



Eric MELMOUX

Ingénieur diplômé en 1981 de l'INSA de LYON option génie mécanique, il obtient la même année un DEA "vibrations".

Après 10 années passées dans une société spécialisée dans les études de bruits et de vibrations, il rejoint Merlin Gerin.

Il est aujourd'hui responsable du pôle de compétence "chocs et vibrations" de Schneider Electric.

n° 180

**secousses
sismiques et
équipements
électriques**

lexique

Accélérogramme	enregistrement de l'accélération du sol pendant le séisme
Appropriation fréquentielle	la fréquence de l'excitation correspond à une fréquence de résonance de la structure élastique
Appropriation spatiale	les forces d'excitations s'appliquent sur les ventres de la déformée modale
Déformée modale	déformation oscillante que prend une structure élastique lorsqu'on l'excite sur une de ses fréquences de résonance
Epicentre	point situé à la surface du sol, à la verticale de l'hypocentre
Hypocentre ou foyer	position du séisme dans l'écorce terrestre
Intensité	mesure la force d'un séisme par les effets qu'il produit (échelle de MERCALLI)
Magnitude	mesure la force d'un séisme à partir de l'énergie libérée au foyer (échelle de RICHTER)
Maillage	action qui consiste à décomposer une structure complexe en éléments simples (poutres - plaques - volumes)
Ondes de RAYLEIGH	correspondent à la composante verticale des ondes de surface
Ondes de LOVE	correspondent à la composante horizontale des ondes de surface
Partie forte d'un spectre de réponse	correspond aux fréquences pour lesquelles la structure amplifie les mouvements du sol
Partie APN	correspond, sur un spectre de réponse, aux fréquences pour lesquelles la structure suit les accélérations du sol
Qualification	action qui consiste à démontrer la bonne tenue d'un équipement à des contraintes spécifiées ou normées
Séisme	mouvement brutal des plaques tectoniques qui génère un tremblement de terre
SMHV	Séisme Maximum Historique Vraisemblable pour un site
SMS	Séisme Majoré de Sécurité (SMHV majoré d'un degré de l'échelle MERCALLI)
Spectre de réponse	outil qui permet de caractériser un séisme par ses effets sur une structure simple
Système mécanique du 1^{er} ordre	structure simple à un degré de liberté caractérisée par une masse, une élasticité et un amortissement

secousses sismiques et équipements électriques

sommaire

1. Secousses sismiques	Causes - localisation	p. 4
	Propagation des ondes sismiques	p. 4
	Nature des vibrations générées à la surface du sol	p. 5
	Intensité et magnitude	p. 5
	Caractérisations d'un séisme	p. 6
	Définition de la sévérité sismique d'un site	p. 8
	Lecture du spectre de réponse applicable à un équipement	p. 9
2. Comportement dynamique des structures	Rappels sur l'oscillateur du premier ordre	p. 12
	Structures élastiques (à N degrés de liberté)	p. 12
3. Conception des équipements	Définition des objectifs	p. 16
	Principes de conception	p. 16
	La simulation par calcul au stade de la conception	p. 18
4. Qualification par simulation ou essai	Introduction	p. 20
	Qualification mixte (modélisation et recalage expérimental)	p. 20
	Qualification par essais "vraie grandeur" précédés par la modélisation	p. 21
	Qualification par essais	p. 22
5. Conclusion		p. 25
6. Bibliographie		p. 26

Dans tous les pays, il existe soit une zone d'activité sismique significative, soit des installations qui requièrent une haute sécurité de fonctionnement (par exemple les centrales nucléaires, avec généralement une activité sismique faible). Dans les deux cas les équipements électriques et de contrôle commande doivent assumer pleinement leurs fonctions de sécurité.

Ce Cahier Technique a pour but de permettre aux donneurs d'ordre de dialoguer avec les spécialistes.

Après un rappel sur le phénomène secousses sismiques et la façon de les spécifier, l'auteur présente l'approche théorique nécessaire à la prise en compte de la tenue sismique des équipements dès le stade de la conception.

La conception ainsi que la qualification font aujourd'hui de plus en plus appel à la modélisation et donc aux moyens de calcul puissants de l'informatique scientifique et technique.

1. les secousses sismiques

causes - localisation

La plupart des tremblements de terre se produisent au niveau des failles qui délimitent les plaques tectoniques de l'écorce terrestre. Des tensions apparaissent lorsque ces plaques se déplacent mutuellement de manière lente. La libération soudaine de l'énergie de déformation ainsi accumulée dans la croûte terrestre, ou dans la couche sous-jacente appelée manteau, provoque un ébranlement local dont une partie de l'énergie se transforme en ondes sismiques à la surface de la terre.

La création d'une faille ou, plus fréquemment, le glissement le long d'une faille existante, constituent le mécanisme générateur d'un séisme. L'endroit où se produit le séisme est appelé **foyer** ou **hypocentre** et la projection de ce point sur le sol est appelé **épicentre** (cf. fig. 1). L'hypocentre peut se situer à une profondeur très variable : quelques kilomètres à plus de 100 km.

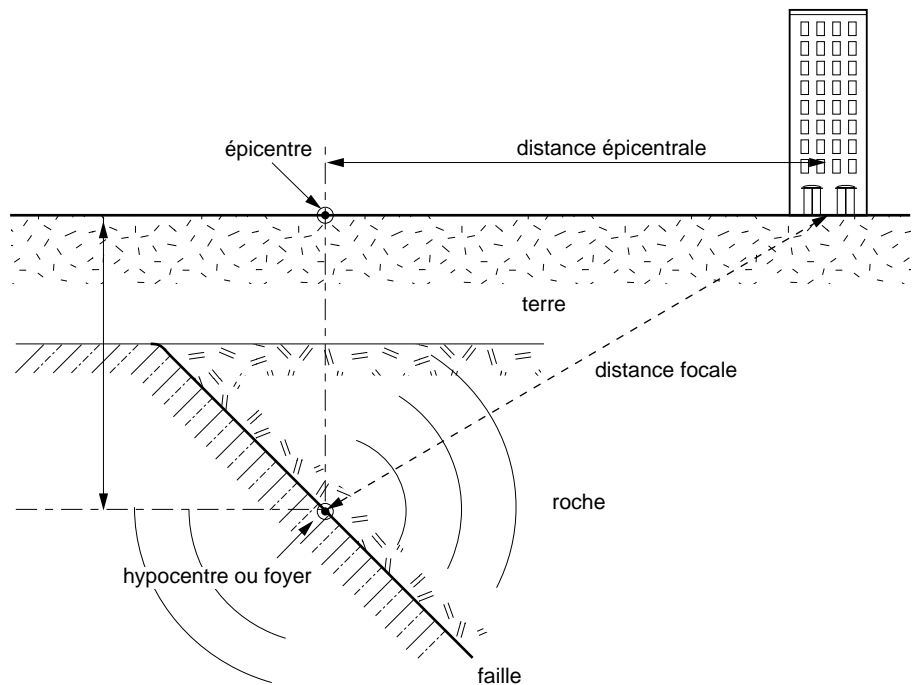


fig. 1 : vocabulaire et éléments caractéristiques en géosismique.

propagation des ondes sismiques

A partir du foyer la secousse sismique se propage sous forme d'ondes qui, compte tenu de l'hétérogénéité du sol, engendrent en surface un mouvement vibratoire complexe difficilement prévisible en un site donné.

On distingue deux types d'onde : les ondes de volume et les ondes de surface.

Les ondes de volume

Elles prennent naissance au foyer et se propagent à l'intérieur du manteau terrestre sous deux formes :

- les ondes longitudinales se caractérisant par des compressions et dilatations alternées se propageant à une vitesse de 7 à 8 km/s ;
- les ondes transversales se caractérisant par une distorsion dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation, provoquant du cisaillement et se propageant à une vitesse de 4 à 5 km/s (cf. fig. 2).

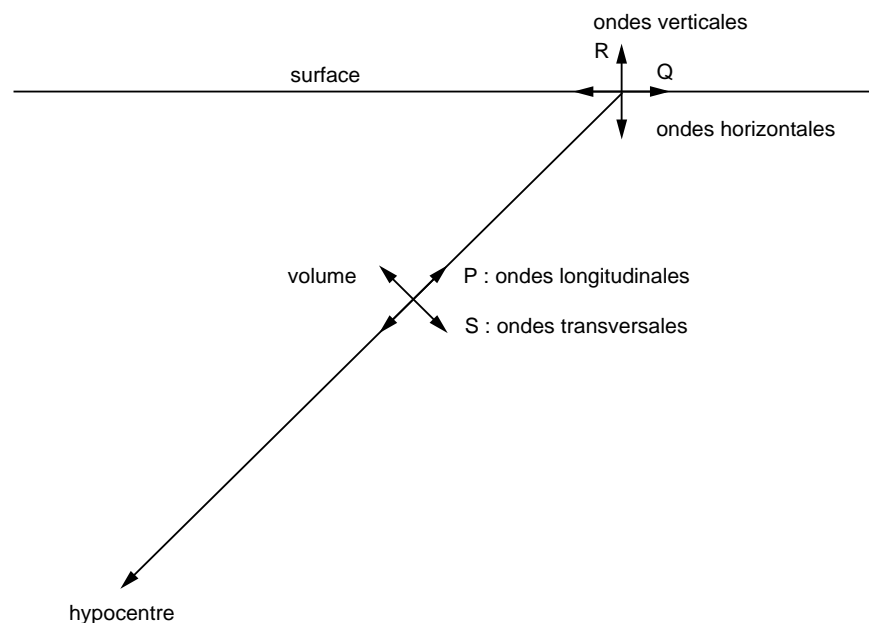


fig. 2 : les ondes sismiques de volume et de surface.

Nota :

C'est la différence de vitesse de propagation des ondes longitudinales et transversales qui permet, à l'aide de l'enregistrement de plusieurs sismographes, de situer le foyer d'un séisme.

Les ondes de surface

Elles sont générées par les ondes de volume qui arrivent à la surface et se propagent à la vitesse de 1,5 à 5 km/s.

On distingue :

■ les ondes de RAYLEIGH pour lesquelles les points du sol décrivent des ellipses dans le plan vertical ; elles entraînent des compressions et des cisaillements dans le sol ;

■ les ondes de LOVE pour lesquelles les points du sol se déplacent tangentiellement à la surface, perpendiculairement à la direction de propagation ; elles n'entraînent que des contraintes de cisaillement (cf. fig. 2).

nature des vibrations générées à la surface du sol

Dans la réalité, les choses sont encore plus complexes ; en effet, la propagation d'une onde sismique dans un milieu hétérogène provoque, pour chaque discontinuité, un système complexe d'ondes réfractées et réfléchies, si bien qu'au niveau du sol le mouvement sismique a un aspect tout à fait aléatoire.

Cependant les mouvements vibratoires, occasionnés à la surface du sol par les séismes, présentent des caractéristiques communes et un certain nombre de paramètres sont habituellement utilisés pour les décrire.

Caractéristiques des vibrations aléatoires induites à la surface du sol par un séisme :

■ direction

Le mouvement présente simultanément des composantes verticales et horizontales qui sont indépendantes ;

■ durée

Elle est généralement comprise entre 15 et 30 s. (pour un séisme intense elle peut être de 60 à 120 s) ;

■ fréquence

Le mouvement aléatoire à bande large présente une énergie prépondérante entre 1 et 35 Hz, et provoque les effets les plus destructifs entre 1 et 10 Hz ;

■ niveau d'accélération

Il n'y a pas de corrélation entre les ondes observées dans les deux directions : à un instant donné il y a indépendance des amplitudes et des fréquences.

L'accélération du sol observée pour la direction horizontale est généralement inférieure à 0,5 g (exceptionnellement supérieure à 1 g, soit 10 m/s²).

L'accélération dans la direction verticale a une amplitude plus faible. L'observation montre que le rapport entre les amplitudes maximales verticales et horizontales est de l'ordre de $\frac{2}{3}$ (pour les fréquences supérieures à 3,5 Hz).

intensité et magnitude

Intensité

Il est habituel de désigner l'importance d'un séisme par la valeur de son intensité au lieu d'observation. Cette estimation subjective est établie à partir des manifestations ressenties par la population et des dégâts occasionnés.

Différentes échelles d'intensité ont été définies qui classent les effets sismiques suivant leur importance croissante et à l'aide de descriptions conventionnelles :

■ l'échelle de **MERCALLI** décrit les effets communément observés des tremblements de terre sur l'environnement, les constructions, l'homme ;

■ l'échelle **MSK** (ou **MERCALLI** modifiée), plus précise que la précédente, prend en compte pour l'évaluation des dégâts, le type de construction et le pourcentage des bâtiments affectés.

Ces estimations sont utiles pour évaluer l'importance des tremblements de terre lorsque des accélérogrammes ou spectres ne sont pas disponibles. Elles ne permettent

pas de spécifier la contrainte sismique d'un site.

Magnitude

Une autre façon de désigner l'importance d'un séisme est d'exprimer sa **magnitude**. Il s'agit d'une caractéristique intrinsèque de la secousse sismique qui donne une mesure de l'énergie totale libérée. La magnitude, définie en 1935 par **RICHTER**, et l'échelle qui en résulte sont actuellement utilisées de façon universelle.

La magnitude est déterminée en pratique d'après les enregistrements des mouvements du sol effectués en un certain nombre de points d'observation situés à des distances quelconques de l'épicentre.

A partir de ces observations les sismologues calculent l'énergie E (exprimée en ergs) du séisme et en déduisent la magnitude M.

La relation empirique simplifiée : $\log E = 9,9 + 1,9 M + 0,024 M^2$ permet un calcul approché, mais rapide.

Correspondance intensité/ accélération maximale du sol/zone sismique

A titre indicatif le tableau de la figure 3 (voir page suivante) établit une correspondance entre les différents niveaux subjectifs d'intensité de l'échelle de **MERCALLI** modifiée et le niveau d'accélération maximum du sol à l'origine des dégâts observés.

Ce tableau indique également le type de zone d'activité sismique concernée par l'éventualité d'une telle intensité de séisme (cf. fig. 4, page 7 pour le découpage des zones d'activité sismique dans le monde).

Correspondance intensité/ magnitude

Il ne peut exister théoriquement de relation entre intensité et magnitude ; en effet l'intensité dépend de la distance du lieu considéré au foyer du séisme, de la nature du sol, du type de fondations utilisées, du type de construction et de la durée du séisme. Cependant une correspondance approximative est proposée par les experts (cf. tableau de la figure 5, page 7).

intensité	échelle de Mercalli modifiée	valeurs approximatives des accélérations horizontales en m/s ²	zone sismique
1	Secousse non ressentie.		zone 0
2	Secousse ressentie par des personnes au repos ou dans les étages supérieurs.		
3	Balancement des objets suspendus. Légères vibrations		
4	Vibrations ressenties comme celles provoquées par le passage de camions lourds. Tremblement des vitres et de la vaisselle. Balancement des voitures à l'arrêt.	2	
5	Secousse ressentie à l'extérieur des bâtiments. Réveil des dormeurs. Chute de petits objets. Déplacement des tableaux.		zone 1
6	Secousse ressentie par tout le monde. Meubles déplacés. Dégâts : bris de verre, chute de marchandises des étagères, fentes dans les enduits.		
7	Secousse ressentie dans les automobiles en mouvement. Perte d'équilibre pour une personne debout, les cloches des églises sonnent. Dégâts : bris de cheminée et d'ornements architecturaux, chute de plâtre, bris de meubles, fissures étendues dans les enduits et les maçonneries, quelques effondrements de maisons en brique crue.		zone 2
8	Difficultés de conduite pour les véhicules en mouvement. Branches d'arbre brisées. Crevasses dans les sols détrempés. Destructions : châteaux d'eau, monuments, maisons en brique crue. Dégâts bénins à importants : constructions en brique, maisons démontables, ouvrages d'irrigation, digues.	3	
9	"Cratères de sable" dans les sols sablonneux et détrempés en ville. Glissement de terrain. Fissuration du sol. Destructions : maçonneries non renforcées en brique. Dégâts bénins ou importants : structures en béton insuffisamment armé, tuyauteries enterrées.		zones 3 et 4
10	Glissement de terrain et destruction du sol importante. Destructions : ponts, tunnels, quelques structures en béton armé. Dégâts de bénins à importants : la plupart des immeubles, barrages, voies de chemin de fer.	5	
11	Déformation permanente du sol.		
12	Destruction presque totale.		

Les zones sismiques correspondent à l'occurrence attendue d'un niveau d'intensité d'après des observations effectuées sur une période de 200 ans.

fig. 3 : échelle de MERCALLI.

caractérisations d'un séisme

L'intensité, la magnitude ou les accélérations maximales du sol, ne sont pas suffisantes pour estimer les risques pour un bâtiment ou un équipement. En effet, l'estimation de la réponse d'une structure nécessite une connaissance plus précise du mouvement du sol en ce qui concerne la durée et le contenu fréquentiel.

Deux méthodes permettent de caractériser le mouvement du sol :

- l'accélérogramme : $\gamma = f(t)$;

■ le spectre de réponse qui caractérise les **effets** que produit le séisme sur une structure élémentaire (système mécanique linéaire du 1^{er} ordre).

L'accélérogramme

C'est l'évolution en fonction du temps de l'accélération du sol (cf. fig. 6). Ce type d'information, donné par les sismographes selon les 3 directions de l'espace, convient pour estimer le risque sismique encouru par un équipement, lorsqu'il s'agit d'en prouver la tenue par essais ou par calcul. L'accélérogramme est la seule information utilisable dans le cas où

l'on s'intéresse à la chronologie de la réponse d'une structure à l'excitation sismique. Ceci est le cas lorsque l'on doit connaître l'évolution du déplacement relatif de différents constituants d'un équipement au cours du temps.

Cependant il est rarement donné dans les cahiers des charges, car non disponible ou parce qu'il se prête mal aux calculs de la sévérité sismique d'un site.

Le spectre de réponse

Le spectre de réponse permet de caractériser un séisme par l'effet qu'il



fig. 4 : zones d'activités sismiques dans le monde.

Mercalli (intensité)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - 11 - 12
Richter (magnitude)	0-2	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	5-7	5-8	7-9	> 8

Les correspondances entre l'échelle de Mercalli et celle de Richter sont tout à fait indicatives car elles sont fonction de la nature du sol, de l'éloignement du foyer (de 5 à 100 km) ainsi que de la durée du séisme.

fig. 5 : correspondance "indicative" entre les échelles de Mercalli et de Richter.

produit sur un équipement. Pour cela, on calcule l'effet de l'accélérogramme (de l'onde sismique) sur un équipement normalisé, c'est-à-dire un système mécanique, linéaire du premier ordre ; ceci pour différentes valeurs de la fréquence de résonance et de l'amortissement.

Un système du premier ordre se caractérise par : une masse M , une élasticité K et un amortissement λ , sa fréquence de résonance est :

$$Fr = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{M}}$$

La réponse maximale de ce système à l'onde sismique (accélération maximale prise par la masse)

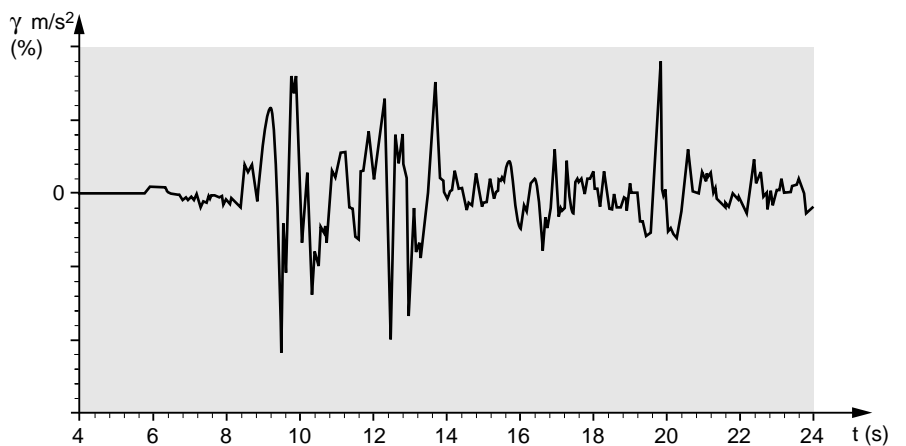


fig. 6 : exemple d'accélérogramme $\gamma = f(t)$ enregistré en Californie le 18 mai 1940 (plan horizontal - axe Nord/Sud)

donne un point du spectre de réponse (cf. fig. 7). En faisant varier la fréquence de résonance (K/M), la courbe obtenue :

$\gamma_{max} = f(Fr)$ (cf. fig. 8), est le spectre de réponse caractérisant la sévérité de l'onde sismique pour un amortissement donné.

La figure 9 présente le réseau de courbes obtenu lorsque l'on fait varier l'amortissement.

Généralement le spectre de réponse est donné dans les cahiers des charges pour application dans les directions horizontales. Le spectre de réponse vertical est déduit par application d'un coefficient.

Le spectre de réponse est aujourd'hui l'outil le plus répandu pour spécifier la sévérité sismique d'un site, car par sa nature même il permet aisément :

- de comparer des sévérités ;
- d'élaborer des sévérités enveloppes de plusieurs sites ;
- de majorer aisément une sévérité ;
- d'estimer, en première approche, les effets d'un séisme sur un équipement (potentiel de dommage).

Nota :

Le spectre de réponse ne doit surtout pas être confondu avec la décomposition en séries de FOURIER d'un phénomène périodique, ou avec la transformée de FOURIER d'un phénomène apériodique qui ne sont pas utilisées dans le cadre des études sismiques.

définition de la sévérité sismique d'un site

- Séisme Maximum Historique Vraisemblable (SMHV) - Séisme Majoré de Sécurité (SMS)**

La définition de la sévérité sismique d'un site fait généralement appel aux données géologiques et sismiques historiques de ce site.

Par exemple en France les données de la sismicité historique (100 ans), exceptionnellement bien documentées, permettent d'établir le risque sismique d'un site.

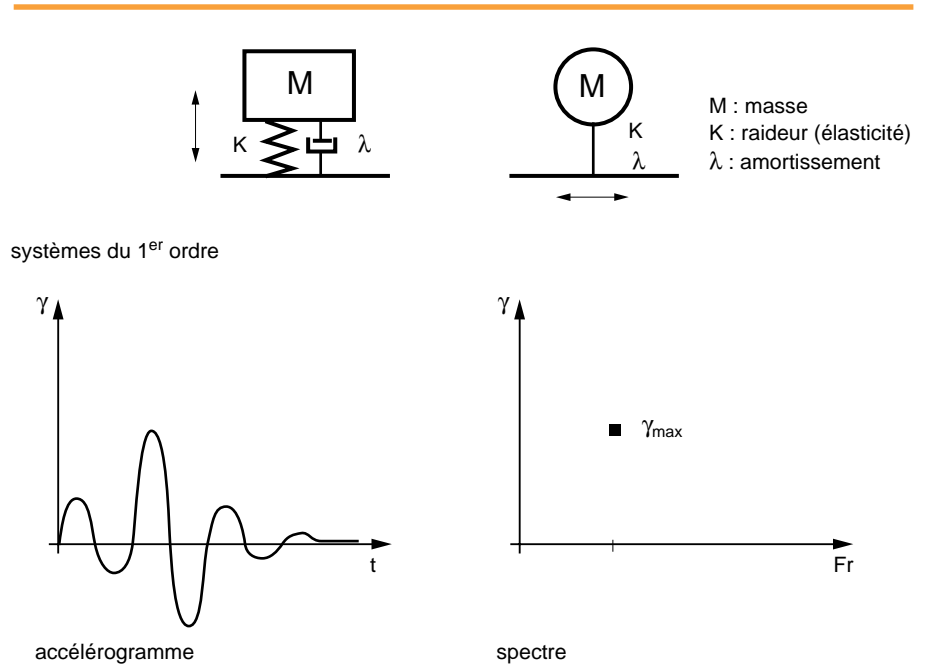


fig. 7 : l'application de l'excitation sismique (accélérogramme, cf. fig. 6), à un système du premier ordre, lui confère des accélérations. La valeur max (γ_{max}) est par définition un point du spectre de réponse... du système au séisme.

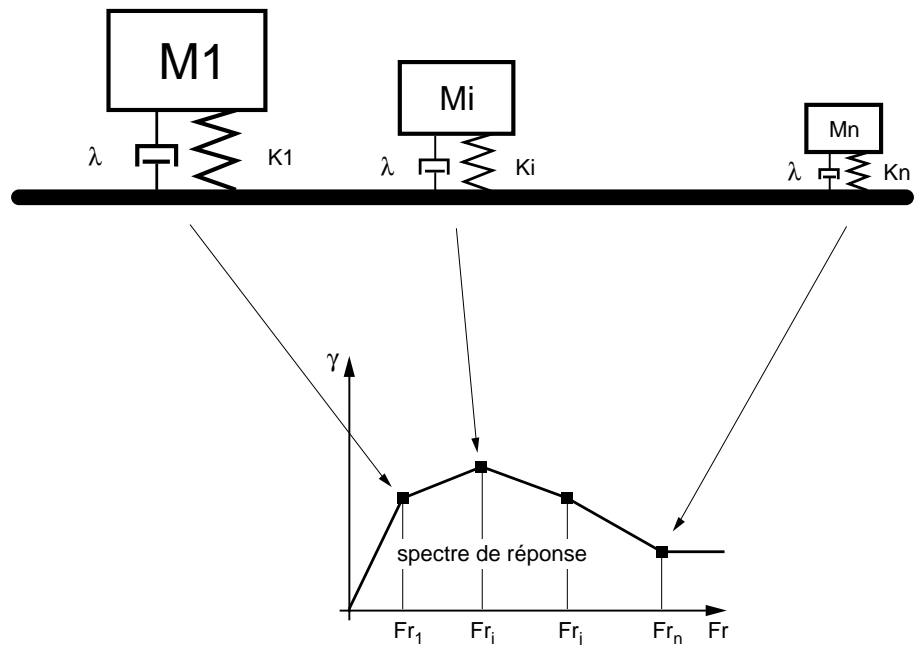


fig. 8 : construction du spectre de réponse au séisme (divers K/M avec λ constant).

Celui-ci permet de définir le Séisme Maximum Historique Vraisemblable -SMHV- susceptible de produire un effet maximal sur un site donné. Pour le dimensionnement des ouvrages ou équipements c'est le Séisme Majoré de Sécurité -SMS- qui est retenu : il correspond à l'intensité du SMHV majorée d'un degré sur l'échelle MSK (Mercalli modifiée).

Spectre de réponse fondamental

Les données macrosismiques correspondant aux définitions ci-dessus ne sont pas suffisantes pour l'ingénieur qui doit concevoir un bâtiment ou un équipement. Il est nécessaire de disposer en plus du spectre de réponse représentatif du site considéré ; celui-ci est établi à l'aide des données de la sismicité instrumentale.

Une sismothèque a été constituée (relevés effectués dans les régions à activité sismique significative) correspondant à une gamme de magnitudes, de profondeurs de foyer, et de distances épacentrales pour des contextes géologiques très divers. Elle permet d'établir la forme du spectre de réponse, dit fondamental, pour une région donnée, son amplitude est fonction du SMS retenu.

Ce spectre de réponse définit la sévérité du séisme au niveau du sol, il reste à l'évaluer à l'étage où va être installé l'équipement.

Spectre de dimensionnement

Les spécifications en matière de tenue sismique se présentent couramment sous la forme d'un réseau de spectres de réponse correspondant aux divers étages du bâtiment. Ceux-ci sont calculés en prenant en compte l'impédance de transfert du bâtiment. Un exemple est donné dans la figure 10.

lecture du spectre de réponse applicable à un équipement

L'intérêt du spectre de réponse est de donner l'image des effets extrêmes en accélération (ou en déplacement) de l'excitation sur un système élastique du 1^{er} ordre.

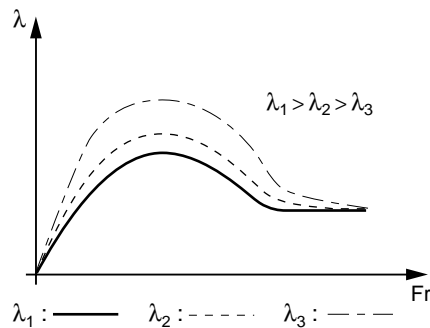


fig. 9 : réseau de spectres de réponse obtenu pour différents amortissements, pour un même séisme.

Conversion accélération / vitesse / déplacement

Les spectres de réponse sont souvent représentés dans le système d'axes accélération/fréquence mais ils sont quelquefois représentés dans le système d'axe vitesse/fréquence. Pour de faibles amortissements de l'équipement étudié ($\leq 10\%$) les spectres de réponse en vitesse et en déplacement relatif peuvent être déduits des spectres d'accélération en appliquant pour chaque fréquence les relations suivantes :

$$V_{\max} = \frac{\gamma_{\max}}{2\pi f} ; D_{\max} = \frac{\gamma_{\max}}{(2\pi f)^2}$$

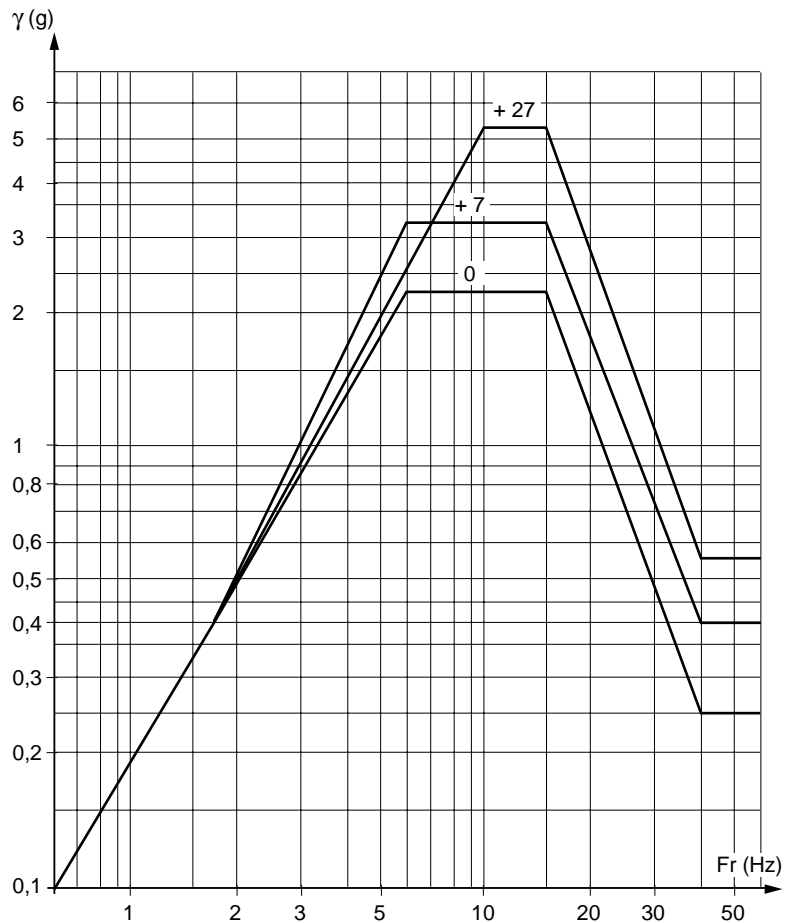


fig. 10 : spectre de dimensionnement, en fonction des niveaux de planchers (en mètres) pour un site industriel. Ce spectre est donné pour un amortissement de 2 %.

En effet tout se passe comme si l'on avait des grandeurs sinusoïdales, avec

$$V = \int \gamma(t) dt \quad \text{et} \quad d = \iint \gamma(t) dt$$

En coordonnées log/log le spectre de réponse peut être lu selon les axes accélération, vitesse ou déplacement, (cf. fig. 11).

Accélération et déplacement maximum du plancher

Vu que l'énergie de l'excitation sismique est limitée en fréquence à 35 Hz, les points du spectre situés au delà de cette fréquence représentent le comportement d'un oscillateur "rigide" (K/M très élevé), indéformable vis-à-vis de l'excitation sismique.

Le déplacement relatif de la masse par rapport au support est alors nul et son accélération est égale à celle du support (cf. fig. 12 a).

L'asymptote que prend le spectre de réponse pour les hautes fréquences ($Fr \geq 35$ Hz) correspond donc à l'accélération maximale du plancher (cf. partie droite de la figure 13).

Nota :

Les spécialistes, pour la partie droite du spectre (qui correspond à une fréquence relative "infinie"), utilisent pour désigner le niveau d'accélération le sigle APN (Accélération de Période Nulle).

De même, les fréquences les plus basses du spectre représentent le comportement d'un oscillateur "infiniment souple" vis-à-vis de l'excitation sismique. Le déplacement relatif d'un tel oscillateur est alors égal au déplacement du support (cf. figure 12 b).

En basse fréquence ($Fr < 1$ Hz), l'asymptote que prend le spectre de réponse, lorsqu'il est représenté dans des échelles log/log, correspond à la zone de déplacement maximum du sol (cf. partie gauche de la figure 13).

Accélération et déplacement maximum pris par l'oscillateur

Entre 1 et 35 Hz (partie centrale de la figure 13) les accélérations et déplacements de l'oscillateur sont généralement plus élevés que celles du plancher.

L'accélération et le déplacement maximum, ainsi que les fréquences de résonance correspondantes sont lus directement sur le spectre (cf. fig. 13 - lecture selon les axes γ et d).

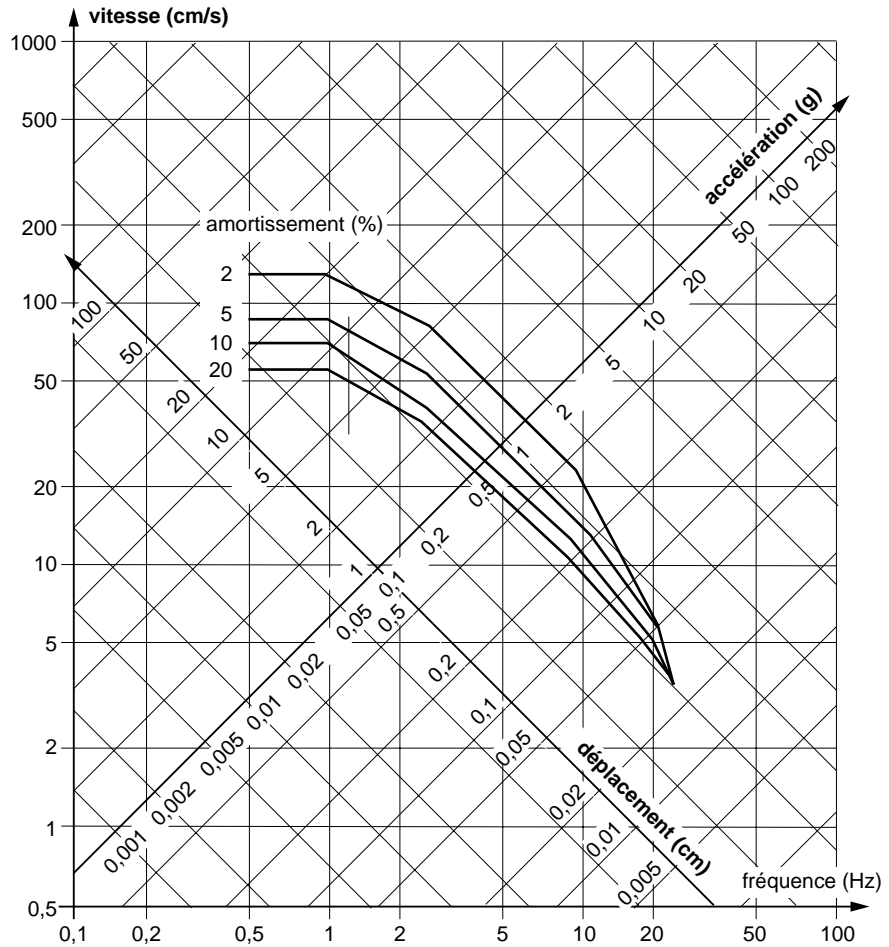
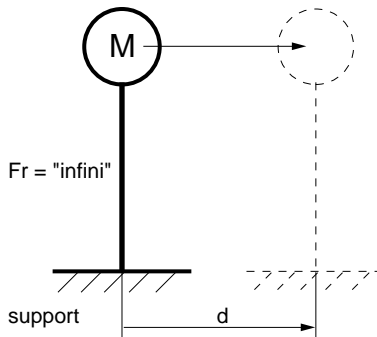


fig. 11 : exemple de spectre de réponse pouvant être lu selon les axes : accélération, vitesse, déplacement.

a) si K/M "très grand", le "système" ne se déforme pas (la masse suit le mouvement du sol)
 $\gamma = \gamma_{sol}$



b) si K/M "très petit" le "système" se déforme (la masse reste immobile)
 $\gamma = 0$

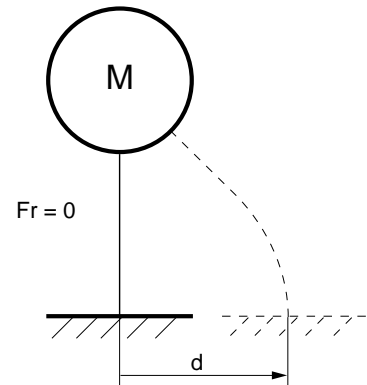


fig. 12 : réponse d'un système de premier ordre pour les valeurs limites de sa fréquence de résonance.

En l'absence de connaissance des caractéristiques dynamiques d'un équipement, il peut être considéré comme constitué d'un certain nombre d'oscillateurs du 1^{er} ordre. Des valeurs majorantes de déplacement maximum et de l'accélération maximale qu'il subira au cours du séisme peuvent être déduits du spectre de réponse.

Choix de l'amortissement pour l'équipement

Le facteur d'amortissement pris en compte dans le calcul du spectre de réponse est sensé représenter l'amortissement global de l'équipement considéré.

Dans le cas où celui-ci est composé de constituants ayant des amortissements différents, il est courant de retenir le plus petit amortissement pour le choix du spectre de réponse ; ceci conduit à une majoration des contraintes.

Le tableau de la figure 14 donne, à titre indicatif, les valeurs communément admises en fonction du pourcentage de la contrainte limite des matériaux.

La spécification sismique étant généralement exprimée par une famille de spectre de réponse correspondant à des amortissements distincts (2 %, 5 %, 10 %, etc.) ; le concepteur de l'équipement peut procéder à une interpolation.

De l'intérêt du spectre de réponse

Pour un concepteur d'équipements, les renseignements fournis par l'examen du spectre de réponse sont bien plus utiles que ceux fournis par

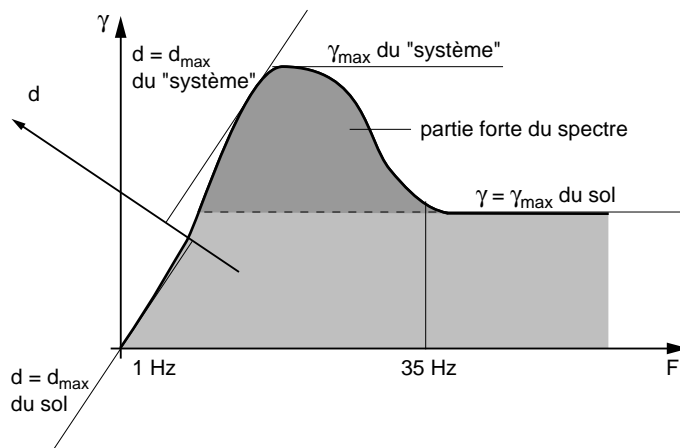


fig. 13 : lecture d'un spectre de réponse (en échelle log/log, il est possible de lire les grandeurs qui caractérisent accélération et déplacement.)

type de structure	amortissement en %	
	pour 50 % de l'amplitude limite	pour 100 % de l'amplitude limite
structures soudées en acier	2	4
structures boulonnées en acier	4	7
structure en béton armé	4	7
armoires	2	5
rack	2	5

fig. 14 : amortissements communément admis pour diverses structures selon l'amplitude de la contrainte (flexion ou traction/compression).

la représentation temporelle du séisme. En effet, si l'accélérogramme fournit l'accélération maximale du plancher, le spectre de réponse donne un maximum d'informations, notamment les valeurs extrêmes suivantes :

- l'accélération maximale du plancher ;
- le déplacement maximum du plancher ;
- l'accélération extrême que peut subir une partie de l'équipement ;
- le déplacement extrême que peut présenter une partie de l'équipement.

2. comportement dynamique des structures

L'étude du comportement dynamique des structures constitue aujourd'hui une étape indispensable dans la conception de tout équipement industriel. A ce stade, il convient de présenter les principaux concepts qui régissent la réponse d'une structure à une excitation sismique.

Pour plus de détails se reporter à la bibliographie.

rappels sur l'oscillateur du premier ordre

L'oscillateur du 1^{er} ordre (encore appelé système à 1 degré de liberté) constitue un des principes de base de l'analyse dynamique des structures. En effet, le comportement dynamique d'une structure élastique se ramène à celui d'un certain nombre d'oscillateurs simples.

De plus, il est fréquent que la prise en compte du premier mode de résonance d'une structure ou d'un équipement suffise pour son dimensionnement ; ceci revient alors à étudier un seul oscillateur simple équivalent (dont deux types sont représentés sur la figure 7).

L'oscillateur simple se caractérise par sa fréquence de résonance ou fréquence naturelle, et par son amortissement. La fréquence de résonance correspond au mouvement libre de l'oscillateur en l'absence de force extérieure. En d'autres termes, il s'agit de la fréquence du mouvement que prend l'oscillateur lorsqu'il est écarté de sa position de repos (essai de lâcher) ou à l'issue d'une impulsion. Lorsque l'oscillateur est "excité" à cette fréquence, il y a "résonance" c'est-à-dire qu'il y a amplification du mouvement. Cette amplification est inversement proportionnelle à l'amortissement de l'oscillateur.

Fréquence de résonance et amortissement suffisent au calcul de la

réponse de ce système à tout type d'excitation et en particulier à celle de l'excitation par déplacement d'appuis que constitue la secousse sismique.

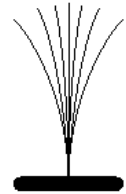
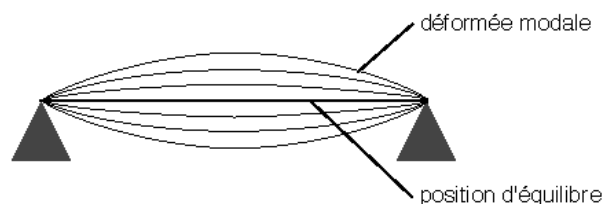
structures élastiques (à N degrés de liberté)

Fréquences de résonance et déformées modales

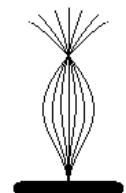
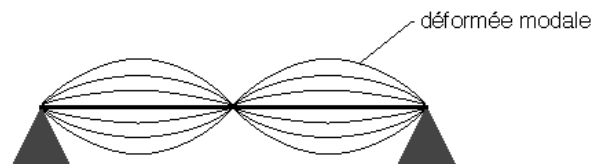
Dans le cas général, une structure élastique (par exemple une antenne fouet, une poutre), se caractérise par

une multitude de fréquences de résonance (nombre théoriquement infini) correspondant à des modes de résonance ou modes propres, (ces structures sont dites à N degrés de liberté), (cf. fig.15). Chacune de ces résonances est accompagnée d'une déformation spécifique de la structure appelée déformée modale. Pour chaque fréquence de résonance, la structure se déforme et oscille de part et d'autre de sa position d'équilibre (les points de la structure évoluent en phase ou en opposition de phase

mode n° 1



mode n° 2



mode n° 3

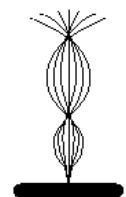
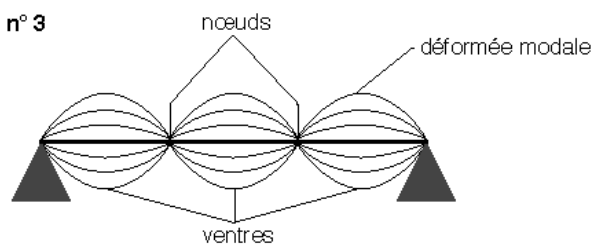


fig. 15 : base Modale : premiers modes de résonance de deux structures simples.

faisant apparaître nœuds et ventres de déformée).

Plus l'ordre du mode est élevé, plus la déformée modale correspondante devient complexe avec un nombre croissant de nœuds et de ventres.

Le comportement dynamique des structures, constitué de N structures élémentaires à 1 degré de liberté, (cf. fig. 16), est habituellement abordé en effectuant ce que l'on appelle l'analyse modale de la structure, ce qui revient à rechercher les fréquences de résonance et déformées modales associées sur une bande de fréquence correspondant au séisme. Ainsi est élaborée une base de travail constituée des N premiers modes de la structure, appelée base modale, dans laquelle le problème posé initialement va se réduire à l'étude et à la combinaison du comportement de **N systèmes du 1^{er} ordre** (cf. fig. 16 à droite).

Adaptation fréquentielle et spatiale

Le régime de résonance d'une structure élastique est obtenu à deux conditions :

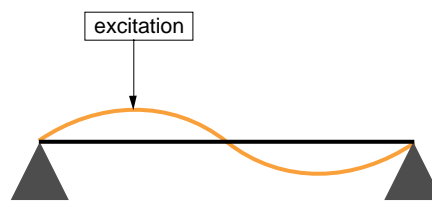
- que la fréquence d'excitation coïncide avec une fréquence de résonance de la structure. Il s'agit de l'**appropriation fréquentielle** (condition suffisante dans le cas du système à 1 degré de liberté) ;

- que la direction de l'excitation ainsi que sa localisation soient cohérentes avec la déformée modale correspondante. Lorsqu'elle est ponctuelle, l'excitation ne doit pas agir sur un nœud de la structure, et elle est d'autant plus efficace qu'elle s'applique sur un ventre avec une direction parallèle au déplacement du ventre.

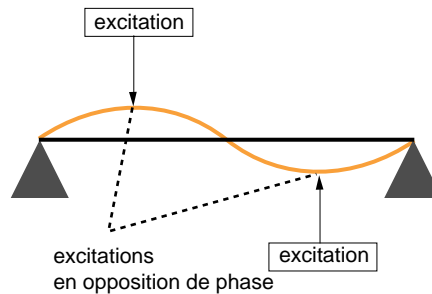
Dans le cas où les excitations sont multiples, celles-ci doivent de plus respecter les relations de phases de la déformée modale (cf. fig. 17).

Cette deuxième condition correspond à l'**appropriation spatiale**. Celle-ci est caractérisée par un coefficient appelé taux d'appropriation modale : t .

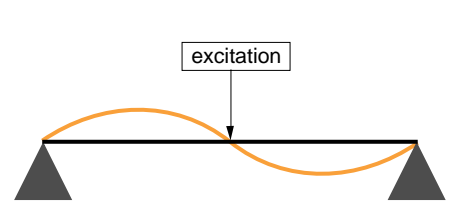
excitations "appropriées"



ou



excitations non "appropriées"



ou

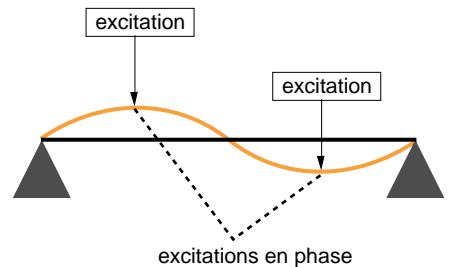
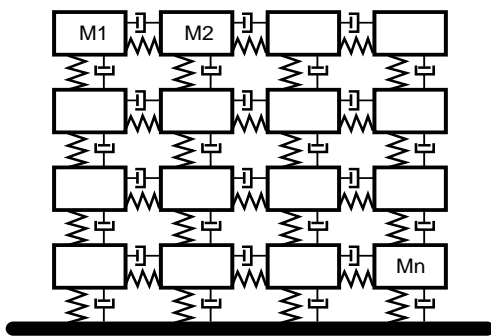


fig. 17 : exemples d'appropriation spatiale pour des excitations ponctuelles.

structure à N degrés de liberté



dans la base modale

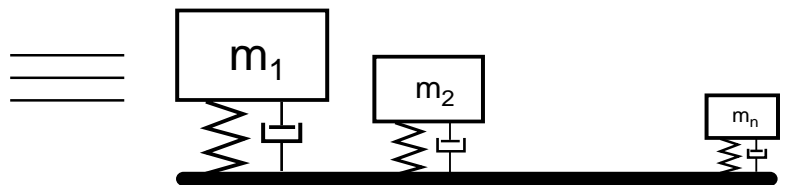


fig. 16 : une structure complexe à N degrés de liberté peut être transformée en une somme de N systèmes du premier ordre.

Réponse dans le cas d'une excitation par déplacement d'appuis

Lorsque une structure est soumise à une accélération du plancher $\gamma(t)$ (cas du séisme) tout ce passe comme si, le plancher étant supposé fixe, chaque élément de masse m_i de cette structure était soumis à un effort inertiel $F_i = -m_i \gamma(t)$.

Ces efforts F_i sont de par la relation précédente en phase ; ainsi apparaît toute l'importance de la notion d'appropriation spatiale dans la réponse de chaque mode de la structure. Cette particularité de l'excitation sismique a pour effet de favoriser la réponse des premiers modes. En effet ceux-ci présentent, **pour une direction donnée**, un minimum de nœuds de vibration, autrement dit tous les points de la structure se déplacent en phase et vérifient souvent l'appropriation spatiale (cf. fig. 18).

Du point de vue analytique, la réponse d'une structure s'écrit comme une combinaison linéaire des déformées D_i propres à chaque mode :

$$\vec{D} = \sum_{i=1}^n y_i(t) \cdot \vec{D}_i$$

lorsque l'on dispose des spectres de réponse et des déformées modales de la structure, les coefficients y_i sont obtenus par :

$$y_i = \gamma_i \cdot t_i$$

où γ_i = accélération du spectre pour F_i , et t_i = taux d'appropriation modal correspondant au mode D_i .

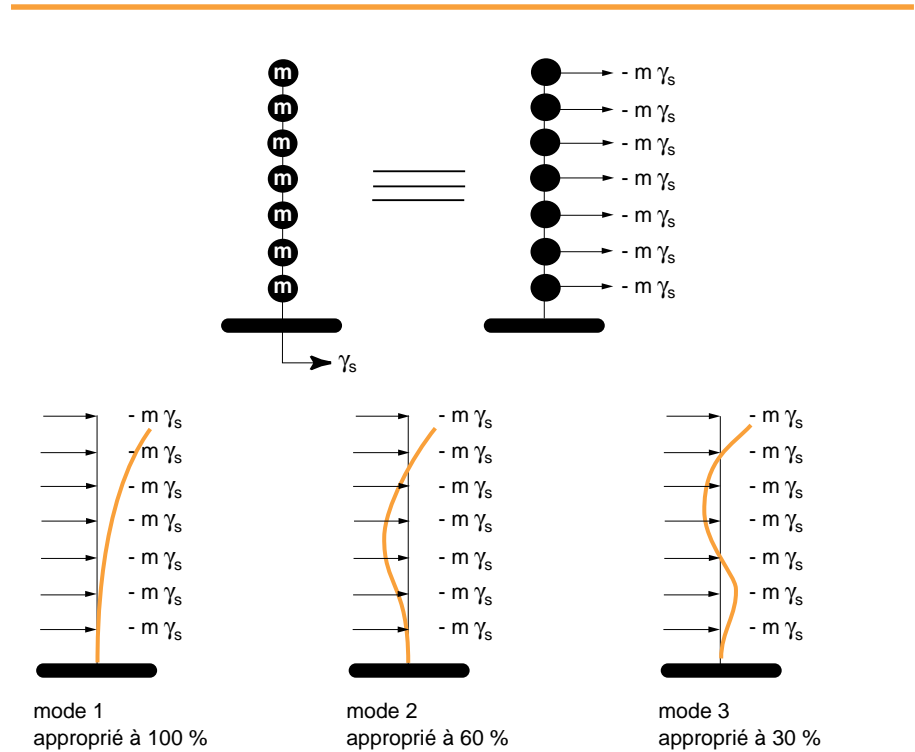
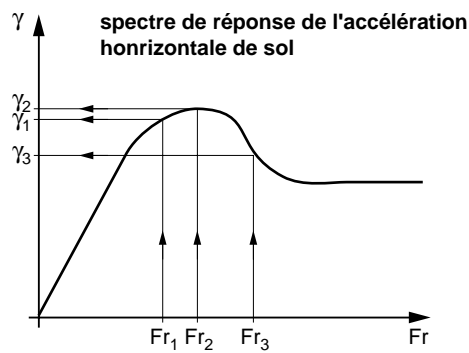
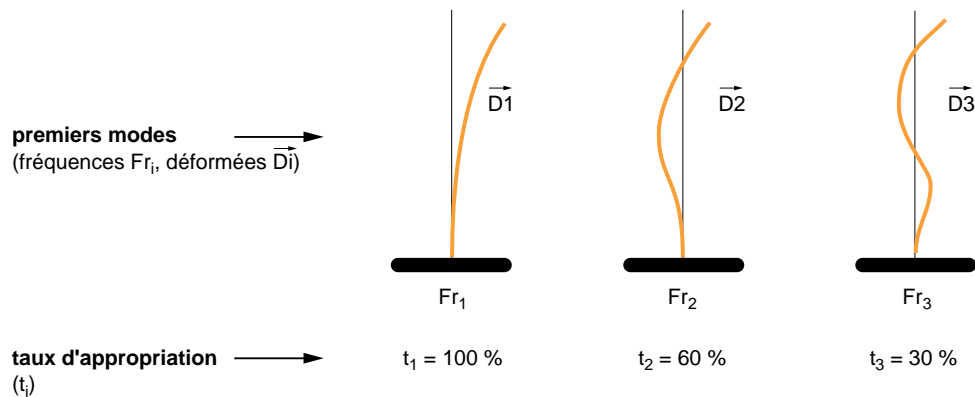


fig. 18 : équivalence entre déplacement d'appuis et efforts ponctuels. Exemple d'appropriation spatiale des 3 premiers modes d'une poutre.

La sommation des déformées D_i affectée des coefficients y_i donne alors le déplacement (ou accélération) maximum des différents points de la structure durant le séisme (cf. fig. 19).

Cependant le spectre de réponse ne donne pas les instants auxquels se produisent les maxima pour chaque

mode. La sommation arithmétique en valeur absolue conduit donc à une estimation pessimiste : elle n'est donc retenue que dans le cas où les modes présentent des fréquences voisines (10 %). Dans le cas contraire, une sommation quadratique est plus appropriée.



déformation totale de la structure : $\vec{D} = t_1 \cdot \gamma_1 \cdot \vec{D}_1 + t_2 \cdot \gamma_2 \cdot \vec{D}_2 + t_3 \cdot \gamma_3 \cdot \vec{D}_3$

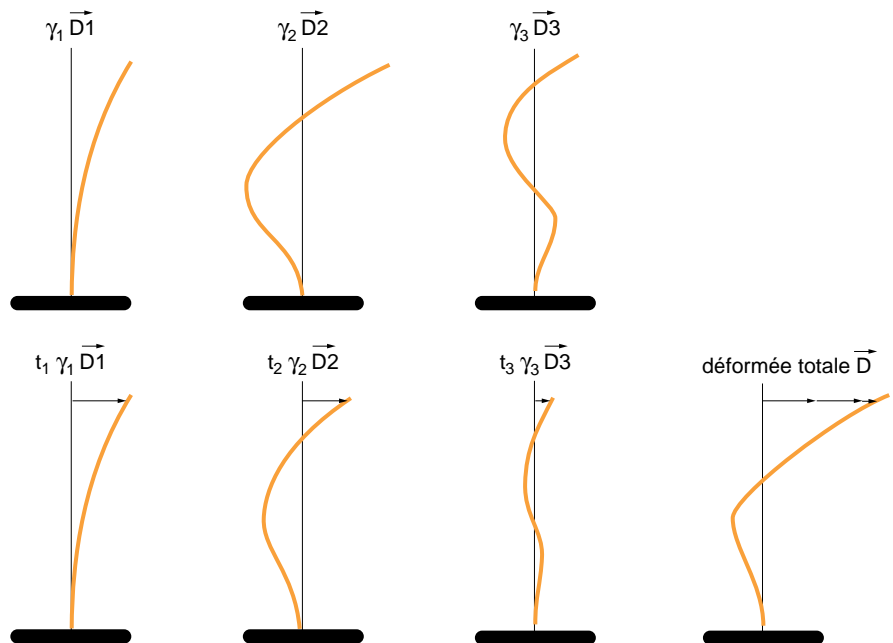


fig. 19 : pour obtenir la déformation en tous points d'une structure, connaissant ses modes de résonance, les taux d'appropriation et les γ_{max} correspondants, il suffit de faire une somme vectorielle.

3. conception des équipements

définition des objectifs

La bonne prise en compte des contraintes sismiques dans la conception d'un équipement nécessite de connaître le degré de sûreté qu'il doit assurer pendant et après le séisme.

Les exigences requises sur le comportement d'un matériel exposé aux séismes sont :

- la stabilité (le matériel ne doit pas devenir projectile) ;
- l'intégrité (le matériel doit conserver sa géométrie initiale) ;
- le fonctionnement (le matériel doit assurer un fonctionnement total, partiel ou dégradé).

Si pour les deux premières exigences le concepteur ne doit s'inquiéter que de la tenue mécanique du matériel, pour la troisième, la démarche est plus complexe puisque les différents aspects fonctionnels doivent être pris en compte. C'est le cas courant des matériels électrotechniques pour lesquels les conditions de service exigées en cas de séisme sont généralement proches des conditions de fonctionnement nominal. Il s'agit alors de définir les caractéristiques de la structure qui transmet les excitations en fonction du seuil de fragilité des cellules fonctionnelles.

Pour le vocabulaire voir figure 20.

Tenue mécanique

Vérifier la tenue mécanique d'un équipement consiste à s'assurer du bon dimensionnement des fixations au sol et du non dépassement des contraintes admissibles dans sa structure. Ces critères de dimensionnement sont fortement tributaires de la position des premières fréquences de résonance vis-à-vis des sollicitations sismiques envisagées.

Dans le cas d'équipements électrotechniques, la nature du transfert des sollicitations sismiques du sol vers les cellules fonctionnelles, doit être prise en compte dès la conception. Au préalable, il est nécessaire de déterminer le seuil de fragilité des organes fonctionnels (niveau d'accélération à partir duquel le matériel n'assure plus sa fonction).

Tenue fonctionnelle

Il s'agit d'évaluer les contraintes vibratoires que vont subir les organes fonctionnels, et de s'assurer que lorsqu'ils sont soumis à ces contraintes ils fonctionnent correctement, ou que leur disponibilité n'est pas affectée.

Deux cas de figures peuvent se présenter :

■ l'organe fonctionnel est un dispositif de protection ou de contrôle fabriqué en série: généralement le matériel est soumis à une qualification à l'environnement vibratoire dont les résultats peuvent être exploités pour évaluer sa tenue aux contraintes sismiques. Sinon, il est nécessaire d'étudier le comportement du matériel sur la gamme d'excitation sismique (0-40 Hz) ;

■ l'organe fonctionnel est un dispositif spécial ; il faut procéder à une évaluation par essai.

Dans certains cas, une analyse portant sur des essais effectués sur un matériel analogue, peut fournir des éléments techniques permettant de démontrer la tenue fonctionnelle de l'appareil.

principes de conception

La notion de transfert est fondamentale au stade de la conception. En effet, les équipements électriques sont généralement constitués d'une ossature ou charpente (structure) qui, en cas de sollicitation sismique, transmet plus ou moins fidèlement les vibrations du plancher vers des organes fonctionnels.

Spectre de réponse et caractéristiques dynamiques de la structure

Le spectre de réponse, qui représente les mouvements du plancher, permet immédiatement :

- d'une part, de connaître la sévérité de l'excitation à laquelle l'équipement risque d'être soumis (en terme d'accélération et de déplacement (cf. fin du premier chapitre)) ;
- d'autre part, de déterminer si la structure va amplifier ou non le séisme, au vue de la position de ses fréquences de résonance vis-à-vis de la partie forte du spectre de réponse.

Pour le concepteur, il est donc impératif de connaître les premières fréquences

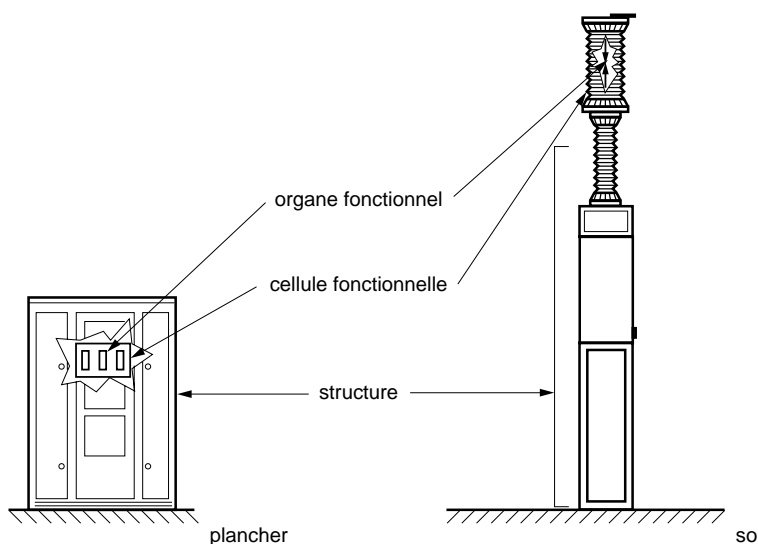


fig. 20 : définition des termes employés pour un équipement (armoire BT - disjoncteur HT).

de résonance de la structure ; celles-ci peuvent être estimées par calcul, par essais ou par analogie. Rappelons qu'un spectre comporte 2 zones (cf. fig. 21) :

■ la partie droite du spectre, pour laquelle l'équipement prendra les mêmes accélérations que le sol sans amplification.

Lorsque les fréquences de résonances de l'équipement se situent dans cette zone, le comportement mécanique de l'équipement est dit "statique équivalent" ou "pseudo statique". L'estimation des contraintes extrêmes est alors obtenu en appliquant successivement aux masses en présence, l'accélération maximale du sol (dite APN ou Accélération de Période Nulle) suivant les trois directions de l'espace ;

■ la partie forte du spectre, dans laquelle la structure amplifiera les accélérations par ses résonances, ce qui conduira à des efforts et contraintes plus élevés que dans le cas précédent. Dans cette zone, le comportement mécanique de l'équipement est dynamique et, dans ce cas, il est nécessaire de connaître les fréquences et déformées modales et de les combiner pour estimer les dommages extrêmes que peut subir l'équipement.

La démarche consiste alors à :

- caractériser les modes propres de vibration (F_{ri} , D_i),
- déterminer les réponses modales,
- superposer les réponses modales,
- en déduire les efforts et contraintes induites.

Règles de l'art en conception sismique

La mise en application de ce qui précède conduit naturellement à éviter que l'équipement ne possède des fréquences de résonance dans la partie forte du spectre de réponse. Dans la mesure du possible, le concepteur doit essayer de limiter les dimensions de son équipement et en particulier sa hauteur (les petites dimensions favorisent les fréquences élevées).

Ceci étant, la solution la plus courante consiste à **rigidifier** la structure pour rejeter ses premières fréquences de résonance au-delà de la plage d'excitation sismique, ou tout au moins au-delà de la partie forte du spectre de réponse. Dans tous les cas, il convient

d'éviter les modes de résonances situés dans la bande de fréquence 0-10 Hz, voire 0-15 Hz, pour augmenter la sûreté.

La mise en pratique de ces concepts de base doit cependant s'accommoder des exigences de coût, d'encombrement et de fonctionnement des équipements.

Lorsqu'un équipement est manifestement trop fragile et ne peut être suffisamment rigidifié, il est possible d'**isoler** l'équipement du sol en interposant un étage de suspension. Pour être efficace, la suspension doit cependant posséder des caractéristiques qui nécessitent l'emploi de plots amortisseurs très performants (souplesse et débattement). Afin de procurer à l'équipement des accélérations d'amplitude inférieure à celles du sol, la suspension devra en effet conférer au matériel suspendu des fréquences de résonances (de suspension) très basses, de l'ordre de 1 Hz, et accepter des déplacements supérieurs à 40 cm. De telles caractéristiques ne peuvent bien entendu pas être obtenues avec des plots classiques et les déplacements engendrés ne sont pas sans inconvénients pour les équipements supportés (respect du positionnement, liaisons externes, distances diélectriques). Le recours à cette méthode est donc limité.

Cas des appareillages en armoire

Dans le cas où une structure d'accueil reçoit des matériels variés, il est nécessaire de mener de front l'étude mécanique du transfert et l'évaluation de la robustesse des matériels en présence, en vue d'établir la compatibilité entre les aptitudes de l'armoire et les limites de tenue fonctionnelles de l'appareillage à l'environnement vibratoire. Pour limiter l'amplification des mouvements de l'armoire, et par conséquent le transfert, il est nécessaire d'avoir des ossatures d'armoire rigides (renforcées ou haubanées). Le degré de rigidité requis est fonction de la robustesse des appareillages.

Les recommandations habituelles concernent :

- la construction de l'armoire : les assemblages boulonnés ou soudés sont préférables aux assemblages rivetés qui peuvent prendre du jeu et générer des chocs néfastes à l'appareillage ;
- la fixation de l'armoire : la solution idéale consiste à boulonner l'armoire au sol et au mur, les fixations doivent être dimensionnées pour résister aux efforts dus aux accélérations sismiques ;
- la disposition des appareils : si l'armoire est seulement fixée au sol, les masses lourdes seront disposées de préférence en pied d'armoire, il en est de même pour les appareils fragiles ;

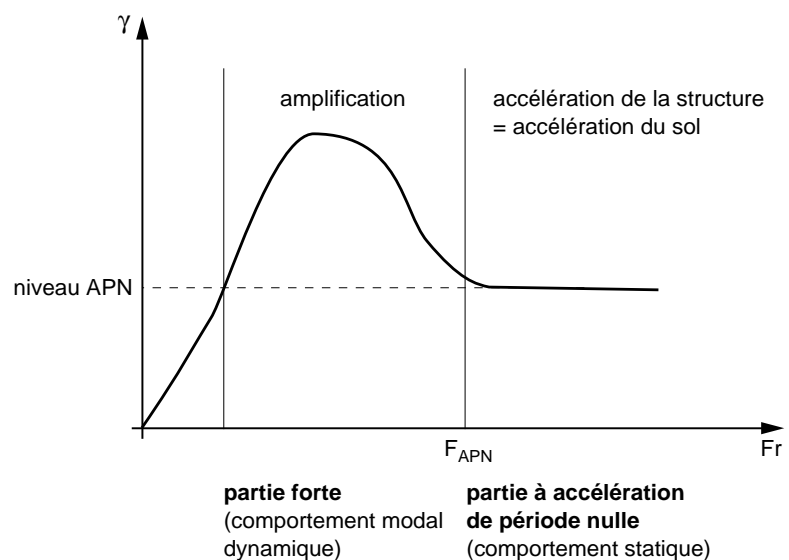


fig. 21 : les fréquences de résonance dans la partie forte du spectre sont à éviter.

■ la fixation des appareils : préférer les fixations rigides ; dans le cas contraire, il convient de faire attention aux modes de résonance locaux, et aux mouvements différentiels au cours du séisme ;

■ les cartes électroniques : éviter les cartes dont la surface est importante ou trop chargée, les composants lourds ; le cas échéant prévoir des raidisseurs ;

■ le câblage : pour éviter les efforts inertiels, brider les nappes de câbles au plus près des connecteurs.

calcul des contraintes, il faut s'assurer que le maillage est suffisant.

Le programme de calcul détermine ensuite, sur une plage couvrant l'excitation sismique (0-40 Hz), les fréquences de résonance et déformées modales associées du modèle, ainsi que les coefficients de participation modaux : il s'agit de l'analyse modale.

A titre d'exemple, le tableau de la figure 23 donne des éléments de l'analyse modale d'un transformateur ;

ceux-ci montrent que l'isolateur BT est un élément sensible, mais plus encore le conservateur car son deuxième mode de résonance se situe à une fréquence de 11 Hz (qui a toutes les chances d'être dans la partie forte du spectre correspondant à l'excitation sismique).

L'étape suivante consiste à simuler la réponse de l'équipement sous l'effet du séisme et ainsi obtenir les déplacements, contraintes et efforts aux appuis.

la simulation par calcul au stade de la conception

La modélisation du comportement dynamique d'une structure utilise généralement la méthode des éléments finis. Cette technique numérique permet de prédire le comportement mécanique d'une structure soumise à des sollicitations dynamiques telles que celles générées par une secousse sismique. Elle est particulièrement adaptée au stade de la conception, alors que la structure n'existe qu'à l'état de plans de définition ou d'ébauche, et peut être encore modifiée. Elle délivre les informations essentielles aux concepteurs sur les contraintes, les efforts d'ancrage et les déformations de la structure dues à l'excitation sismique.

Principe

Le principe de cette méthode consiste à construire un modèle simplifié de l'équipement, à l'aide d'un certain nombre d'"éléments finis" (poutres, plaques, volumes...) représentant la structure, et de masses concentrées représentant les organes fonctionnels. Le "maillage" utilise les données géométriques de la structure (section, épaisseur, inerties de section...) et les caractéristiques physiques des matériaux (module de YOUNG, masse volumique). (A titre d'exemple, voir figure 22).

La finesse du maillage n'est pas essentielle pour accéder aux modes propres, il faut seulement respecter la répartition des principaux éléments de raideur et de masse. Par contre, lors du

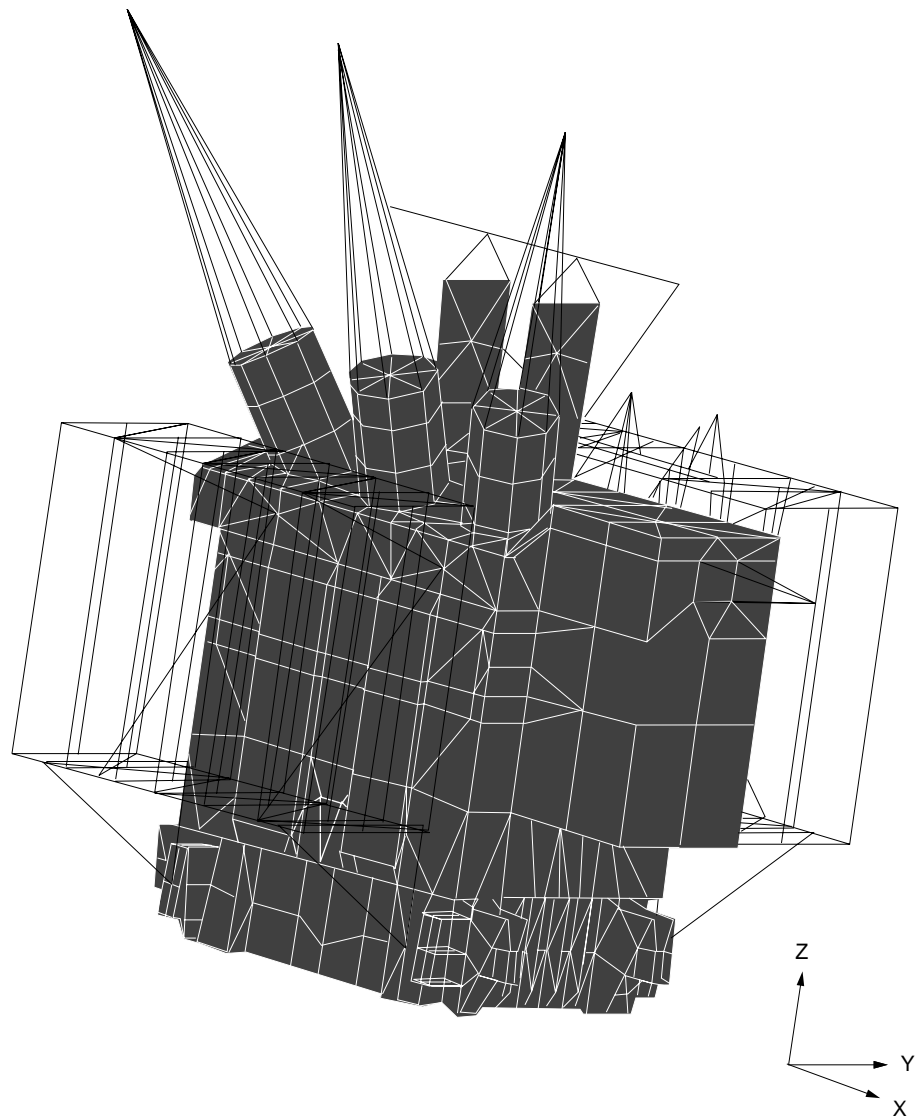


fig. 22 : maillage "éléments finis" d'un transfo THT (2000 éléments et 1500 nœuds).

Deux méthodes peuvent être utilisées suivant la position des fréquences de résonances de la structure vis-à-vis de la partie forte du spectre de réponse :

■ calcul pseudostatique

(Les fréquences de résonances se situent au-delà de la partie forte du spectre de réponse).

Dans ce cas, le calcul est de type statique, et le modèle est soumis pour chaque direction à l'accélération maximale du sol ;

■ calcul par superposition modale

(Certaines fréquences de résonance se situent sur la partie forte du spectre de réponse).

Dans ce cas la réponse du modèle pour une direction donnée est obtenue en multipliant la déformée de chaque mode (Di) par son coefficient de participation et par l'accélération lue à la fréquence de ce mode sur le spectre de réponse. Les réponses des différents modes sont ensuite associées pour aboutir à la réponse globale pour une direction donnée.

Notons que le spectre de réponse, par définition, inclut l'effet de l'amortissement ; il est donc nécessaire d'utiliser un spectre de réponse correspondant à l'amortissement de la structure étudiée, voire même plus défavorable, c'est-à-dire plus faible.

La dernière étape consiste à vérifier que les valeurs extrêmes des déplacements, contraintes et efforts aux liaisons, sont admissibles, c'est-à-dire compatibles avec les caractéristiques mécaniques de la structure. Il existe pour cela des règles de combinaison des contraintes sismiques et statiques (poids propre, neige, vent, pression, efforts de traction...).

Par ailleurs la répartition spatiale des accélérations servira à vérifier la tenue fonctionnelle des appareillages et instrumentations embarqués soit à l'aide d'essais spécifiques, soit en établissant des comparaisons avec des essais déjà effectués.

Limites de la méthode "éléments finis"

Bien entendu la modélisation par éléments finis présente toujours des écarts entre modes de résonance calculés et modes de résonance réels de l'équipement installé. Ceci provient principalement des approximations faites en ce qui concerne les conditions aux limites (mode de fixation de la structure au sol), les liaisons internes, les non linéarités ainsi que les différentes simplifications inhérentes à la modélisation. Généralement, seul le premier mode de vibration est calculé avec une erreur acceptable. Cependant, vu le caractère large bande de l'excitation sismique, l'estimation des contraintes calculées par spectre de réponse

s'accomode d'une erreur sur la position exacte des fréquences de résonance. C'est pourquoi l'utilisation de cette méthode au stade de la conception conserve tout son intérêt.

Recalage

Dés que le prototype du matériel est disponible, il est possible de corriger le modèle, éléments finis, en effectuant un "recalage" à partir de données issues de la mesure. Différentes techniques expérimentales permettent en effet d'obtenir les caractéristiques dynamiques réelles de la structure et, par le biais de logiciels "de recalage", d'apporter au modèle, éléments finis, les modifications nécessaires pour qu'il représente mieux la réalité.

n° du mode	fréquence (Hz)	coefficient de participation modal	élément concerné
1	8,7	4	conservateur
2	11	232	conservateur
3	12,7	14	radiateur
4	13,2	34	tous auxiliaires
5	13,8	5	échangeur
6	15,9	24	conservateur
7	17,2	11	échangeur
8	19	105	tous auxiliaires
9	19,3	51	tous auxiliaires
10	21,2	24	échangeur
11	22,9	18	conservateur
12	23,1	7	échangeur
13	24,1	4	parafoudre
14	24,4	47	parafoudre
15	24,6	42	parafoudre
16	24,8	3	parafoudre
17	24,9	0,2	radiateur
18	25,5	33	parafoudre
19	26	96	radiateur
20	26,5	6	échangeur
21	26,6	25	radiateur
22	29,3	115	isolateur BT
23	30,3	354	isolateur BT
24	30,5	11	isolateur BT
25	31,6	2	isolateur BT

fig. 23 : résultat du calcul modal pour les divers éléments du transformateur de la fig. 22.

4. qualification par simulation ou essai

introduction

Qualifier c'est apporter la preuve de la tenue d'un équipement dans des conditions de contraintes identifiées ou normées.

Il existe deux grandes approches pour réaliser une qualification sismique :

- la première consiste à effectuer des essais "vraie grandeur" sur les matériels ;

- la deuxième consiste à utiliser la modélisation "éléments finis" qui peut être associée à un certain nombre de données expérimentales.

Cette dernière prend une place de plus en plus importante dans le processus de qualification notamment en ce qui concerne la tenue mécanique. Mais aujourd'hui, il est encore délicat de prendre en compte l'aspect fonctionnel par la modélisation.

La qualification par essais est utilisée :

- pour les matériels de dimensions cohérentes avec les moyens d'essais ;
- pour les matériels spécifiques (unitaire, petite série) ;
- lorsque l'aspect fonctionnel est déterminant (complexité ou haut niveau de sûreté).

La qualification par calcul est utilisée :

- si les dimensions de l'équipement sont incompatibles avec les moyens d'essai (cas des gros transformateurs) ;
- lorsqu'un appareil a déjà été essayé dans des conditions sismiques différentes ;
- lorsqu'un appareil est une version modifiée d'un appareil qualifié ;
- lorsque le fonctionnement de l'équipement n'est pas requis pendant le séisme.

La qualification mixte par modélisation et recalage expérimental est utilisée :

- pour les matériels de grande série ;
- dans le cas où les normes ou les donneurs d'ordre admettent une telle justification (données fonctionnelles connues).

En fait, dans de nombreux cas de figures, la modélisation précède les essais "vraie grandeur". Dans ce cas, les chances de faire bien du premier coup et de réussir les essais de qualification sont maximales.

Nous allons ci-après :

- illustrer par deux exemples : la qualification mixte et la qualification par essais "vraie grandeur" précédée d'une modélisation à la conception ;

- développer la méthodologie de la qualification par essais.

qualification mixte (modélisation et recalage expérimental)

La méthode combinant calculs et essais consiste :

- à édifier un modèle mathématique ;
- à recueillir par des essais partiels (analyse modale expérimentale), sur le prototype, les données concernant le comportement dynamique de l'appareil (amortissements, fréquences de résonances, déformées modales) ;
- à recalculer le modèle mathématique avec les données précédentes.

Le modèle de calcul permet ensuite d'évaluer la tenue mécanique du matériel au cumul des sollicitations sismiques et des contraintes de service. La tenue fonctionnelle consistera à vérifier que le matériel n'est pas perturbé par les déformations et accélérations délivrées par calcul.

L'exemple suivant illustre la méthode, combinant essais et calcul, utilisée pour établir la résistance au séisme d'un disjoncteur haute tension.

Qualification au séisme d'un disjoncteur HT

(cf. fig. 24)

- première étape : modélisation du disjoncteur.

La modélisation est effectuée par éléments finis : poutres, plaques et coques (pour les isolateurs), le modèle

comporte 2 670 éléments et 3 200 nœuds ;

- deuxième étape : analyse modale expérimentale (cf. fig. 25 et 26). Cette analyse est effectuée sur un prototype. Elle consiste, par la mesure, à acquérir les fonctions de transfert entre un point d'excitation (force générée) et des points de réponse (accélérations mesurées), puis à identifier les modes réels de la structure (fréquences de résonance et déformées associées) ;

- troisième étape : recalage du modèle éléments finis.

Cette étape consiste à réajuster les paramètres de la modélisation éléments finis (finesse du maillage, paramètres physiques : module de YOUNG, masse volumique..., conditions aux limites) de façon à ce que les caractéristiques dynamiques du modèle se rapprochent le plus possible de la réalité ;



fig. 24 : disjoncteur Merlin Gerin destiné à l'équipement des postes HT .

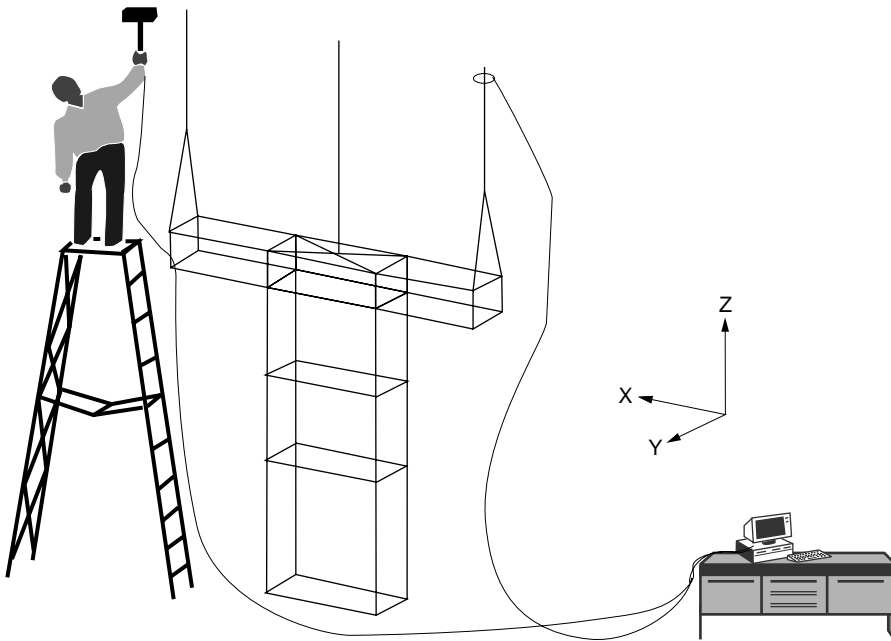


fig. 25 : analyse modale expérimentale.

■ quatrième étape : mesure du coefficient d'amortissement. Pour calculer la réponse du disjoncteur par la méthode du spectre de réponse, il faut connaître l'amortissement à appliquer au modèle. Celui-ci est obtenu en soumettant le prototype à une déformation mécanique importante (essai de lâcher) ; l'amortissement est déduit de l'observation de la décroissance des oscillations ;

■ cinquième étape : calcul des efforts, contraintes, et déplacements sous charge sismique.

Le calcul de la réponse par la méthode du spectre de réponse est effectué, il permet de prendre en compte différents cas de séisme.

■ sixième étape : vérification de l'intégrité et de la fonctionnalité de l'appareil sous contraintes sismiques. Cette vérification consiste :

□ d'une part, à vérifier la tenue mécanique de la structure en termes d'efforts aux liaisons et de contraintes dans les matériaux lorsque le disjoncteur est soumis au cumul des

contraintes sismiques et des contraintes de service (poids, pression interne, efforts statiques sur les bornes, vent) (figure 27, page 22 contraintes dans le disjoncteur HT), □ d'autre part, à s'assurer que les déformations engendrées par les sollicitations sismiques ne s'opposent pas au fonctionnement de l'appareil ; cette dernière vérification se fait en statique en imposant au matériel la déformation donnée par le calcul, et en exécutant les différentes manœuvres pour lequel il est prévu.

qualification par essais "vraie grandeur" précédés par la modélisation

Même si le matériel doit subir des essais de qualification, il est toujours intéressant, afin de gagner du temps et de l'argent, de faire précéder la fabrication et ces essais par une modélisation effectuée à partir des plans.

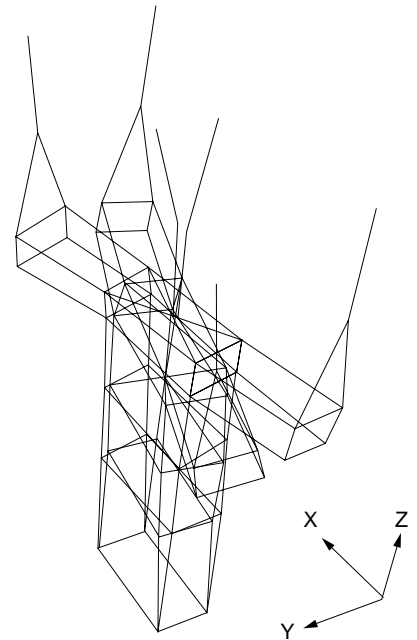


fig. 26 : déformée modale expérimentale résultante ($f = 3,8$ Hz).

Qualification d'armoires de contrôle-commande

Dans l'exemple ci-après il s'agit d'armoires de contrôle-commande destinées aux centrales nucléaires . Ces équipements sont tributaires d'une réglementation sévère en ce qui concerne la sûreté de fonctionnement et à ce titre, ils sont soumis à des essais "vraie grandeur" de résistance aux sollicitations sismiques (cf. fig. 28, p. 23).

Afin de présenter aux essais de qualification un matériel présentant les meilleures garanties de bon comportement, un certain nombre de simulations et investigations sont effectuées lors de la conception. La démarche employée comporte les étapes suivantes :

■ évaluation de la robustesse des principaux appareils installés dans l'armoire.

Sur les matériels pour lesquels nous n'avons aucune donnée historique, un essai de tenue aux limites est effectué sur la gamme de fréquence

de l'excitation sismique. Celui-ci consiste à rechercher le seuil de fragilité de l'équipement (éventuellement sous tension).

Cette donnée est ensuite utile pour définir un objectif quant à la limitation du transfert de l'armoire ;

■ estimation du transfert de la structure de l'armoire.

La forme du spectre de réponse ainsi que le seuil de fragilité des matériels embarqués donnent une indication sur les caractéristiques souhaitables du transfert de l'armoire. La modélisation de l'armoire a pour but d'identifier les principaux modes de résonance dans la gamme de fréquence de l'excitation sismique (0-40 Hz). L'armoire est modélisée en éléments poutres et plaques et les matériels sont représentés par des masses et inerties ponctuelles.

Le calcul par éléments finis est effectué afin d'estimer les niveaux de vibration que l'armoire va communiquer aux matériels implantés à l'intérieur.

Suivant la position des premières fréquences de résonances, des modifications sont apportées (sur plan) pour réduire l'amplification des accélérations du sol ;

■ vérification expérimentale des caractéristiques de l'armoire (figure 29)

Une mesure des premières fréquences de résonance est effectuée expérimentalement sur l'armoire équipée et câblée afin de vérifier que les caractéristiques de la structure réelle ne s'écartent pas de celles données par le calcul ;

■ incidence des caractéristiques réelles de l'armoire sur le matériel.

L'incidence, sur le comportement des matériels lors de l'essai sismique, de l'écart entre les caractéristiques dynamiques de l'armoire calculées et celles mesurées est évalué en se référant au spectre de réponse de l'excitation sismique.

Des modifications sont apportées lorsque les écarts engendrent des amplifications vibratoires incompatibles avec les caractéristiques du matériel. Par exemple, la fixation au sol de l'armoire et/ou la fixation d'un appareil seront renforcées.

qualification par essais

La qualification par essai n'est pas toujours réalisable (matériels lourds ou de grandes dimensions) et est souvent délicate à mettre en œuvre. Elle nécessite des moyens d'essais puissants (tables vibrantes à grands déplacements actionnées par des

vérins hydrauliques, pilotage sophistiqué), et seuls quelques laboratoires spécialisés ont la possibilité de les réaliser. Au niveau du coût, à la prestation du laboratoire s'ajoutent :

■ le coût du transport ;

■ le coût du montage d'essai ;

■ éventuellement celui du matériel s'il est inutilisable après l'essai.

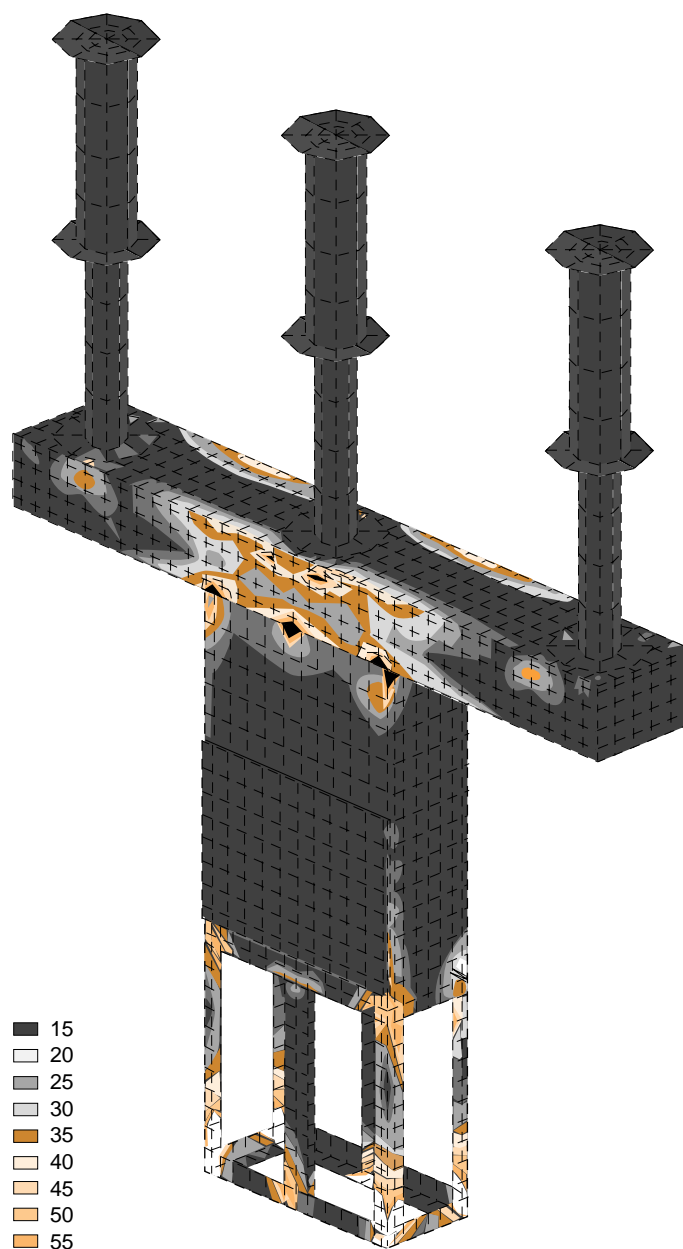


fig. 27 : calcul des contraintes.



fig. 28 : armoire BT pour centrale nucléaire en cours d'essais de qualification.

La procédure décrivant le déroulement de la qualification d'un équipement est généralement contenue dans un cahier des charges (ou un programme d'essai), établi en fonction des normes ou recommandations en vigueur (CEI 68-3-3/UTE C 20420, ANSI, ENDESA, IEE, etc.).

Plusieurs variantes sont possibles dans le déroulement de la qualification, elles sont fonction :

- des informations que l'on détient sur le contexte géosismique de l'implantation de l'équipement ;
- de la complexité de l'équipement ;
- des données connues sur son comportement dynamique ;
- de la représentativité de l'équipement en test vis-à-vis de la série ;
- du degré de sûreté que doit assurer le matériel durant le séisme.

Sans rentrer dans le détail, nous vous proposons ci-après un aperçu des critères qui interviennent dans le choix des modalités d'une qualification par essai, selon la norme CEI 68-3-3.

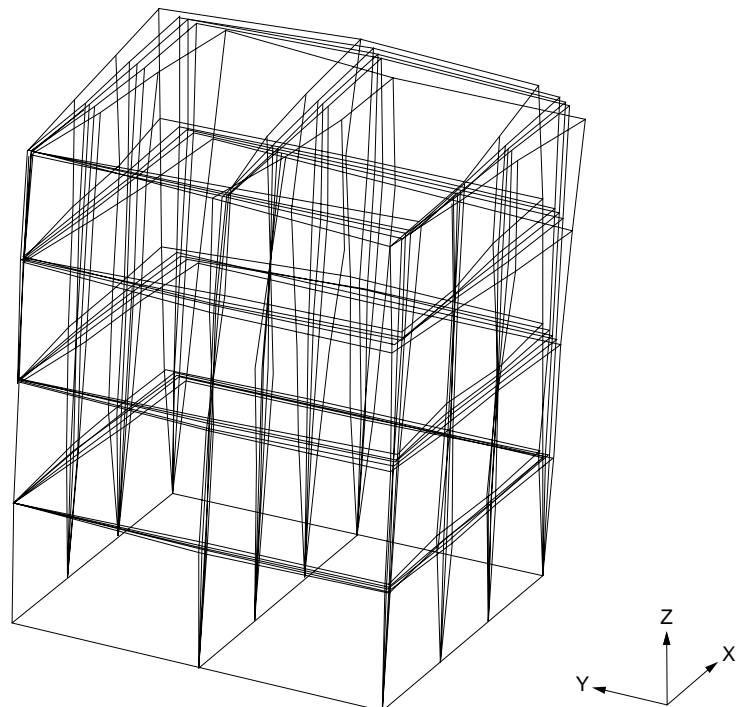


fig. 29 : déformation modale de la structure de l'armoire issue de l'expérimentation.

Configuration du matériel présenté en essai

Avant de procéder à un essai de qualification sismique, il est nécessaire de fixer un certain nombre de modalités. Celles-ci sont précisées dans une spécification particulière qui mentionne, entre autres, les dispositions à prendre concernant :

- le choix du spécimen d'essai. Des analyses préliminaires sont parfois nécessaires pour s'assurer que le spécimen retenu constitue bien le cas le plus défavorable qui sera rencontré ;
- les fixations et le montage. Ils doivent être identiques à ce qui est pratiqué sur site ;
- les conditions de service qui doivent être prises en compte (mécaniques et électriques).

■ le fonctionnement requis pendant l'essai, ainsi que les moyens à mettre en oeuvre pour vérifier le maintien des performances visées (mesure de l'isolement ou de la continuité électrique, pouvoir de coupure, logiciel d'animation, etc.).

Les critères d'acceptation et/ou de mauvais fonctionnement sont classés suivant trois sévérités :

- sévérité 0 : le matériel ne doit pas présenter de dysfonctionnement pendant et après l'essai sismique ;
- sévérité 1 : le matériel peut présenter un mauvais fonctionnement pendant l'essai sismique mais doit être opérationnel après essai ;
- sévérité 2 : le matériel peut présenter un mauvais fonctionnement pendant l'essai sismique et nécessiter une intervention ou un réglage pour revenir à son état normal sans qu'il soit nécessaire de procéder à un remplacement ou une réparation.

Choix du niveau de sévérité de l'essai

Deux classes ont été prévues suivant la disponibilité et/ou l'exactitude de la définition des caractéristiques sismiques de l'environnement et du matériel.

- la classe sismique **générale** : dans ce cas l'accélération à laquelle sera

soumis le matériel est normalisée (plusieurs niveaux de performances sont habituellement proposés par la norme) ;

■ la classe sismique **spécifique** : celle-ci concerne les matériels pour lesquels le mouvement sismique considéré résulte d'une étude sismologique (SMHV). Elle prend également en compte les caractéristiques géographiques d'implantation et celles du bâtiment ou des structures de support. Ceci est généralement le cas pour les matériels électrotechniques, tout particulièrement pour les centrales nucléaires où l'accélération à laquelle sera soumis le matériel est spécifiée par un spectre de réponse.

Différents types d'essais

Différentes méthodes sont employées pour recréer l'environnement sismique sur une table vibrante. Elles diffèrent par le nombre de directions excitées simultanément (monoaxial, polyaxial) et par la façon de recréer les ondes sismiques avec le moyen d'essai.

■ essais monoaxial, polyaxial

Le mouvement sismique du sol se produit simultanément dans toutes les directions et sa simulation exacte nécessiterait de disposer de tables triaxiales, mais les moyens d'essais habituels permettent au mieux d'effectuer des essais biaxiaux (deux axes excités simultanément).

En l'absence de précision sur le comportement sismique du matériel, l'essai biaxial est recommandé. Il nécessite une installation permettant l'excitation simultanée avec des ondes indépendantes suivant deux des axes préférentiels du matériel ; le spectre de réponse d'essai doit être au moins égal au spectre de réponse spécifié. Pour effectuer le test selon le 3^e axe, il suffit de faire pivoter le matériel de 90° autour d'un axe vertical et de réaliser à nouveau le même essai .

L'essai de type monoaxial, exécuté selon les trois axes préférentiels d'essai du matériel, peut être justifié dans les circonstances suivantes :

□ lorsque le matériel n'est soumis qu'à une excitation pouvant être considérée comme monoaxiale du fait de ses conditions de montage sur site,
□ lorsqu'il n'existe pas de couplage (ou s'il est faible) entre les trois axes préférentiels d'essai du matériel pris deux à deux ;

■ ondes monofréquence ou multifréquences.

D'une façon générale l'onde d'essai utilisée doit :

- produire un Spectre de Réponse d'Essai (SRE) supérieur ou égal au Spectre de Réponse Spécifié (SRS) dans la spécification particulière,
- avoir une valeur crête de l'amplitude maximale de l'accélération égale ou supérieure à celle du sol (Accélération à Période Nulle (APN)) du SRS,
- reproduire avec une marge de sécurité les effets d'un séisme spécifié,
- ne pas comporter de fréquences supérieures à 35 Hz,
- être d'une durée au moins égale à celle de la partie forte du séisme ; en général celle-ci est comprise entre 5 et 10 s.

Le spectre de réponse spécifié est généralement à bande large , l'emploi de l'onde à fréquence multiples est recommandée.

Les moyens d'essais modernes permettent de générer de telles ondes ou plus exactement de piloter le moyen d'essai, soit à partir d'un accélérogramme directement fourni par la spécification d'essai, soit en synthétisant un accélérogramme à partir du spectre de réponse spécifié (SRS), sur une durée de 20 secondes. Dans certains cas de transfert tels que ceux rencontrés dans les bâtiments, le spectre de réponse est à bande étroite ; l'essai peut alors être réalisé en onde monofréquence.

conclusion

La haute disponibilité demandée à la distribution électrique et au contrôle commande exige la prise en compte des contraintes d'environnement de tous types (mécanique, climatique, électromagnétiques). Parmi celles-ci figurent les contraintes sismiques qui sont particulièrement destructrices et qui doivent être spécifiées lors de la conception des équipements.

Pour ce faire il est nécessaire de connaître la sévérité du séisme maximum historique vraisemblable traduit sous forme de spectre de dimensionnement ou, pour les matériels de série, de choisir le niveau de sévérité de la classe sismique normalisée.

Aujourd'hui la tenue mécanique d'un équipement peut être appréciée avec une bonne précision grâce à la modélisation et au calcul des contraintes par la méthode des éléments finis.

Apporter la preuve du maintien des fonctionnalités, pendant ou après le séisme, est plus difficile, et nécessite généralement de coupler modélisation, et essais des éléments fonctionnels. Les quelques exemples de qualification par modélisation et/ou essai qui sont présentés aux chapitres 3 et 4, démontrent le savoir faire d'une entreprise qui fournit depuis de nombreuses années des équipements

pour les centrales nucléaires et des matériels électriques pour les pays exposés aux séismes.

Comme pour la qualité ou la compatibilité électromagnétique, la tenue sismique doit être maîtrisée dès la conception; sinon les actions correctives sont souvent difficiles et d'un coût élevé. En conséquence la modélisation et les puissants moyens de calcul actuels sont largement utilisés pour la conception "antisismique" des matériels électrique et électroniques.

6. bibliographie

Normes

- CEI 68-3-3 (UTE C20 420) : Méthodes d'essais sismiques applicables aux matériels.
- CEI 1166 : Disjoncteurs HT : guide pour la qualification sismique.

Publications diverses

- Recommandations AFPS90 pour la rédaction de règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes Tomes 1 et 2.
- Calcul dynamique des structures en zone sismique par Alain CAPRA et Victor DAVIDOVICI.
- La revue des laboratoires d'essai n° 9, 31, 36, 39.

Cahiers techniques Merlin Gerin

- CT 85 (1977) : Tenue de l'appareillage électrique aux secousses sismiques, P. PY, J.-Y. BERTHONNIER (présente des solutions technologiques pour les disjoncteurs HT).

