur un équipement industriel, on peut considérer deux catégories qui induisent deux types de critères de construction ou de vérification :

- le non-fonctionnement,
- la rupture franche.

On considère, par exemple, un circuit véhiculant de l'oxygène dans un bâtiment tel qu'un hôpital (salles d'opération, de réanimation). Le premier cas correspond à l'impossibilité de manœuvrer des clapets et les vannes, ou à l'arrêt des moteurs de pompes ou de compresseurs. Dans cette configuration, quelques patients ne sont plus alimentés. Dans le second cas, les réseaux sont détériorés. L'oxygène se répand dans le bâtiment et il y a risque d'explosion. Ainsi, même si le bâtiment a résisté en tant que *structure* au séisme, les effets secondaires sur les équipements apparaissent aussi dangereux pour le public reçu dans cet établissement.

1.3.2 Les équipements qui méritent une *attention sismique* particulière s'ordonnent de façon non exhaustive de la manière suivante en fonction des risques associés.

1.3.2.1 Équipements nucléaires dont la rupture ou l'arrêt est susceptible de provoquer des émissions de produits contaminés ou de ne pas les confiner effecti-

vement. On peut citer, à ce titre, la cuve du réacteur, le circuit primaire, les échangeurs, les pompes, le système de pressurisation (s'il en existe), les systèmes de manipulation, etc., de nombreux équipements sur des usines de retraitement de déchets nucléaires.

1.3.2.2 Installations chimiques dont la déaillance pourrait conduire à des explosions ou à des dégagements toxiques (réservoirs de stockage de gaz liquifiés, d'ammoniac susceptibles d'exploser, bacs d'acide, etc., produits hautement toxiques tels que dioxine, hexafluorure de soufre, etc.).

1.3.2.3 Installations électriques, auxiliaires divers dont la rupture n'engage pas directement la vie des hommes en général, mais risque d'entraver considérablement la réalisation et la progression des secours, la tenue des postes de transformation (pièces massives sensibles au basculement), les désordres dans les chemins de câbles (création de courts-circuits et risque d'incendie).

1.3.2.4

- Effondrement des bâches de fuel alimentaire de diesel de secours.
- Rupture des canalisations d'eau potable ou des pompes de circulation.
- Mise hors service des réseaux de ventilation dans un certain nombre de bâtiments.
- Ateliers équipés de machines sophistiquées et coûteuses (risque économique).
- Stockage de produits dangereux ou « stratégiques » (pharmacie d'hôpital par exemple).
- Effondrement d'antenne de télécommunication.
- Rupture des systèmes de sécurité incendie (sprinklers).
- Destructions d'archives informatiques.
- etc.

1.3.3 De ce point de vue, on considère, à titre d'exemple, deux types de bâtiments, l'hôpital et le central téléphonique. On se place dans le cas où les structures génie-civil se révèlent efficaces et où l'intégrité physique du bâtiment est garantie.

Il va de soi que ces deux établissements doivent assurer leurs fonctions à la suite d'un séisme :

- soins aux blessés et traumatisés.
- organisation et coordination téléphonique des secours.

La quantité des équipements internes qui sont nécessaires à leur bonne marche, conduit à examiner les établissements en distinguant d'abord :

1.3.3.1 Les Unités Fonctionnelles Essentielles (U.F.E.), telles que, pour l'hôpital :

- centrale électrique.
- centrale fluide (eau, air, oxygène, etc.).
- bloc opératoire.
- salle de réanimation.
- pharmacie.

- cuisine.
- central téléphonique et radio.
- salles d'examen.
- etc.

puis, unité par unité, on analyse les composants un par un ; par exemple : Centrale électrique :

- chemins de câble : risque de court-circuit et d'incendie.
- transformateur : éclatement, basculement.
- isolateurs : bris de céramique.
- armoires : blocage des contacteurs.
- batteries : renversement.
- diesel de secours : rupture des tubulures d'admission, perte de fuel alimentaire.
- etc.

1.3.3.2 Cette démarche peut être reprise pour le central de télécommunication.

Les Unités Fonctionnelles Essentielles sont :

- salle réparateur.
- atelier d'énergie.
- groupe électrogène.
- salle transmission.
- salle d'exploitation.
- salle autocommutateur.
- etc.

Et en terme de composants, par exemple, pour l'atelier d'énergie, on distingue :

- redresseur.
- onduleur.
- armoire de départ.
- armoire de contrôle.
- grille d'énergie.
- etc.

Une fois délimités les équipements qui requièrent analyse, il convient d'examiner leur comportement mécanique en cas de séisme.

IX-1.4 ANALYSE SISMIQUE DES ÉQUIPEMENTS

1.4.1 Un équipement est considéré dès lors comme une structure, et les méthodes et règles générales de l'analyse sismique vont s'appliquer. On veillera à respecter l'action éventuelle des fluides contenus. Quelques particularités doivent toutefois demeurer dans l'esprit du concepteur.

Dans un équipement, il peut y avoir des parties mobiles, ce qui le différencie d'une structure au sens propre. Des crieries portant sur les déplacements relatifs des pièces (grippage) devront être définies.

Un équipement peut être placé en étage et la donnée de base sera donc le spectre sismique transféré. Ce transfert conduit souvent à utiliser des spectres « aggravés », c'est-à-dire déformés. Le pic d'amplification est ainsi souvent majoré.

Enfin, certains équipements tels que tuyauteries, chemins de câbles, gaines de ventilation, etc., circulent d'un bâtiment à l'autre, d'un étage à l'autre. Dans ces conditions, il faut employer des méthodes spécifiques car les spectres sollicitant les supportages sont différents (méthode des spectres multiples).

1.4.2 On s'attache donc d'abord à bien appréhender les fonctionnements sismiques des équipements, c'est-à-dire à distinguer les contributions de *raideur* (énergie élastique) et de *masse* (énergie cinétique).

Ainsi sur un groupe frigorifique, le compresseur a un effet de masse rigide, tandis que le faisceau tubulaire de l'évaporateur se comporte comme un solide déformable et doté de masse.

Pour le calcul préliminaire des fréquences propres, on emploie des méthodes « manuelles » ou des formulaires classiques. Les modes fondamentaux de parties de l'équipement ainsi approchées sont rejetés si possible au-delà de la fréquence de coupure du spectre afin d'éviter les calculs dynamiques proprement dits. On utilise aussi avec profit des outils tels que la méthode de Rayleigh-Ritz pour évaluer les valeurs spectrales et les allures modales. Cette méthode consiste à rapporter l'énergie de déformation dans un mode de vibration supporté vis-à-vis de l'énergie cinétique. On apprécie alors la contribution respective des modes locaux (respiration de la porte d'une armoire électrique) et des modes globaux (vibration du châssis de l'armoire).

Il ne faut pas craindre de *raïdir* les équipements en vue de relever les niveaux de fréquence. Lorsque ce relèvement ne s'avère pas possible, on peut au contraire envisager d'assouplir les structures pour se trouver « à gauche » du pic d'amplification vers de plus basses fréquences. Cette démarche peut alors apparaître contradictoire avec la tenue statique du système (*cheminée, mats d'antenne haubannés*).

Par exemple, sur un registre de ventilation, on peut augmenter la rigidité des volets pour qu'individuellement ils n'interviennent que par leur inertie.

1.4.3 Enfin, on sait se faire humble.

Il faut savoir que pour certains types d'appareils, notamment en électricité ou électronique, seul l'essai pourra être concluant et valide. Ce moyen de qualification sismique suppose bien entendu que l'équipement soit construit. Les raisonnements élémentaires de l'approche analytique concourent évidemment à une meilleure réalisation de l'essai.

1.4.4 Parmi les « bonnes idées » du prédimensionnement sismique, il faut avoir en tête les principes suivants :

1.4.4.1 Réduire la masse : en effet, les efforts sismiques, de la forme $m \cdot y$ sont d'autant plus faibles que m est faible.

1.4.4.2 Abaisser le centre de gravité : de la sorte, les efforts de basculement sont minores.

On dit que les ouvrages d'art et de génie civil périssent, principalement par des défauts de fondation.

Il en va de même en matière d'équipement. L'ancrage et l'accrochage des appareils doivent être très soignés (spittage, soudage sur des platines, etc.).

Des dispositifs pour retenir les objets peuvent être envisagés : rebords sur les étages de produits pharmaceutiques, sandows élastiques devant les rayons de bibliothèque, etc.

Il faut veiller également aux effets du basculement d'équipements voisins, moins bien conçus ou attachés et qui pourraient venir écraser l'équipement central qui, lui, est bien conçu individuellement face au séisme.

1.4.4.3 Découpler mécaniquement les systèmes : concevoir des systèmes de forme simple, présentant des symétries (ou éviter les flexions-torsions) ou les rôles sont séparés ; il faut que les parties travaillant en service ordinaire et en séisme soient distinctes si possible.

1.4.4.4 Favoriser les jeux et la ductilité : afin d'absorber au mieux l'énergie introduite par le séisme, on peut manager des jeux dans les assemblages boulonnés, par exemple, mais aussi dégager les équipements et éliminer les butées, il est intéressant de faire travailler certains composants, la boulonnerie en particulier aux ancrages, au-delà du régime élastique en évitant les systèmes fragiles (détourage des boulons à fond de file).

1.4.4.5 Suspension et amortisseurs

La suspension souple des équipements, surtout quand ils sont sujets à des chargements thermiques, s'avère *convenable*, car elle permet de limiter les contraintes thermiques. En contrepartie, ce système fait chuter les fréquences considérablement (tuyauterie par exemple) et il est avantageux, voire nécessaire, d'installer des amortisseurs *localement* (aux ventres de vibration) sur l'équipement, qui permettront d'abaisser les amplifications spectrales.

L'effet pendulaire des suspensions verticales introduit un rappel horizontal (rigidité géométrique) et doit être pris en compte dans les calculs statiques et dynamiques. Ces suspensions fréquemment employées pour les chemins de câbles et les gaines de ventilation doivent être entretoisées pour interdire ces mouvements de « balance ».

1.4.5 Pour des équipements particulièrement complexes, ou à haut risque, on recourt à des méthodes de calculs plus avancées (modélisation par la méthode des éléments finis par exemple) où toute la simulation du séisme est effectuée par voie mathématique. La difficulté essentielle réside dans la schématisation :

— Que doit-on représenter ?

— Quels détails, quels sous-ensembles d'équipement peut-on négliger ?

— Où doit-on limiter le modèle, en particulier quand il y a des connexions mécaniques ou électriques (tuyauteries, tubulures, câblages) ? Le choix des conditions aux limites est un point délicat, d'autant plus que les conditions aux limites ont un rôle *essentiel* pour la détermination des fréquences propres des structures.

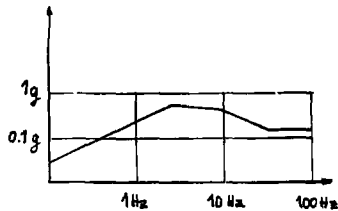
— Est-ce que les fluides contenus doivent être pris en compte? (En effet, l'action dynamique des cuves, tuyauteries, réservoirs, etc., est parfois non négligeable et les méthodes employées dans ce cas sont différentes du calcul des structures classiques (méthode des éléments finis avec couplage-fluide/structure)).

1.4.6 Enfin, pour nombre d'équipements, souvent à caractère électrique (armoires électrique, moteur de secours, baie de commande, carte électronique, contacteur) et des pièces mécaniques telles que vannes, valves, clapets, l'essai sur table vibrante se révélera indispensable.

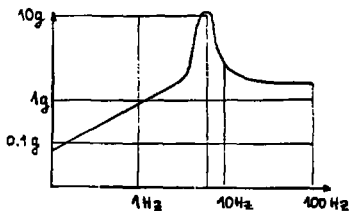
IX-1.5 EXEMPLES DES ÉQUIPEMENTS CIVILS

1.5.1 TRANSFERT DE SPECTRE

Les deux diagrammes, ci-dessous, illustrent de façon criante la dégradation du spectre sismique en étage. Ce cas est particulièrement aggravé, car il s'agit d'un équipement monté sur un bâti métallique placé lui-même en étage d'un bâtiment en béton armé.



(a) Spectre de base
(échelle log-log)



(b) Spectre transféré
(échelle log-log)

Fig. IX-1.1

1.5.2 GROUPE FRIGORIFIQUE CHILLER SYSTEM

Ce groupe est destiné à fournir de frigories pour un système de conditionnement d'air de poste centralisé de commande. Il comporte essentiellement :

- un compresseur,
- un évaporateur (échangeur),
- une réserve de fréon.

La figure IX-1.2 montre un groupe endommagé par basculement (dégât important aux liaisons); le schéma (fig. IX-1.3) représente un « bon groupe » dont le centre de gravité a pu être abaissé.

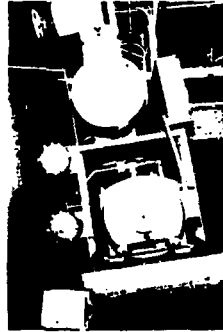


Fig. IX-1.2. (photo J. STRATTA-EERI).

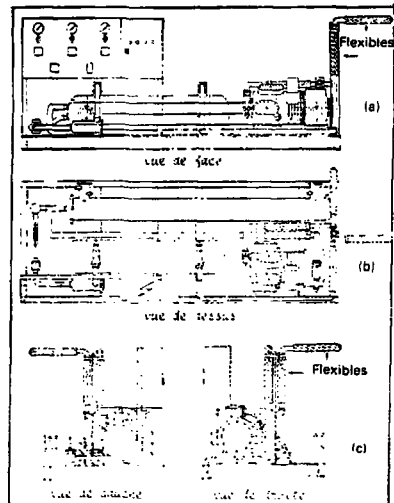


Fig. IX-1.3

On notera également la présence des « flexibles » qui assurent le découplage mécanique.

1.5.3 RÉSERVOIRS DE STOCKAGES STORING TANKS

Les quatre vues de la figure IX-1.4 montrent que les réservoirs de stockage sont assez mal conçus pour résister aux efforts horizontaux non équilibrés (autres que poussée hydrostatique), mais aussi au supplément d'accélération verticale (flambage symétrique en patte d'éléphant).



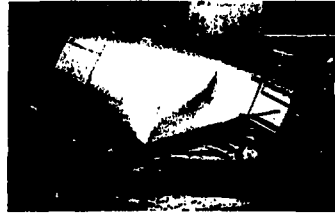
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. IX-1.4. (photos J. STRATTA-EERI).

1.5.4 ÉQUIPEMENTS TÉLÉPHONIQUE TELECOM EQUIPMENTS

Lors de ce séisme, les armoires de commutation situées à l'étage de ce bâtiment, soumises à un spectre aggravé, ont été projetées à l'extérieur à travers la paroi (fig. IX-1.5 a).

Au rez-de-chaussée, moins sollicitées, elles sont demeurées en place mais ont brisé leur ancrage.

La seconde photo montre le renversement d'un ensemble de batteries auxiliaires (fig. IX-1.5 b).



(a)



(b)

Fig. IX-1.5. (photos J. STRATTA-EERI)

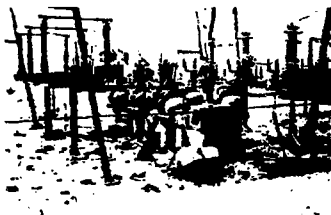
1.5.5 ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES ELECTRICAL EQUIPMENTS

Les éléments à basse fréquence, tels que les portiques, se sont trouvés à « gauche du pic d'amplification » et ont résisté. Par contre, les éléments massifs et rigides ont été renversés et brisés (fig. IX-1.6 a, b).

Sur ce cliché, on constate que seule la câblerie électrique retient ces armoires! (fig. IX-1.7).



(a)



(b)

Fig. IX-1.6. (photos J. STRATTA-EERI).



Fig. IX-1.7. (photo J. STRATTA-EERI)

1.5.6 EFFETS DU SÉISME SUR DES INSTALLATIONS DE STOCKAGE SEISMIC EFFECTS ON STORING DEVICES INSTALLATIONS

Ces dispositifs de stockage de livres (bibliothèque) (fig. IX-1.8) ou de liquide (bouteilles de vin) (fig. IX-1.9) ont été fortement chahutés. On peut imaginer les conséquences du même phénomène dans un entrepôt de produits chimiques ou une pharmacie d'hôpital.



Fig. IX-1.8. (photo J. STRATTA-EERI).



Fig. IX-1.9. (photo J. STRATTA-EERI)



Fig. IX-1.10. (photo J. STRATTA-EERI)

Pour prévenir la chute des objets, on peut disposer des sandows élastiques pour retenir les pièces (fig. IX-1.10).

1.5.7 SALLE DE SOIN D'HÔPITAL HOSPITAL NURSING UNIT

Mouvements importants des objets reposant sur le sol ainsi que des équipements suspendus au plafond.



Fig. IX-1.11. (photo J. STRATTA-EERI).

1.5.8 RÉSEAU DE TUYAUTERIES PIPING SYSTEM

Dans ce genre de structures, les fréquences critiques situées dans la zone d'amplification sont extrêmement nombreuses. En outre, compte tenu des effets thermiques dus aux fluides véhiculés, il n'est pas toujours possible de réduire ces systèmes en augmentant par exemple la densité des supportages. Un judicieux compromis doit être trouvé entre les effets thermiques et les effets mécaniques.

Un exemple de modèle de calcul d'un réseau de tuyauterie est donné par la figure où l'on peut remarquer la géométrie assez complexe de tels circuits.

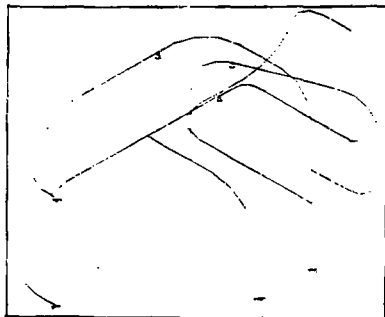


Fig. IX-1.12

IX-1.6 EXEMPLES, ÉQUIPEMENTS NUCLÉAIRES

Les exemples suivants concernent des équipements des centrales nucléaires devant résister à un séisme majeur de sécurité afin d'assurer la sûreté. Ils ont été conçus pour respecter des impératifs de fonctionnement normal et pour tenir au séisme.

1.6.1 ÉCHANGEUR TUBULAIRE VERTICAL HEAT EXCHANGER

Un échangeur thermique tubulaire vertical à pression est constitué d'une calandre contenant un faisceau tubulaire, et supportée par une jupe circulaire (fig. IX-1.13). Cet appareil est modélisé par une poutre d'inertie équivalente au corps de l'échangeur, avec une masse volumique tenant compte de l'eau.

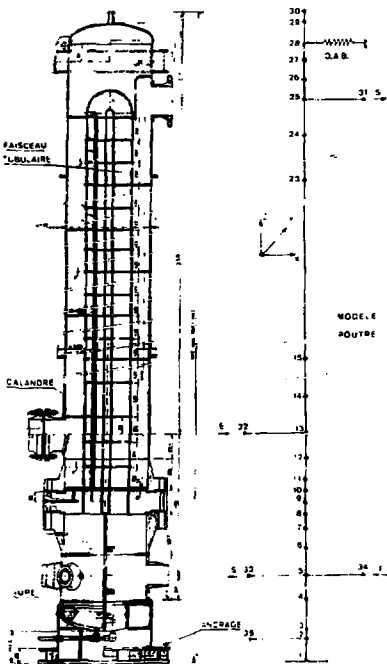


Fig. IX-1.13

Pour vérifier la tenue globale, intégrité de l'enveloppe et de l'ancrage, seule la masse du faisceau tubulaire est modélisée sur l'enveloppe. Comme la base de l'appareil est suffisamment boulonnée au génie civil, on prend l'hypothèse de l'encastrement parfait.

Les tuyauteries connectées sont considérées découpées: elles sont prises en compte par des torseurs équivalents.

Le calcul sismique est fait par la méthode du spectre de réponse. Le nombre élevé de nœuds du modèle aux éléments finis est imposé par les variations géométriques de l'appareil. La première fréquence propre, voisine de 8 Hz, est située dans la zone du spectre fortement amplifié par le bâtiment.

Pour des niveaux sismiques élevés, la modification du supportage de l'appareil, en ajoutant des butées horizontales en tête, permet de limiter les efforts dans les zones critiques (brides de la plaque tubulaire, jupes et ancrage). Cette solution permet de diminuer les accélérations en élevant la fréquence, et d'améliorer la répartition des efforts. Généralement, des butées élastiques de raideurs relativement faibles suffisent. Ces butées sont réalisées par des dispositifs autobloquants permettant la dilatation thermique.

1.6.2 RÉSERVOIR VERTICAL VERTICAL TANK

De même, les sollicitations sismiques induites sur les réservoirs verticaux (fig. IX-1.14) peuvent être réduites considérablement par des butées en tête. Les efforts horizontaux sont repris tangentiellement pour les appareils à paroi mince (fig. IX-1.15).

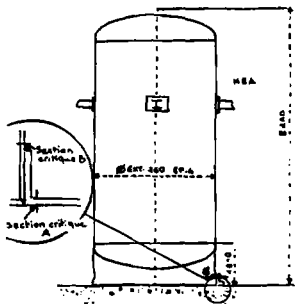


Fig. IX-1.14

Lorsque la paroi est très mince, l'interaction fluide coque est étudiée dans les directions horizontale et verticale.

1.6.3 ÉCHANGEUR HORIZONTAL HORIZONTAL EXCHANGER

Généralement, les appareils à pression élevée sont rigides. La tenue au séisme de l'équipement est

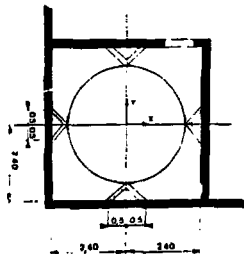


Fig. IX-1.15

déterminée par le comportement du supportage. Les figures XI-1.16 et IX-1.17 ci-dessous montrent la déformée du premier mode d'un échangeur horizontal, dû à la souplesse de la charpente de supportage.

Pour la tenue au séisme de ces appareils rigides, la conception de l'ancrage sur le génie civil est le point sensible.

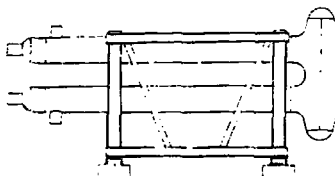


Fig. IX-1.16

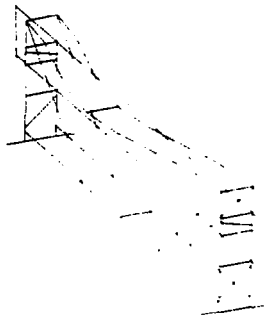


Fig. IX-1.17

1.6.4 ARMOIRES ÉLECTRIQUES ELECTRICAL CABINETS

La qualification sismique de ces équipements est généralement réalisée par des essais sur table vibrante. Néanmoins un calcul sismique par la méthode du spectre de réponse, d'un modèle aux éléments finis de la structure (fig. IX-1.18), est possible lorsque on ne veut pas retaire d'essais suite à des modifications mineures de la structure. La modélisation doit être qualifiée à partir des essais précédents. Les calculs des spectres de réponse aux différents niveaux des composants, par une méthode de transfert de spectre, permet une qualification par comparaison des résultats de calcul et d'essai.

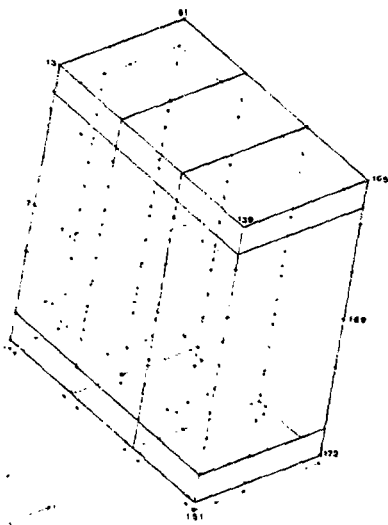


Fig. IX-1.18

1.6.5 APPAREILS DE MANUTENTION HANDLING APPARATUS

Les ponts roulants présentés sont des charpentes métalliques (fig. IX-1.19 à IX-1.21) au comportement dynamique complexe, souvent non linéaire du fait des jeux nécessaires pour assurer le fonctionnement normal. Néanmoins, le comportement sismique peut être calculé simplement en prenant des hypothèses d'appui adéquates au niveau des galets porteurs, des griffes antideraînement et des galets de guidage.

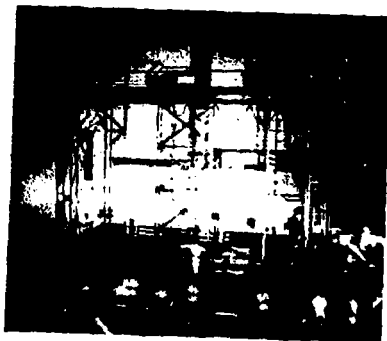


Fig. IX-1.19. (photo M. BUSTANOBY-FRAMATOME).

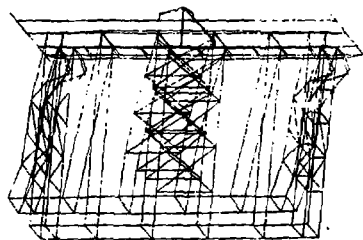


Fig. IX-1.20. Modélisation d'un appareil de manutention
Modélisation of handling apparatus.

L'analyse sismique est alors effectuée par la méthode du spectre de réponse. Toutes les barres de la structure sont modélisées par des éléments de poutre spatiale (fig. IX-1.20, IX-1.22, IX-1.23). On obtient un grand nombre de modes de fréquences comprises entre 1 et 33 Hz.

Les éléments de la structure trop sollicités sont généralement renforcés. Pour diminuer les sollicitations sur les éléments souples, il peut être préférable de diminuer les fréquences situées à gauche du pic du spectre. Pour les appareils présentés, cet effet est obtenu en réalisant des articulations : pied du portique de la machine de chargement, attache des supports de la passerelle sous le pont.

1.6.6 RATELIER DE STOCKAGE

Cette structure alvéolaire, servant au stockage des assemblages de combustible est constituée par un ensemble de boîtiers, reliés pour former des modules (fig. IX-1.24). Divers types de liaisons au génie civil existent : le mode de calcul adopté en dépend.



Fig. IX-1.21. Pont roulant (photo M. BUSTANOBY-FRAMATOME).
Traveling crane.

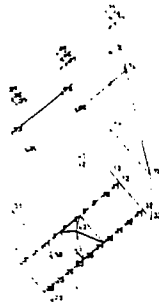


Fig. IX-1.22. Modélisation.
Modelling.



Fig. IX-1.23. 1^{er} mode propre.
1st eigen mode.

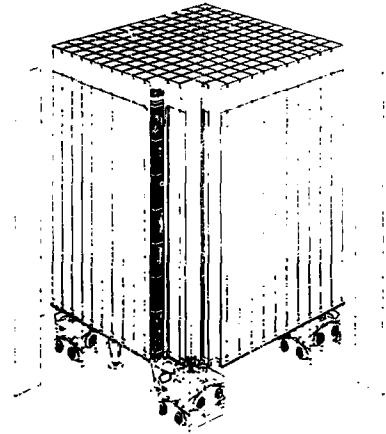


Fig. IX-1.24. Ratelier de stockage.
Fuel assembly storage device.

Lorsque les extrémités des alvéoles sont reliées par des plaques tenues sur le génie civil, le calcul au séisme horizontal se ramène à celui d'une alvéole si on fait l'hypothèse conservatrice que toutes les alvéoles vibrent en phase.

L'assemblage combustible contenu est aussi modélisé par une poutre pouvant impacter l'alvéole aux niveaux des grilles. Ses caractéristiques dynamiques sont recalées sur les résultats d'essai. L'eau est modélisée par des masses ajoutées.

Pour des niveaux de séisme élevés, d'autres configurations de supportage réduisent notablement les efforts induits par le séisme horizontal. Par exemple, les alvéoles sont relevées pour former des modules posés sur des dispositifs filtrant les accélérations sismiques. Le modèle de calcul doit représenter correctement le module pour étudier les mouvements de rotation, basculement et lacet.