

DE L'INSTITUT TECHNIQUE
DU BATIMENT
ET DES TRAVAUX PUBLICS

N° 468 - OCTOBRE 1988

SÉRIE : INFORMATIQUE APPLIQUÉE 66

PRÉSENTATION DU LOGICIEL EPICENTRE

Analyse modale et calcul sismique des systèmes
de contreventement irréguliers constitués de voiles reliés
par des linteaux

par

Michel HÉNIN

Ingénieur Civil des Ponts et Chaussées,
Docteur-Ingénieur,
Entreprise SOGEA

PRÉSENTATION DU LOGICIEL ÉPICENTRE

L'auteur du logiciel ÉPICENTRE présente ici une méthode de calcul, développée sur micro-ordinateur, qui permet de procéder, dans l'étude générale des bâtiments irréguliers, à l'analyse modale et au calcul sismique des systèmes de contreventement constitués de voiles reliés par des linteaux.

Après un exposé des aspects théoriques sur l'application de la méthode des matrices transfert à l'analyse dynamique des bâtiments, base même de l'étude, l'auteur décrit rapidement le logiciel même (extension dynamique du logiciel EOLE permettant le calcul statique des contreventements voiles + linteaux exposé dans cette revue, fascicule IA/50) puis en présente un exemple d'application.

AVANT-PROPOS

de

François HANUS

Directeur Technique
Directeur Recherche Développement.
Entreprise SOGEA

Après avoir consacré une thèse de Doctorat d'Ingénieur au calcul des immeubles contreventés par des voiles, Michel HÉNIN s'est attaché à mettre à la disposition de la Profession la méthode de calcul originale et efficace qu'il avait élaborée : poursuivant ses développements indépendamment de sa carrière professionnelle, il proposait en 1981 le logiciel EOLE destiné au calcul statique des contreventements par voiles.

La méthode utilisée pouvant être étendue au calcul dynamique, il reprit ses recherches et mit en chantier un nouveau logiciel destiné spécifiquement à l'analyse modale et au calcul sismique des bâtiments. L'Entreprise SOGEA l'a encouragé dans cette voie et a tenu à apporter son appui à ce travail remarquable, qui est présenté ici par son auteur.

Le logiciel EPICENTRE, développé sur micro-ordinateur, permet d'obtenir rapidement l'analyse modale fine d'un bâtiment quelconque contreventé par voiles ou par noyau central. Le calcul sismique est enchaîné automatiquement, en conformité avec les règles PS 69 ou selon les dispositions des futures règles parasismiques, et produit l'ensemble des résultats utiles à l'ingénieur : déplacements, efforts (avec descentes de charges), contraintes.

Le logiciel EPICENTRE constitue pour le bureau d'études un outil de calcul nouveau et puissant, qui s'inscrit parfaitement dans le cadre des orientations actuelles en matière de calcul parasismique.

PRÉFACE

de

Richard SOULOUMIAC

Membre du Comité de Rédaction des futures Règles Parasismiques

Membre du Comité de Rédaction de l'EUROCODE n° 8

Chef de la Division Béton Armé, BUREAU VERITAS

Lorsque les structures de bâtiments sujets aux agressions sismiques peuvent être considérées comme régulières, les codes de protection parasismique autorisent de conduire l'analyse de ces ouvrages sous les actions sismiques par des méthodes simplifiées ne prenant en compte que le mode fondamental de vibration dans deux directions perpendiculaires successives ; la forme de ces modes fondamentaux peut être soit spécifiée forfaitairement dans les codes, soit calculée de manière plus approchée.

Ce genre d'analyse se ramène donc à une analyse statique équivalente qui présente l'avantage de pouvoir être conduite sur des calculatrices scientifiques de poche.

Toutefois le résultat trouvé pour les efforts, contraintes ou déplacements d'une section de la structure se trouve être largement conservatif par le fait que la masse totale en vibration est intégrée dans le mode fondamental ; en particulier les couples de torsion provenant d'un mode de torsion de rang élevé sont pris en compte dans le mode fondamental avec une participation surabondante.

Les applications ont montré que, même s'il est autorisé à utiliser les analyses simplifiées pour les structures régulières, le projeteur peut avoir intérêt à recourir à des méthodes plus élaborées, donc plus onéreuses d'emploi, tant le gain final est important.

Ces méthodes plus sophistiquées, et en particulier l'analyse modale spectrale, sont, par contre, rendues obligatoires par les codes parasismiques modernes, dès lors que les structures considérées ne répondent plus aux critères de régularité spécifiés dans ces codes (régularité en configuration horizontale et verticale, régularité de la distribution des masses et des raideurs, excentricité structurale).

Sont à la disposition des projeteurs de nombreux logiciels permettant d'opérer des analyses modales de structures à partir de modèles à trois dimensions ; ces logiciels utilisent une modélisation par barres et/ou éléments finis et leurs algorithmes sont basés sur le principe des matrices de rigidité.

En dehors de leur lourdeur relative pour des bâtiments courants, l'inconvénient principal de certains d'entre eux est d'opérer une sélection des modes de vibration significatifs par des critères peu ou pas assez représentatifs ; le critère de l'énergie parfois utilisé favorise exagérément les modes de flexion et peut conduire à oublier des modes de compression ou de torsion importants et dont l'énergie de déformation est négligeable.

Le critère de la masse modale, qui est le seul à être significatif dans la participation modale, est généralement utilisé de manière incomplète : quand on détermine la masse modale des modes sollicités par un séisme de direction donnée, on oublie trop souvent d'évaluer les moments d'inertie massique modaux qui, seuls, mettent en évidence les modes de torsion pure qui produisent des couples de torsion importants, bien qu'assortis d'une masse modale négligeable.

Un autre inconvénient, rencontré dans les logiciels discrétisant les masses aux nœuds du modèle, réside dans le fait qu'ils ne sont plus en mesure de tenir compte de l'excentricité additionnelle et/ou accidentelle spécifiée dans les codes.

Dès lors, seule l'excentricité structurale réelle est prise en compte dans les calculs. On rappellera que l'excentricité additionnelle correspond aux dispersions que peuvent rencontrer les propriétés mécaniques des matériaux ou la distribution des masses, et que l'excentricité accidentelle tient compte forfaitairement du déphasage du mouvement sismique sur des points d'appui différents.

Le logiciel EPICENTRE proposé par M. HÉNIN, outre ses qualités de légèreté dues à l'utilisation des matrices transfert, permet de pallier totalement les inconvénients évoqués ci-dessus ; en effet, pour des structures de bâtiment irrégulières, contreventées par voiles et linteaux, et pour lesquelles seuls trois degrés de liberté significatifs ont été pris en compte dans la modélisation (2 degrés de translation horizontale et un degré de rotation autour de la verticale), la sélection des modes est opérée systématiquement par l'évaluation des masses modales dans 2 directions horizontales orthogonales, et par celle des moments d'inertie massique modaux par rapport à la verticale. Les critères de sélection des modes par la « masse modale » pourront être ceux spécifiés dans les futures règles parasismiques.

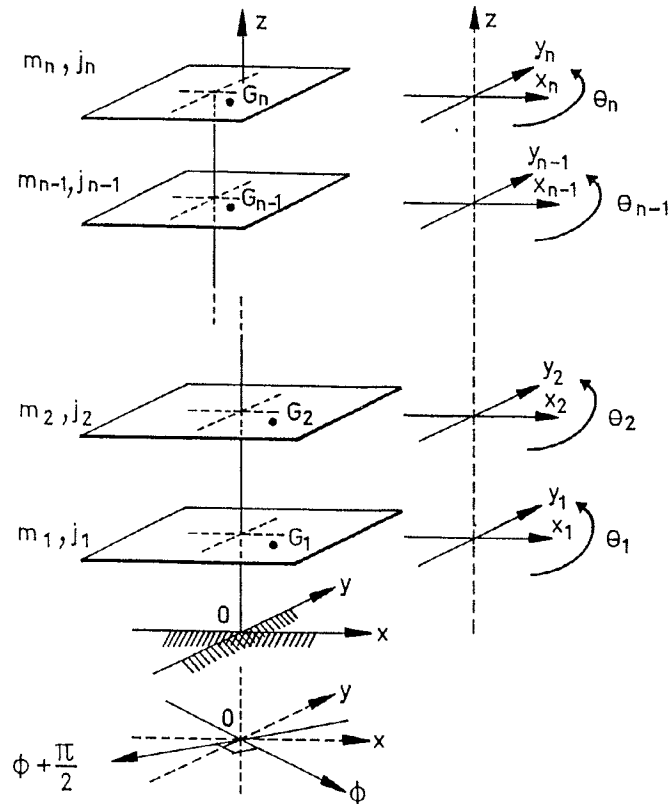


Fig. 1.

En ce qui concerne la prise en compte de l'excentricité additionnelle forfaitaire, le logiciel EPICENTRE résout élégamment le problème, car chaque plancher du bâtiment est défini uniquement par sa masse, son moment d'inertie massique, et les coordonnées de son centre de gravité quelles qu'elles soient.

Une dernière qualité tout à fait originale de l'analyse des structures sous séisme par le logiciel EPICENTRE correspond bien aux indications des futures règles concernant l'orientation des séismes à considérer: il est rappelé dans celles-ci que la direction d'un séisme est aléatoire et que, par conséquent, il convient d'analyser une structure sous les deux composantes horizontales orthogonales d'un séisme agissant suivant les directions principales de celle-ci.

Il faut entendre par directions principales d'une structure, les directions préférentielles dans lesquelles s'orientent sensiblement les différents modes de vibration de flexion; lorsque l'on balaye le plan à partir des axes géométriques horizontaux de la structure, il est démontré que la participation d'un mode atteint un extrênum lorsque le séisme est orienté suivant l'une de ces directions préférentielles, ou suivant la direction perpendiculaire. C'est dans cette optique que le logiciel EPICENTRE détermine ces directions de participation maximale et applique à la structure les séismes de calcul suivant ces directions.

Dès lors, pour toute variable d'intérêt, il est procédé à une somme quadratique des contributions modales suivant chacune de ces directions de calcul, puis à une combinaison de NEWMARK des composantes de la variable étudiée suivant ces deux directions.

La composante verticale du séisme peut éventuellement être intégrée à la combinaison précédente en affectant toute la masse au mode fondamental de vibration verticale et en prenant en compte l'ordonnée spectrale du plateau du spectre de calcul.

En conclusion, après une première extension dynamique de la méthode des matrices transfert appliquée aux systèmes contreventés par voiles, et développée par MM. LOCCI et GUILLEMARD sur gros ordinateur, le logiciel EPICENTRE de M. HENIN constitue une suite logique du logiciel EOLE destiné au calcul statique des systèmes contreventés par voiles et linteaux; la version dynamique présentée s'inscrit parfaitement dans l'esprit des orientations des futures règles parasismiques défendues avec tant d'acharnement par J. DESPEYROUX, Président de l'Association Française du Génie Parasismique; enfin son développement sur micro-ordinateur constitue un outil remarquable pour le projeteur.

Exposé de Michel HENIN

1. INTRODUCTION

Les divers règlements parasismiques nationaux conduisent à appliquer aux structures à étudier des chargements statiques qui représentent les forces d'inertie maximales risquant d'apparaître lors d'une secousse sismique.

La détermination de ces chargements statiques nécessite normalement la connaissance des premiers modes propres de vibration de la structure (périodes et déformées) : les efforts résultants sont alors déduits de spectres de réponse caractérisant l'action sismique.

Les règles parasismiques françaises (PS 69 et futures PS) proposent, pour les bâtiments suffisamment réguliers, une méthode simplifiée qui permet de ne considérer que le mode fondamental, déterminé de manière approchée, dans deux directions perpendiculaires successives.

Il est dans ce cas inutile de procéder à l'analyse modale du bâtiment et les outils informatiques classiques de calcul statique peuvent convenir.

Mais cette simplification n'est plus licite pour les bâtiments irréguliers : il est alors indispensable de prendre en compte les modes propres supérieurs déterminés à partir d'un modèle à trois dimensions.

Force est de constater que les outils de calcul dont dispose habituellement l'ingénieur ne lui permettent pas d'envisager facilement des approches aussi sophistiquées.

Le but de cet article est de présenter le logiciel EPICENTRE, qui permet de procéder, dans le cas général, à l'analyse modale et au calcul sismique des systèmes de contreventement constitués de voiles reliés par des linteaux.

Ce logiciel est l'extension dynamique du logiciel EOLE, destiné au calcul statique des systèmes de contreventement voiles + linteaux par la méthode des matrices transfert [5], et que nous avons déjà présenté dans ces colonnes [6].

Nous exposerons tout d'abord les aspects théoriques de la méthode employée, puis nous donnerons une description rapide du logiciel, accompagnée d'un exemple commenté.

2. APPLICATION DE LA MÉTHODE DES MATRICES TRANSFERT A L'ANALYSE DYNAMIQUE DES BÂTIMENTS

2.1. Préambule

La méthode de Vianello-Stodola (exposée en annexes des règles PS 69) permet d'obtenir les premiers modes propres d'une structure quelconque (périodes + déformées) en procédant à une suite de calculs statiques.

Cette méthode converge assez vite et se révèle intéressante à chaque fois que l'on dispose d'une méthode de calcul statique rapide, sur laquelle on pourra itérer efficacement.

Or, dans le domaine des contreventements tridimensionnels voiles + linteaux, la méthode des matrices transfert [5] permet d'effectuer les calculs statiques avec une grande rapidité et une grande précision.

Le module d'analyse modale du logiciel EPICENTRE utilise donc de manière concomitante la méthode de Vianello-Stodola et la méthode des matrices transfert.

Nous rappellerons ci-après les grandes lignes de la méthode des matrices transfert appliquée au calcul statique des contreventements. Nous exposerons ensuite la mise en œuvre de la méthode de Vianello-Stodola.

2.2. Rappel : calcul statique des contreventements « voiles + linteaux » par la méthode des matrices transfert

Nous rappellerons simplement le principe de la méthode, le lecteur désirant plus de détails pouvant les trouver dans la référence [5].

2.2.1. Hypothèses fondamentales

- Les calculs se font dans le domaine élastique linéaire ;
- Le fonctionnement des voiles en flexion, torsion gauchie et compression-traction est régi par la théorie usuelle des poutres sans distorsion généralisée par Vlassov [9] ;
- Les planchers sont indéformables dans leur plan. Cette indéformabilité transversale des sections horizontales de l'immeuble est étendue aux niveaux entre planchers.

2.2.2. Caractéristiques des voiles

- Les voiles sont des surfaces prismatiques ouvertes quelconques ;
- La disposition des voiles en plan est quelconque ;
- Les voiles peuvent présenter des discontinuités brusques de section transversale (avec disparition éventuelle de certains voiles dans les étages supérieurs) ;
- Les déformations d'effort normal et le gauchissement propre des voiles sont pris en compte dans le calcul.

2.2.3. Caractéristiques des linteaux

- Les files de linteaux relient deux voiles voisins ou deux bords d'un même voile ;
- Les files de linteaux peuvent être irrégulières (variation des portées et des inerties sur la hauteur d'une file) ;
- Il est possible « d'agrafer » ponctuellement deux voiles voisins en utilisant des liaisons rigides.

2.2.4. Conditions de fondation

- Les voiles sont fondés rigidement (encastrement parfait) ou élastiquement ;
- Des dénivellations verticales peuvent être imposées aux fondations (tassements différentiels...).

2.2.5. Chargements appliqués

- Charges horizontales concentrées ou réparties (effort horizontal de direction quelconque + couple de torsion).
- Charges verticales excentrées appliquées directement en certains points de certains voiles.

2.2.6. Vecteur-état d'une section de cote z

Considérons une « tranche » du bâtiment correspondant par exemple à une hauteur d'étage et comprise entre les cotes z_i et z_{i+1} ($z_i < z_{i+1}$).

Nous supposons que cette tranche de bâtiment ne comporte pas de linteaux et ne présente pas de variation de section des voiles.

Du fait de l'indéformabilité transversale des sections horizontales, les m voiles qui constituent cette tranche de bâtiment travaillent conjointement en flexion et en torsion. Chaque voile a, par contre, un comportement indépendant des autres en compression-traction (la tranche ne comporte pas de linteaux...).

Soit C_{xyz} le repère principal du système formé par les m voiles de la tranche $[z_i, z_{i+1}]$ travaillant conjointement (C est le centre de torsion).

L'état d'une section courante de cote z de la tranche $[z_i, z_{i+1}]$ est entièrement représenté par le **vecteur état** $E(z)$ comportant les $12 + 2m$ composantes suivantes :

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

avec...

v_x, v'_x, M_y, T_x : paramètres de flexion d'ensemble dans le plan Cxz (M_y est le moment d'axe Cy)
 v_y, v'_y, M_x, T_y : paramètres de flexion d'ensemble dans le plan Cyz (M_x est le moment d'axe Cx)
 θ, θ', B, H : paramètres de torsion d'ensemble autour de Cz
 u_j, N_j : paramètres de compression-traction du voile j ($1 \leq j \leq m$)

2.2.7. Matrices transfert

En appliquant les relations classiques de la théorie des poutres généralisée par Vlassov [9] à la tranche de bâtiment $[z_i, z_{i+1}]$, il est possible de construire une matrice $\mathcal{M}_{i,i+1}$ permettant d'écrire : $E(z_{i+1}) = \mathcal{M}_{i,i+1} \cdot E(z_i)$

$\mathcal{M}_{i,i+1}$ est la **matrice-transfert** permettant de « passer » le tronçon régulier $[z_i, z_{i+1}]$.

Cette matrice comporte des termes directement liés aux caractéristiques géométriques et mécaniques du tronçon et des termes représentant les éventuelles charges appliquées sur le tronçon.

On peut de même construire des matrices transfert permettant de « passer » non plus des tranches régulières de contreventement, mais des niveaux qui présentent des singularités : niveau à linteaux, niveau de changement de section transversale des voiles, fondation élastiques, etc...

Par exemple, si le niveau z_i comporte des linteaux, on construira une matrice \mathcal{M}_{z_i} telle que :

$$E(z_{i+}) = \mathcal{M}_{z_i} \cdot E(z_{i-})$$

2.2.8. Traitement matriciel

Soit h la cote du sommet de l'immeuble. Il est clair que si nous partons de $E(0)$ (base de l'immeuble) et si nous cheminons de tronçon en tronçon, en prenant en compte les singularités rencontrées et en multipliant à chaque fois par la matrice transfert qui convient, nous construirons par produits successifs la matrice transfert globale \mathcal{M} du bâtiment soumis à un chargement donné : $E(h) = \mathcal{M} \cdot E(0)$.

Dans ce système linéaire de $12 + 2m$ équations, les $12 + 2m$ composantes de $E(h)$ et les $12 + 2m$ composantes de $E(0)$ sont inconnues. Par contre tous les termes de \mathcal{M} sont connus puisque \mathcal{M} est le résultat du produit en cascade des matrices transfert élémentaires rencontrées sur la hauteur du bâtiment.

Les $12 + 2m$ équations supplémentaires nécessaires pour déterminer toutes les composantes de $E(0)$ et $E(h)$ s'obtiennent en écrivant les conditions aux limites (déplacements ou dérivées de déplacements nuls à la base, efforts internes nuls au sommet).

Ayant calculé les composantes non nulles de $E(0)$, il ne reste plus qu'à reprendre le calcul par produits en cascade décrit au début du paragraphe pour obtenir les composantes du vecteur état de chaque niveau d'étage du bâtiment.

Ces composantes permettent alors de déterminer les résultats utiles à chaque niveau d'étage : déplacements horizontaux et verticaux, efforts et contraintes dans les voiles, efforts dans les linteaux...

La taille de la matrice transfert globale du bâtiment ne dépend ni du nombre d'étages ni du nombre de files de linteaux et est très réduite si on la compare par exemple à celle d'une matrice de rigidité. En outre, le calcul de cette matrice, par produits successifs des matrices de tronçons réguliers et de singularités, est rapide car ces diverses matrices sont très « creuses ».

Enfin, du fait de la nullité de la moitié des composantes de $E(h)$, le système linéaire à résoudre pour obtenir les composantes non nulles de $E(0)$ est de rang $6 + m$ seulement...

Toutes ces raisons expliquent les performances intéressantes, en temps de calcul et en occupation mémoire, de la méthode des matrices transfert appliquée au calcul des systèmes tridimensionnels de voiles.

2.3. Utilisation de la méthode de Vianello-Stodola

2.3.1. Principe général de la méthode

Considérons une structure élastique quelconque comportant n degrés de liberté et dont les masses sont supposées concentrées sur ces n degrés de liberté.

Cette structure possède n modes propres de vibration qui sont caractérisés...

- par leur période T_j ($1 \leq j \leq n$)
- par leur déformée Φ_j ($1 \leq j \leq n$).

Les déformées Φ_j (déplacements au droit des n degrés de liberté) étant définies à une homothétie près, il est d'usage de les normer, par exemple par rapport aux masses : chaque vecteur modal Φ_j est alors ajusté pour obtenir...

$$\Phi_j^T M \Phi_j = 1 \quad (M \text{ est la matrice des masses, c'est-à-dire la matrice diagonale des } M_i)$$

La méthode de Vianello-Stodola permet de déterminer le premier mode de vibration, puis le deuxième, le troisième, etc...

Le processus pour l'obtention du premier mode est le suivant.

Donnons-nous une déformée hypothétique initiale normée H_0 et appliquons à la structure le chargement obtenu en multipliant à chaque degré de liberté i le déplacement $H_0(i)$ par M_i (M_i masse ou inertie massique du degré de liberté i).

En utilisant une méthode de calcul statique de notre choix, nous déterminons la déformée D_0 de la structure soumise à ce chargement.

D_0 constitue une première approximation du vecteur modal du mode fondamental. Une valeur approchée du carré de la pulsation $\omega_0 = 2\pi/T_0$ nous est donnée en faisant coïncider deux points homologues de H_0 et D_0 (par exemple le point de plus grande élévation, au degré de liberté k) :

$$\text{valeur approchée de } \omega_0^2 = D_0(k)/H_0(k)$$

En normalisant D_0 par rapport à la masse, on obtient une nouvelle déformée hypothétique H_1 à partir de laquelle nous recommençons les opérations...

La convergence du processus est assurée quelle que soit la déformée initiale et est généralement rapide.

La méthode permet aussi de déterminer les caractéristiques de chacun des modes suivants. Pour déterminer le j^{me} mode il faut :

- rechercher d'abord les caractéristiques des modes de rang inférieur à j ,
- appliquer le processus décrit pour le mode fondamental, en ayant soin « d'épurer » la déformée hypothétique, à chaque itération, par soustraction des composantes parasites correspondant aux modes précédents.

Par exemple, la déformée initiale épurée H'_0 du j^{me} mode sera obtenue à partir de H_0 par :

$$H'_0 = H_0 - \lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2 - \lambda_3 \Phi_3 - \dots - \lambda_{j-1} \Phi_{j-1}$$

avec

$$\lambda_i = H'_0 M \Phi_i / \Phi_i^T M \Phi_i \quad (1 \leq i < j)$$

2.3.2. Application à l'analyse modale des systèmes tridimensionnels de voiles

Notre but est de rechercher les premiers modes propres d'un système de contreventement voiles + linteaux. Plus précisément, nous rechercherons les premiers modes propres de flexion-torsion, puisque nous savons que les modes de vibration verticaux ont des périodes très courtes et sont donc de rang élevé.

Nous supposons que les masses sont concentrées au droit de chaque plancher d'étage.

G_i étant le centre de gravité de l'étage i , nous noterons...

- M_i la masse totale de l'étage i
 - J_i le moment d'inertie massique de l'étage i
 - DX_i le déplacement de G_i selon la direction OX
 - DY_i le déplacement de G_i selon la direction OY
 - θ_i l'angle de torsion de l'étage i
- ($OXYZ$ est le repère général choisi par l'utilisateur).

Si n est le nombre d'étages, nous modélisons ainsi le bâtiment comme une structure à $3n$ degrés de liberté, qui sont les déplacements horizontaux (deux translations, une rotation) des centres de gravité des n étages. Nous appellerons M la matrice des masses (matrice diagonale des M_i, J_i).

En toute rigueur, il pourrait être envisagé de prendre en compte d'autres degrés de liberté : les déplacements verticaux de chacun des voiles, le gauchissement, la rotation des sections horizontales des voiles autour de OX et OY (inclinaison des sections planes en flexion)... La formulation par la méthode des matrices transfert le permettrait sans grandes difficultés. Mais ce serait au prix d'un alourdissement des calculs et d'une augmentation de la mémoire vive nécessaire. En outre, le très faible gain de précision à attendre serait illusoire compte tenu des incertitudes diverses présentes par ailleurs (caractéristiques du béton, fissuration des linteaux, calcul de certaines masses). Ajoutons que l'erreur commise conduit à sous-estimer les périodes des modes propres ce qui, en calcul sismique, va dans le sens de la sécurité.

La recherche des modes propres est faite par application stricte de la méthode de Vianello-Stodola, selon le processus exposé dans le paragraphe précédent. En pratique, pour le j^{me} mode...

- (1) épuration de la déformée initiale H_0 (la déformée épurée est notée H_j),
- (2) normalisation de H_j par rapport à la masse ($H_j^T M H_j = 1$),

- (3) calcul par la méthode des matrices transfert de la structure soumise au chargement $M \cdot H_j$ et stockage de D_j , vecteur des déplacements des G_i ($1 \leq i \leq n$),
- (4) calcul de la valeur approchée de ω_j ,
- (5) épuration de D_j puis normalisation par rapport à la masse,
- (6) retour à l'étape (3) ci-dessus...

Les itérations sont suspendues lorsque deux approximations successives de ω_j sont jugées suffisamment proches. Pour chaque mode j nous obtenons ainsi :

- la période $T_j = 2\pi/\omega_j$,
- la déformée Φ_j .

3. APPLICATION DE LA MÉTHODE DES MATRICES TRANSFERT AU CALCUL SISMIQUE DES BÂTIMENTS

3.1. Rappels : équations de base, facteurs de participation, masses modales effectives

Considérons un bâtiment modélisé comme en 2.3.2 :

- masses et moments d'inertie massiques concentrés aux centres de gravité G_i des n étages,
- 3 degrés de liberté par étage (translation horizontale des G_i et torsion d'ensemble).

Supposons que la base de ce bâtiment soit soumise à un mouvement sismique horizontal s'exerçant dans une direction déterminée.

Soit ϕ l'angle de cette direction avec l'axe OX d'un repère $(OXYZ)$ fixe.

Le mouvement sismique appliqué à la base de l'immeuble est caractérisé par son amplitude $v(t)$ par rapport à ce repère fixe.

Soit $D(t)$ le vecteur des déplacements relatifs des G_i en fonction du temps, par rapport à un repère mobile lié à la base du bâtiment.

A tout instant, le déplacement absolu $D_a(t)$ des G_i par rapport au repère fixe se déduit de $D(t)$ par une translation horizontale de composantes $v(t) \cos(\phi)$, $v(t) \sin(\phi)$.

Nous pouvons noter : $D_a(t) = D(t) + v(t) \cdot U_\phi$, expression dans laquelle U_ϕ est un vecteur de dimension $3n$ associé à la direction ϕ et de composantes $(\cos(\phi), \sin(\phi), 0, \cos(\phi), \sin(\phi), 0, \dots)$.

Le vecteur des efforts d'inertie développés par les masses et les moments d'inertie massiques est égal à $MD_a''(t)$, c'est-à-dire à $MD''(t) + v''(t)MU_\phi$ (M est la matrice des masses généralisées, c'est-à-dire la matrice diagonale des M_i, J_i).

Ces efforts d'inertie sont équilibrés par les efforts internes et les efforts dus aux frottements (supposés proportionnels à la vitesse de chaque degré de liberté dans le repère mobile) :

$$MD''(t) + v''(t)MU_\phi + KD(t) + CD'(t) = 0$$

(K est la matrice de rigidité et C la matrice d'amortissement) ou encore...

$$MD''(t) + CD'(t) + KD(t) = -v''(t)MU_\phi \quad (1)$$

Nous pouvons décomposer $D(t)$ sur la base formée par les $3n$ vecteurs modaux Φ_i du bâtiment :

$$D(t) = \sum y_i(t)\Phi_i$$

En multipliant (1) à gauche par Φ_j^T ($1 \leq j \leq 3n$) et en remplaçant $D(t)$ par $\sum y_i(t)\Phi_i$ nous obtenons les $3n$ équations suivantes :

$$\sum \Phi_j^T M \Phi_i y_i''(t) + \sum \Phi_j^T C \Phi_i y_i'(t) + \sum \Phi_j^T K \Phi_i y_i(t) = -v''(t)\Phi_j^T M U_\phi$$

Du fait des propriétés d'orthogonalité des Φ_i , les produits $\Phi_j^T M \Phi_i$, $\Phi_j^T K \Phi_i$ et $\Phi_j^T C \Phi_i$, sont nuls si $i \neq j$. Les $3n$ équations deviennent :

$$\Phi_j^T M \Phi_j y_j''(t) + \Phi_j^T C \Phi_j y_j'(t) + \Phi_j^T K \Phi_j y_j(t) = -v''(t)\Phi_j^T M U_\phi \quad (1 \leq j \leq 3n)$$

Posant $m_j = \Phi_j^T M \Phi_j$, $k_j = \Phi_j^T K \Phi_j$ et $c_j = \Phi_j^T C \Phi_j$, nous écrirons :

$$m_j y_j''(t) + c_j y_j'(t) + k_j y_j(t) = -v''(t)\Phi_j^T M U_\phi \quad (1 \leq j \leq 3n)$$

ou encore, en posant

$$\omega_j^2 = k_j/m_j, \quad \xi_j = c_j/2m_j \omega_j$$

et

$$\mathcal{P}_j(\phi) = \Phi_j^T M U_\phi / \Phi_j^T M \Phi_j = \Phi_j^T M U_\phi / m_j$$

$$y_j''(t) + 2\xi_j \omega_j y_j'(t) + \omega_j^2 y_j(t) = -v''(t)\mathcal{P}_j(\phi) \quad (1 \leq j \leq 3n)$$

Nous reconnaissons dans cette équation l'équation classique régissant le comportement d'un oscillateur simple de pulsation ω_j soumis à une accélération extérieure variable.

Nous constatons que chacune de ces $3n$ équations en $y_j(t)$ est indépendante et que la pulsation ω_j est bien celle du mode propre de rang j associé ($\omega_j^2 = \Phi_j^T K \Phi_j / \Phi_j^T M \Phi_j$).

Rappelons que nous avons exprimé le vecteur des déplacements relatifs en fonction des $3n$ modes propres du bâtiment :

$$D(t) = \sum y_j(t)\Phi_j$$

Le mouvement vibratoire du bâtiment est donc la superposition des mouvements vibratoires découplés des $3n$ modes propres du bâtiment, réagissant indépendamment les uns des autres à l'action sismique de direction ϕ .

La quantité $\mathcal{P}_j(\phi)$, appelée **facteur de participation du mode j selon la direction ϕ** , caractérise la réponse du mode j à une excitation extérieure de direction ϕ ...

La valeur de $\mathcal{P}_j(\phi)$ ne dépend que de l'angle ϕ , de la déformée propre Φ_j et du **type de normalisation** de cette dernière (si on multiplie Φ_j par k , $\mathcal{P}_j(\phi)$ est divisé par k).

Introduisons

$$\mathcal{M}_j(\phi) = (\Phi_j^T M U_\phi)^2 / \Phi_j^T M \Phi_j = \Phi_j^T M \Phi_j \cdot \mathcal{P}_j(\phi)^2 = m_j \mathcal{P}_j(\phi)^2$$

$\mathcal{M}_j(\phi)$ a la dimension d'une masse et est appelée **masse modale effective du mode i pour la direction ϕ** .

On peut montrer que $M_j(\phi)$ représente la part de la masse totale vibrant dans le mode de rang j lorsqu'il est excité par un séisme de direction ϕ .

On peut aussi montrer que la somme des masses modales effectives de tous les modes pour une direction donnée est égale à la masse totale.

3.2. Quelques propriétés des facteurs de participation et des masses modales effectives

Le but de ce paragraphe est de démontrer quelques résultats originaux que nous utiliserons par la suite et qui concernent les facteurs de participation et les masses modales effectives.

Rappelons que...

— le facteur de participation du mode j pour la direction ϕ est

$$\mathcal{P}_j(\phi) = \Phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{U}_\phi / \Phi_j^T \mathbf{M} \Phi_j = \Phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{U}_\phi / m_j$$

— la masse modale effective du mode j pour la direction ϕ est

$$M_j(\phi) = m_j \mathcal{P}_j(\phi)^2$$

(avec $m_j = \Phi_j^T \mathbf{M} \Phi_j$. Remarquons que $m_j = 1$ si les Φ_j ont été normés par rapport aux masses : cf. 2.3.1).

Les composantes de \mathbf{U}_ϕ étant $(\cos(\phi), \sin(\phi), 0, \cos(\phi), \sin(\phi), 0, \dots)$, celles de \mathbf{U}_0 sont $(1, 0, 0, 1, 0, 0, \dots)$ et celles de $\mathbf{U}_{\pi/2}$ sont $(0, 1, 0, 0, 1, 0, \dots)$.

Nous pouvons donc écrire

$$\mathbf{U}_\phi = \cos(\phi) \mathbf{U}_0 + \sin(\phi) \mathbf{U}_{\pi/2}$$

Ce qui entraîne $\mathcal{P}_j(\phi) = \cos(\phi) \mathcal{P}_j(0) + \sin(\phi) \mathcal{P}_j(\pi/2)$.

Dérivant par rapport à ϕ , nous trouvons

$$\mathcal{P}'_j(\phi) = -\sin(\phi) \mathcal{P}_j(0) + \cos(\phi) \mathcal{P}_j(\pi/2)$$

Les extrema de $\mathcal{P}_j(\phi)$ correspondent aux valeurs ϕ_e de ϕ qui annulent $\mathcal{P}'_j(\phi)$...

$$\phi_e = \arctan(\mathcal{P}_j(\pi/2) / \mathcal{P}_j(0)) \quad [\pi]$$

Les minima sont les opposés des maxima : en effet $\mathcal{P}_j(\phi_e) = -\mathcal{P}_j(\phi_e + \pi)$.

Les facteurs de participation des directions perpendiculaires aux directions des extrema sont nuls : $\mathcal{P}_j(\phi_e + \pi/2) = 0$. En effet

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_j(\phi_e + \pi/2) &= \cos(\phi_e + \pi/2) \mathcal{P}_j(0) + \sin(\phi_e + \pi/2) \mathcal{P}_j(\pi/2) \\ \mathcal{P}_j(\phi_e + \pi/2) &= -\sin(\phi_e) \mathcal{P}_j(0) \\ &\quad + \cos(\phi_e) \mathcal{P}_j(\pi/2) = \mathcal{P}'_j(\phi_e) = 0 \end{aligned}$$

Les masses modales effectives $M_j(\phi) = m_j \mathcal{P}_j(\phi)^2$ sont donc maximales pour ϕ_e et nulles pour $\phi_e + \pi/2$...

Nous allons maintenant démontrer que la somme des masses modales effectives d'un mode pour deux directions perpendiculaires quelconques est égale à la masse modale effective maximale du mode.

Par définition, $M_j(\phi_e) = m_j \mathcal{P}_j(\phi_e)^2$.

Comme $\mathcal{P}'_j(\phi_e) = 0$ (extremum), nous pouvons écrire...

$$\begin{aligned} M_j(\phi_e) &= m_j \mathcal{P}_j(\phi_e)^2 + m_j \mathcal{P}'_j(\phi_e)^2 \\ &= m_j (\cos(\phi_e) \mathcal{P}_j(0) + \sin(\phi_e) \mathcal{P}_j(\pi/2))^2 \\ &\quad + m_j (-\sin(\phi_e) \mathcal{P}_j(0) + \cos(\phi_e) \mathcal{P}_j(\pi/2))^2 \\ &= m_j \mathcal{P}_j(0)^2 + m_j \mathcal{P}_j(\pi/2)^2 = M_j(0) + M_j(\pi/2) \end{aligned}$$

Cette relation est valable quel que soit le choix du repère OXY fixe, donc pour deux directions perpendiculaires quelconques.

3.3. Facteurs de participation de torsion et moments d'inertie massiques modaux

Les facteurs de participation mis en évidence précédemment caractérisent la réponse des composantes de flexion des modes propres j à une sollicitation sismique. Mais un séisme excitera généralement aussi les composantes de torsion de chacun des modes propres, pour lesquels nous définirons :

— des facteurs de participation de torsion

$$\mathcal{P}_{\theta j} = \Phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{U}_\theta / \Phi_j^T \mathbf{M} \Phi_j = \Phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{U}_\theta / m_j \quad (1 \leq j \leq m)$$

— des moments d'inertie massiques modaux

$$\mathcal{I}_j = m_j \mathcal{P}_{\theta j}^2 \quad (1 \leq j \leq m)$$

avec...

$m_j = \Phi_j^T \mathbf{M} \Phi_j$ ($m_j = 1$ si les Φ_j ont été normés par rapport aux masses : cf. 2.3.1).

$$\mathbf{U}_\theta = (0, 0, 1, 0, 0, 1, \dots, 0, 0, 1).$$

La somme des moments d'inertie massiques modaux de l'ensemble des modes est égale au moment d'inertie massique total du bâtiment (c'est-à-dire la somme des inerties massiques de tous les étages).

Les modes propres à torsion prépondérante auront bien entendu un grand moment d'inertie massique modal (représentant un pourcentage élevé du moment d'inertie massique total).

3.4. Calcul sismique selon les règles PS 69

Les règles 69 raisonnent implicitement sur des bâtiments réguliers représentés par un modèle plan. Leur application à des bâtiments irréguliers représentés par un modèle à trois dimensions pose donc un certain nombre de problèmes d'interprétation... Nous remercions vivement le BUREAU VERITAS, et plus particulièrement MM. Souloumiac et Locci pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée dans ce délicat travail d'exégèse...

Les règles PS 69 représentent l'action sismique de calcul par sa composante horizontale, sa composante verticale et éventuellement sa composante de torsion.

La composante horizontale doit être considérée dans deux directions perpendiculaires successives.

3.4.1. Composante sismique horizontale

a) Sélections des modes propres

Le mouvement vibratoire du bâtiment est la superposition des mouvements vibratoires découplés des $3n$ modes propres se comportant comme des oscillateurs simples indépendants. Nous pouvons donc étudier séparément l'action du séisme sur chaque mode, puis combiner l'ensemble : cette méthode générale est communément appelée « méthode modale spectrale ».

En fait, pour les bâtiments, l'effet des premiers modes est toujours nettement prépondérant : c'est pourquoi les règles PS 69, qui raisonnent implicitement sur des bâtiments réguliers représentés par un modèle plan, ne prennent en compte que les trois premiers modes propres, voire même simplement le premier...

Cette simplification ne peut plus être conservée lorsque le bâtiment est irrégulier et est représenté par un modèle tridimensionnel : en effet, dans ce type de modélisation, on peut grossièrement classer les modes propres de vibration horizontaux en trois catégories, d'après « l'allure » de leur déformée [2] : d'une part les modes de vibration à torsion prépondérante et d'autre part deux familles de modes de vibration à flexion prépondérante, orientées selon deux directions quasi-orthogonales.

Le choix des modes prépondérants pour un calcul sismique dans une direction donnée est donc plus délicat, chacune des trois catégories pouvant être mobilisée.

Nous avons vu qu'un séisme de direction ϕ excitera chacun des modes j proportionnellement au facteur de participation $\mathcal{P}_j(\phi)$. Il serait donc possible de classer les modes en fonction de leur $\mathcal{P}_j(\phi)$ afin de déterminer ceux qui sont prépondérants.

Il est en fait plus commode de raisonner sur les masses modales effectives $\mathcal{M}_j(\phi)$, qui représentent la part de la masse totale du bâtiment mobilisée dans chaque mode. En effet la somme des masses effectives pour une direction ϕ est égale à la masse totale : par conséquent, si la masse effective cumulée des modes pris en compte est suffisamment proche de la masse totale, nous serons sûrs de ne pas oublier un mode influent.

En pratique, nous conviendrons de rechercher les j premiers modes correspondant à une masse modale effective cumulée d'au moins 90 % de la masse totale pour chacune des deux directions OX et OY. La masse effective des modes négligés sera affectée au dernier mode calculé (cette démarche est celle des nouvelles règles PS...).

b) Calcul des coefficients sismiques

Le chargement sismique associé au mode propre de rang j pour la direction ϕ est :

$$F_j = \alpha \cdot \beta(T_j) \cdot \delta \cdot \mathcal{P}_j(\phi) \cdot M \cdot \Phi_j \cdot g$$

F_j	vecteur des efforts sismiques appliqués sur les G_i selon chacun des $3n$ degrés de libertés,
α	coefficient d'intensité des règles (3,112-12),
$\beta(T_j)$	coefficient de réponse des règles (3,112-13),
δ	coefficient de fondation des règles (3,112-15),
$\mathcal{P}_j(\phi)$	coefficient de participation du mode j dans la direction ϕ ,
M	matrice diagonale des masses généralisées,
Φ_j	vecteur des déformées propres du mode j ,
g	accélération de la pesanteur.

On vérifie facilement que les termes $\mathcal{P}_j(\phi) \cdot \Phi_j$ correspondent aux γ des règles (3,112-14).

Les coefficients $\beta(T_j)$ sont calculés conformément aux indications du § 3,114-2 des règles et dépendent donc du degré d'amortissement (faible/moyen/normal) du bâtiment.

c) Choix des deux directions perpendiculaires de calcul

Il est logique de choisir les deux directions correspondant aux deux directions préférentielles de vibration par flexion évoquées au paragraphe a) précédent.

En pratique, nous déterminerons ces deux directions de la manière suivante :

- la direction ϕ_1 sera la direction de participation maximale (notée ϕ_e en 3.2) du mode présentant la plus grande masse effective maximale,
- la direction ϕ_2 sera perpendiculaire à la direction ϕ_1 .

d) Calcul pratique

- recherche des modes propres par la méthode de Vianello-Stodola avec arrêt lorsque la masse modale cumulée des modes propres suivant OX et suivant OY atteint 90 % de la masse totale du bâtiment,
- détermination des deux directions de calcul,
- calcul des facteurs de participation des modes retenus selon ces deux directions,
- report de la masse modale des modes négligés sur le dernier mode calculé,
- calcul des chargements sismiques statiques correspondant à chaque mode et à chaque direction,
- calcul statique du bâtiment soumis à chacun de ces chargements,
- pour chacune des deux directions de calcul, combinaison quadratique des valeurs calculées pour chaque mode retenu.

Nous obtenons ainsi, pour chacune des deux directions de calcul, le maximum probable des résultats aux étages (déplacements, efforts internes, contraintes...). Ces valeurs sont positives car issues de combinaisons quadratiques, mais elles doivent bien sûr être exploitées avec les deux signes puisque les mouvements du bâtiment sont alternés.

Pour rester dans l'esprit des règles PS 69 (§ 3,111-2), et bien que cela ne soit pas conforme aux conceptions actuelles [1], les résultats obtenus pour chacune des deux directions horizontales ne sont pas combinés à leur tour (seconde combinaison quadratique ou combinaison de NEWMARK [8]) pour tenir compte de l'effet simultané des deux mouvements sismiques...

3.4.2. Composante sismique verticale

La concentration de la masse et du moment d'inertie massique des planchers d'étage au droit de leur centre de gravité n'est plus justifiée pour les mouvements de vibration verticale : il faut dans ce cas raisonner voile par voile...

Introduisons les charges permanentes et d'exploitation appliquées à l'étage i sur la voile k :

- P_{ik} charge permanente totale (y compris le poids propre du voile),
- Q_{tik} charge d'exploitation totale prise en compte dans les calculs habituels de descente de charges (avec dégression des surcharges éventuelles, etc...),
- Q_{rik} charge d'exploitation réduite soumise à l'action sismique (§ 3,101).

Les deux dernières charges correspondent à deux hypothèses de descente de charges pour les charges d'exploitation : descente de charges « lourde » et descente de charges « allégée ». Les charges d'exploitation réduites serviront par ailleurs à calculer les efforts sismiques verticaux.

Appliquant les règles (§ 1,114-122), nous calculons à chaque étage un coefficient sismique global σ_x à partir du coefficient sismique horizontal maximal σ_H de l'étage (σ_H est calculé selon la direction ϕ_1 avec le mode le plus influent qui a servi à déterminer cette direction ϕ_1) :

$$\sigma_x = \sigma_H / \max(\alpha^{1/2}, 1)$$

A chaque étage i le voile k est soumis à la force verticale sismique V_{ik} , ascendante ou descendante :

$$V_{ik} = \pm \sigma_x \cdot (P_{ik} + Q_{rik})$$

Les efforts axiaux de descente de charges (effet des P_{ik} , Q_{tik} et Q_{rik}) et ceux dus aux V_{ik} sont calculés voile par voile par cumul des charges appliquées à chaque étage.

3.4.3. Contraintes normales dans les voiles

Considérons un point de calcul situé sur le voile k à l'étage i et faisons l'inventaire des différentes contraintes normales partielles que nous savons y calculer :

- σ_H contrainte normale positive due à l'une des deux composantes sismiques horizontales,
- σ_V contrainte normale positive due à la composante sismique verticale,
- σ_P contrainte normale positive due aux charges permanentes,
- σ_{Qt} contrainte normale positive due aux charges d'exploitation totales,
- σ_{Qr} contrainte normale positive due aux charges d'exploitation réduites.

En application des règles PS 69 (§ 3,103) nous calculerons comme suit, au point considéré, les deux contraintes normales résultantes maximale et minimale utilisées pour dimensionner les voiles (une contrainte positive indique une compression) :

$$\sigma_{\max} = + \sigma_H + \sigma_V + \sigma_P + \sigma_{Qt}$$

$$\sigma_{\min} = - \sigma_H - \sigma_V + \sigma_P + \sigma_{Qr}$$

3.4.4. Composante sismique de torsion

Si le bâtiment étudié entre dans le champ de l'article 3,111-13 des règles, il est demandé de tenir compte des sollicitations de torsion accidentelles en écartant les centres de gravité des étages de leur position théorique.

En pratique, cette correction ne nous posera pas de difficulté particulière : il suffira d'utiliser les positions excentrées des centres de gravité pour le calcul des chargements sismiques horizontaux...

3.4.5. Déplacements horizontaux et verticaux

Nous avons calculé en 3.4.2. les trois déplacements d'ensemble de chaque étage (2 translations et l'angle de torsion) et les déplacements verticaux des points de calcul des voiles, sous l'action de chacune des composantes sismiques horizontales.

Conformément à l'addendum AD 3,21 les valeurs trouvées doivent être multipliées par 2 pour tenir compte de la plastification et de la fissuration des sections résistantes des voiles.

3.5. Calcul sismique selon les futures règles PS

Le texte des futures règles étant encore susceptible d'évolution au moment de la rédaction du présent document, nous nous contenterons d'une revue rapide des problèmes spécifiques liés à l'utilisation de ces règles.

3.5.1. Composantes sismiques horizontales

Le mode de calcul préconisé dans le cas des bâtiments irréguliers est une méthode d'analyse modale spectrale proche dans son principe de celle que nous venons de

détailler pour les règles PS 69. Mais les futures règles sont beaucoup plus explicites que les PS 69 sur les modalités d'application pratique de cette méthode.

a) Sélection des modes propres

Les critères de sélection que nous avons retenus en 3.4.1 a) sont en fait ceux des nouvelles règles :

- somme des masses modales des modes négligés inférieure à 10 %,
- somme des masses modales négligées reportée sur le dernier mode retenu.

b) Calcul des coefficients sismiques

Dans le cas des bâtiments courants, nous admettrons que la structure résistante ne reste pas constamment dans le domaine élastique linéaire mais subit des incursions en domaine post-élastique. Dans ce cas le chargement sismique associé au mode propre de rang j pour la direction ϕ est :

$$F_j = M \cdot \Phi_j \cdot g \cdot \mathcal{P}_j(\phi) \cdot \mathcal{R}(T_j)/q$$

- F_j vecteur des efforts sismiques appliqués en chacun des $3n$ degrés de liberté,
- M matrice diagonale des masses généralisées,
- Φ_j vecteur des déformées propres du mode j ,
- g accélération de la pesanteur,
- $\mathcal{P}_j(\phi)$ facteur de participation du mode j dans la direction ϕ ,
- q coefficient de comportement,

$$\mathcal{R}(T_j) = a_n \tau \rho \mathcal{R}_d(T_j),$$

- a_n accélération nominale,
- τ coefficient d'amplification topographique,
- ρ correction d'amortissement,
- $\mathcal{R}_d(T_j)$ ordonnée du spectre de dimensionnement normalisé correspondant à T_j .

c) Choix des deux directions de calcul

Nous choisirons les deux mêmes directions que pour les règles PS 69, mais cette fois en application d'une directive clairement exprimée (§ 6.11 plus commentaires) :

« Les composantes horizontales du mouvement de calcul doivent être orientées de façon telle que l'une d'entre elles au moins s'exerce dans une direction aussi voisine que possible de celle de l'un des axes principaux de l'ouvrage ».

d) Calcul pratique

L'analyse modale puis le calcul sismique seront menés exactement comme pour les règles PS 69 aux deux exceptions suivantes près :

- les formules de calcul des chargements sismiques sont évidemment différentes,
- les résultats correspondant à chacune des trois composantes sismiques (deux composantes horizontales et la composante verticale) sont combinés entre eux suivant les formules symboliques suivantes proposées par NEWMARK [8] :

$$S = S_x + \lambda S_y + \mu S_z$$

$$S = \lambda S_x + S_y + \mu S_z \quad (\lambda = \mu = \pm 0,4)$$

$$S = \lambda S_x + \lambda S_y + S_z$$

S_x et S_y représentent un résultat calculé sous l'action de chacune des deux composantes horizontales, S_z le même résultat sous l'effet de la composante verticale (cf. ci-dessous), et S le résultat global sous l'effet simultané des trois composantes. Les valeurs les plus défavorables de S sont seules retenues...

3.5.2. Composante verticale sismique

Les effets de la composante sismique verticale peuvent être négligés si la hauteur du bâtiment est inférieure à 35 m.

Dans le cas contraire, nous utilisons les formules simplifiées du § 6.682 des règles, dont l'application ne soulève pas de difficultés particulières.

Comme dans le cas des règles PS 69 nous distinguons deux familles de charges d'exploitation : les charges d'exploitation totales ($Q_{t_{ik}}$) et les charges réduites ($Q_{r_{ik}}$), soumises à l'action sismique.

3.5.3. Contraintes normales dans les voiles

Notons σ_s la contrainte normale positive maximale obtenue en un point de calcul d'un voile après combinaison selon les formules explicitées en 3.5.1. d) ci-dessus (combinaison de NEWMARK).

En reprenant les notations du paragraphe 3.4.3 pour les contraintes normales positives dues à l'action des charges permanentes et des charges d'exploitations totales ou réduites, nous calculerons comme suit les deux

contraintes normales résultantes — maximale et minimale — utilisées pour dimensionner les voiles (une contrainte positive indique une compression) :

$$\sigma_{\max} = + \sigma_s + \sigma_p + \sigma_{Qr}$$

$$\sigma_{\min} = - \sigma_s + \sigma_p + \sigma_{Qr}$$

3.5.4. Prise en compte des torsions d'axe vertical

En application du § 6.66 des règles et comme pour les règles PS 69 (cf. § 3.4.4 ci-dessus), les torsions accidentelles d'axe vertical sont prises en compte forfaitairement en excentrant de la distance adéquate, dans le fichier de données, les positions des centres de gravité des étages.

3.5.5. Déplacements horizontaux et verticaux

En application du § 6.33 des règles, les déplacements verticaux ou horizontaux déterminés à partir des chargements sismiques explicités en 3.5.1. b) sont multipliés par le coefficient de comportement.

4. LE LOGICIEL EPICENTRE

4.1. Caractéristiques générales

4.1.1. Objectifs

Le logiciel EPICENTRE est destiné à l'analyse des systèmes de contreventement de bâtiment constitués de voiles solidarisés par des linteaux. Il comporte :

- un module de calcul statique,
- un module d'analyse modale,
- un module de calcul sismique selon les règles PS 69 et selon les futures règles PS (en leur état actuel).

Le calcul de descente de charges est effectué simultanément.

Ce logiciel est l'extension dynamique du logiciel EOLE, destiné au calcul statique des systèmes tridimensionnels constitués de voiles reliés par des linteaux, que nous avons déjà présenté dans ces colonnes [6].

Le logiciel EPICENTRE est économique en temps de calcul et en occupation-mémoire et a donc été développé dès l'origine sur micro-ordinateur (Macintosh et IBM PC). Mais, écrit en Fortran 77, il peut être installé sur de nombreux matériels.

Il est facile à utiliser et peut donc être employé systématiquement par l'ingénieur, même pour les bâtiments dits réguliers où il permet une modélisation plus correcte que les méthodes simplifiées tout en conduisant généralement à des efforts moindres.

4.1.2. Références théoriques

Le module de calcul statique utilise la méthode des matrices transfert appliquée aux systèmes tridimensionnels

de voiles, selon les modalités détaillées dans les références [5] et [6].

Le module d'analyse modale utilise de manière concomitante la méthode de Vianello-Stodola et la méthode des matrices transfert selon les modalités détaillées au chapitre 2 ci-dessus.

Le module de calcul sismique met en pratique les développements des chapitres 3.4 et 3.5 du présent document.

4.1.3. Domaine d'utilisation

Le domaine d'utilisation du logiciel permet de décrire sans difficultés les irrégularités de la plupart des bâtiments courants :

a) Hypothèses fondamentales

- Les calculs se font dans le domaine élastique linéaire ;
- le fonctionnement des voiles en flexion, torsion gauchie et compression-traction est régi par la théorie usuelle des poutres sans distorsion généralisée par VLASSOV [9] ;
- les planchers sont indéformables dans leur plan ; cette indéformabilité transversale des sections horizontales de l'immeuble est étendue aux niveaux entre planchers ;
- la masse et l'inertie massique de chaque étage sont concentrées au niveau du plancher de l'étage. Il y a trois degrés de liberté horizontaux par étage : 2 translations et 1 rotation de torsion d'ensemble.

b) Caractéristiques des voiles

- Les voiles sont des surfaces prismatiques ouvertes quelconques ;
- la disposition des voiles en plan est quelconque ;
- les voiles peuvent présenter des discontinuités brusques de section transversale (avec disparition éventuelle de certains voiles dans les étages supérieurs) ;
- les déformations d'effort normal et le gauchissement propre des voiles sont pris en compte dans le calcul.

c) Caractéristiques des linteaux

- Les files de linteaux relient deux voiles voisins ou deux bords d'un même voile ;
- les files de linteaux peuvent être irrégulières (variation des portées et des inerties sur la hauteur d'une file) ;
- il est possible « d'agrafer » ponctuellement deux voiles voisins en utilisant des liaisons rigides.

d) Conditions de fondation

- Les voiles sont fondés rigidement (encastrement parfait) ou élastiquement.

4.1.4. Calculs statiques

Les chargements suivants peuvent être combinés dans un même cas de charge :

- charges horizontales concentrées ou réparties (effort horizontal de direction quelconque + couple de torsion) ;
- charges verticales excentrées appliquées directement en certains points de certains voiles ;
- dénivellations verticales des fondations (tassements différentiels...).

Chaque calcul peut comporter plusieurs cas de charges (avec recherche d'enveloppe).

4.1.5. Analyse modale

Le module d'analyse modale détermine pour chaque mode propre calculé :

- la période ;
- la déformée propre normée selon les masses ;
- les directions de participation maximale et de participation nulle ;
- les facteurs de participation et les masses modales selon OX, OY et les valeurs maximales ;
- les moments d'inertie massiques modaux, caractérisant le comportement en torsion des modes propres.

L'arrêt de l'analyse modale (20 modes au maximum) peut être obtenu lorsque la masse modale cumulée des modes calculés atteint un pourcentage déterminé de la masse totale.

4.1.6. Calcul sismique

a) Règles PS 69

Les calculs sont conduits dans l'esprit des règles PS 69, qui sont implicitement destinées aux bâtiments réguliers représentés par des modèles plans (cf. chapitre 3.4).

Ainsi, les coefficients beta sont calculés selon les directives de l'article 3,114-2 des règles (« structures présentant plusieurs degrés de liberté dans un même plan horizontal »), bien que cet article ait été plutôt rédigé pour prendre en compte certaines irrégularités des modèles plans...

Pour combler d'autres lacunes des PS 69, nous avons adopté les dispositions des nouvelles règles en cours d'élaboration : sélection des modes propres nécessaires au calcul, optimisation du choix des directions des composantes horizontales de calcul...

Nous avons par contre respecté les dispositions clairement exprimées des PS 69 même lorsqu'elles sont contraires aux conceptions actuelles. Ainsi, les résultats des calculs selon les deux composantes sismiques horizontales ne sont pas combinés pour tenir compte de l'effet simultané des deux mouvements sismiques (actuelle combinaison de NEW-MARK [8]...).

b) Nouvelles règles PS

Le module de calcul met en pratique les dispositions prévues par les nouvelles règles PS dans le cas des bâtiments irréguliers (méthode modale spectrale...). Notons à ce propos que l'utilisation systématique de la méthode générale, même pour les bâtiments réguliers, apporte non seulement une modélisation plus satisfaisante mais la plupart du temps des résultats globalement plus favorables que les méthodes simplifiées, plus pénalisantes.

4.2. Introduction des données, présentation des résultats

L'écriture du fichier de données ne nécessite qu'un minimum de calculs préparatoires.

Dans ce fichier de données, les données sont regroupées par nature (cotes d'étages, coordonnées et numéros de points...) en séquences annoncées par des lettres-clé.

Cette organisation des données est associée à une présentation en format libre : l'utilisateur peut ainsi tirer parti des répétitions ou incrémentations rencontrées dans les listes de données. Des commentaires et des lignes blanches peuvent être insérés à volonté dans le fichier pour améliorer son intelligibilité.

La lecture des données s'accompagne de tests détectant les erreurs éventuelles dans la syntaxe ou l'organisation des données. Les erreurs détectées donnent lieu à l'émission de messages insérés derrière les séquences de données erronées. L'utilisateur peut utiliser le système d'unités international (système S.I.) ou l'ancien système d'unités MKS (efforts en tonnes).

Après lecture du fichier des données, celles-ci sont imprimées dans des tableaux récapitulatifs. Des tests supplémentaires vérifient la compatibilité et la cohérence des données entre elles. Les messages d'erreurs correspondants sont insérés dans les tableaux concernés.

L'utilisateur peut obtenir le dessin des plans d'étages sur écran graphique ou sur traceur.

Le calcul proprement dit n'est effectué que si aucune erreur n'a été détectée. Afin de faciliter l'analyse ou l'exploitation des résultats, ceux-ci sont rassemblés en tableaux spécifiques ordonnés étage par étage (cf. exemple ci-après).

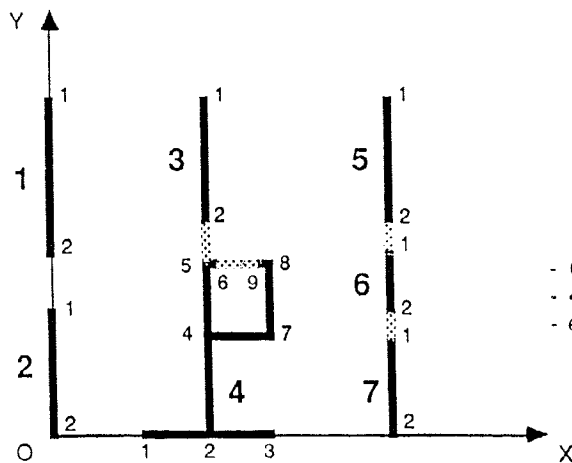
4.3. Exemple commenté

Vérification au séisme d'un bâtiment R + 9, selon les règles PS 69...

4.3.1. Description du bâtiment

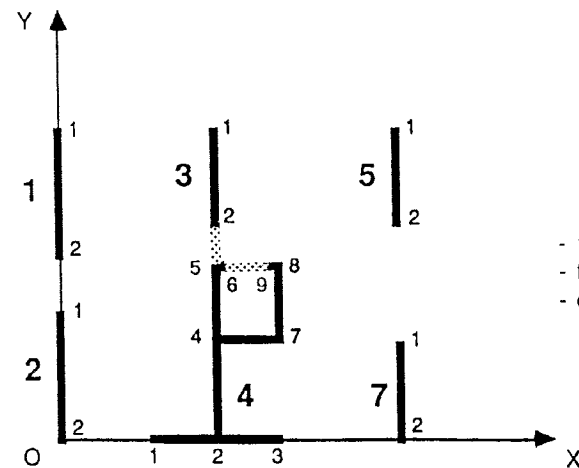
a) Caractéristiques générales

- Bâtiment R + 9 de 27,00 m de hauteur (10 hauteurs d'étage de 2,70 m) ;
- Contreventement assuré par 7 voiles en béton banché ($E = 38\,000\text{ MN/m}^2$) ;
- 4 files de linteaux.



GRUPE D'ÉTAGES N° 1 (0 A 16,20 m)

- 6 voiles
- 4 files de linteaux
- épaisseur uniforme des voiles : 18 cm (sauf voile 4 : 20 cm)



GRUPE D'ÉTAGES N° 2 (16,20 A 27 m)

- voile 6 supprimé
- files de linteaux 3 et 4 supprimées
- épaisseur uniforme des voiles : 18 cm

b) Caractéristiques des voiles

Épaisseurs uniformes de 18 cm, sauf pour le voile 4 (20 cm entre $\pm 0,00$ et 16,20 m).

Voiles 1, 3, 5 : caractéristiques constantes de $\pm 0,00$ à 16,20 m (plancher haut du 5^e étage), puis de 16,20 à 27,00 m ;

Voiles 2 et 7 : caractéristiques constantes sur la hauteur du bâtiment ;

Voile 4 : géométrie constante sur la hauteur du bâtiment, mais changement d'épaisseur à 16,20 m (20 cm \rightarrow 18 cm) ;

Voile 6 : supprimé au niveau 16,20 m.

Il y a donc 2 « groupes d'étages » : $\pm 0,00$ à 16,20 m et 16,20 m à 27,00 m.

c) Caractéristiques des files de linteaux

File 1 (relie les voiles 3 et 4) : 10 linteaux identiques 18 cm \times 50 cm ;

File 2 (interne au voile 4) : linteaux 20 cm \times 55 cm puis 4 linteaux 18 cm \times 55 cm ;

File 3 (relie les voiles 5 et 6) : 6 linteaux 18 cm \times 45 cm aux 6 premiers étages ; pas de linteaux dans le deuxième groupe d'étages (suppression du voile 6) ;

File 4 (relie les voiles 6 et 7) : identique à la file 3.

d) Masses et moments d'inertie massiques des étages, coordonnées des centres de gravité

Étages	XG (m)	YG (m)	M (tonnes)	J(t.m ²)
1 à 6	5,50	5,50	120,00	9 600,00
7 à 9	5,50	5,00	110,00	8 800,00
terrasse	5,50	5,00	75,00	6 000,00

e) Charges permanentes

On admettra qu'elles ont, par étage, les valeurs suivantes exprimées en (kN) :

Voiles	Étages 1 à 6	Étages 7 à 9 et terrasse
1	85,5	70,0
2	71,5	70,0
3	146,0	115,5
4	178,0	178,0
5	77,5	82,5
6	38,5	0,0
7	58,0	73,0

Le poids propre des voiles sera cumulé automatiquement (poids volumique du béton = 25 kN/m³).

f) Charges d'exploitation totales et réduites

Les charges d'exploitation totales brutes (avant dégression des surcharges) ont, par étage, les valeurs suivantes exprimées en (kN) :

Voiles	Étages 1 à 6	Étages 7 à 9
1	22,5	70,0
2	19,0	70,0
3	40,0	115,5
4	48,0	178,0
5	20,0	82,5
6	10,5	0,0
7	15,0	73,0

Les charges d'exploitation réduites (soumises à l'action sismique) sont égales au 1/5 des charges d'exploitation totales brutes. La dégression des surcharges par étages sera appliquée aux charges d'exploitation totales (séquence K...).

Les charges d'exploitation sont supposées nulles sur la terrasse.

g) Hypothèses du calcul sismique (selon PS 69)

- Coefficient d'intensité = 1 ;
- Coefficient de fondation = 1 ;
- Amortissement normal ;
- Pas d'importante formation de sols meubles.

4.3.2. Résultats

Les résultats du traitement sont partiellement présentés ci-après :

- fichier de données ;
- tableaux récapitulatifs des données, caractéristiques calculées des voiles ;
- dessin des plans d'étages ;
- analyse modale (résultats par modes, récapitulation) ;
- calcul sismique suivant PS 69 :
 - hypothèses sismiques,
 - chargements sismiques,
 - déplacements horizontaux d'ensemble,
 - efforts tranchants et moments dans les linteaux,
 - efforts internes dans les voiles,
 - composantes sismiques verticales,
 - descentes de charges,
 - contraintes normales minimale et maximale dans les voiles,
 - déplacements horizontaux et verticaux des points des voiles.

Le calcul complet dure de 30 s à 10 mn en fonction du micro-ordinateur utilisé...

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BETBEDER-MATIBET : « État de l'art en matière de calcul dynamique des structures » dans « *Génie Parasismique* », § V-1, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- [2] CAPRA : « Pratique de l'analyse modale dans le calcul des structures » dans « *Génie Parasismique* », § V-3, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- [3] CAPRA et DAVIDOVICI : « Calcul dynamique des structures en zone sismique » Eyrolles (Paris, 1979).
- [4] GUILLEMARD et LOCCI : « Extension dynamique de la méthode des matrices transfert appliquée aux systèmes de contreventement tridimensionnels » Premier Colloque National de Génie Parasismique, communication n° 54.
- [5] HÉNIN : « Calcul statique des systèmes de contreventement tridimensionnels irréguliers par la méthode des matrices transfert » *Annales ITBTP* — TMC 212.
- [6] HÉNIN : « Logiciel EOLE (vent, séisme, descente de charges) » *Annales ITBTP* — IA 50.
- [7] LE XIAOHUA : « Calcul dynamique des contreventements irréguliers » ENPC, TFE 1987.
- [8] NEWMARK-ROSENBLUETH : « Fundamentals of Earthquakes Engineering » Prentice-Hall.
- [9] VLASSOV : « Pièces longues en voiles minces » Eyrolles (Paris, 1962).
- [10] Règles Parasismiques 1969 et annexes : Eyrolles (Paris, 1982).
- [11] Futures Règles Parasismiques : texte provisoire communiqué par le comité de rédaction des règles dirigé par M. J. DESPEYROUX.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie vivement l'Entreprise SOGEA qui l'a soutenu efficacement tout au long de ce travail, ainsi que le BUREAU VERITAS qui a participé activement à l'élaboration du cahier des charges du logiciel. Il remercie aussi tout particulièrement M. XIAOHUA LE qui a travaillé sur un prototype du logiciel [7].

EPICENTRE

fichier de donnees : seisme.si

Batiment R+9 : verification au seisme selon PS 69....

B 38000 25
 F 3 4 4 4 5 6 6 7
 E 0,27,2.7
 G 0 16.2 27

G1 2*0 11 6 1 2 .18
 V1 2*0 4 0 1 2 .18
 V2 2*5 11 7 1 2 .18
 V3 3 5 7 2*5 5.5 2*7 6.5 3*0 2(3 2*5.5)
 V4 1 2 2 3 2 4 4 5 5 6 4 7 7 8 8 9 8*.20
 V5 2*11 11 7 1 2 .18
 V6 2*11 6 4 1 2 .18
 V7 2*11 3 0 1 2 .18
 L 2 5 6 9 2(2 1)

G2 2*0 10 6 1 2 .18
 V1 2*5 10 7 1 2 .18
 V3 2*5 10 7 1 2 .18
 V4 2*11 10 7 1 2 .18
 V5 2*11 10 7 1 2 .18
 V6 / 8*.18

R 10(50 18) 6(55 20) 4(55 18) 20(45 18)

PS69 1 1 0 2

MG 10*5.50 5*5.50 5*5.00 5*120 4*110 75 5*9600 4*8800 6000

P 6*85.5 4*70 6*71.5 4*70 6*146 4*115.5
 10*178 6*77.5 4*82.5 6*38.5 4*0
 6*58 4*73

ET 6*22.5 3*19 0 9*19 0 6*40 3*31 0
 9*48 0 6*20 3*22 0 6*10.5 4*0
 6*15 3*19.5 0

K 3*5 .5,1,1 1
 ER 6*22.5 3*19 0 9*19 0 6*40 3*31 0
 9*48 0 6*20 3*22 0 6*10.5 4*0
 6*15 3*19.5 0

K 10*.2

** OK **

Logiciel Epicentre, version 1.1

Bureau d'Etudes Dupont s.a.
 137, avenue Foch
 78000 Versailles
 tel : 30.75.98.00

GENERALITES

Batiment R+9 : verification au seisme selon PS 69....

Module d'Young 38000 MN/m2
 Poids volumique du beton 25.00 kN/m3
 Nombre de voiles 7
 Nombre de files de linteaux 4
 Nombre de liaisons rigides 0
 Nombre d'etages 10
 Nombre de groupes d'etages 2

groupe d'etages 1 : .00 m 16.20 m
 groupe d'etages 2 : 16.20 m 27.00 m

DESCRIPTION GEOMETRIQUE DES VOILES

GRUPE D ETAGES 1

voiles	pts/segmts	X	Y	Omega	I	J	epaisseurs
1	1 2	.00	11.00	.00	1	2	.180
		.00	6.00	.00			
2	1 2	.00	4.00	.00	1	2	.180
		.00	.00	.00			
3	1 2	5.00	11.00	.00	1	2	.180
		5.00	7.00	.00			
4	1 2 3 4 5 6	3.00	.00	-1.87	1	2	.200
		5.00	.00	.29	2	3	.200
		7.00	.00	2.45	2	4	.200
		5.00	3.00	.47	4	5	.200
		5.00	5.50	.63	5	6	.200
		5.50	5.50	-1.58	4	7	.200

CARACTERISTIQUES DES FILES DE LINTEAUX

POINTS ORIGINE ET EXTREMITÉ DES LINTEAUX

(une ligne blanche indique que la file est supprimée...)

 GROUPE D'ETAGES 1

File	Origine voile(point)	Extremite (point)	Portee (m)
1	3 (2)	4 (5)	1.50
2	4 (6)	4 (9)	1.00
3	5 (2)	6 (1)	1.00
4	6 (2)	7 (1)	1.00

 GROUPE D'ETAGES 2

File	Origine voile(point)	Extremite (point)	Portee (m)
1	3 (2)	4 (5)	1.50
2	4 (6)	4 (9)	1.00
3			
4			

=====

Files de linteaux 1 2 3 4

niveau	1	2	3	4
niveau 2.70	18x 50	20x 55	18x 45	18x 45
niveau 5.40	18x 50	20x 55	18x 45	18x 45
niveau 8.10	18x 50	20x 55	18x 45	18x 45
niveau 10.80	18x 50	20x 55	18x 45	18x 45
niveau 13.50	18x 50	20x 55	18x 45	18x 45
niveau 16.20	18x 50	20x 55	18x 45	18x 45
niveau 18.90	18x 50	18x 55	18x 45	18x 45
niveau 21.60	18x 50	18x 55	18x 45	18x 45
niveau 24.30	18x 50	18x 55	18x 45	18x 45
niveau 27.00	18x 50	18x 55	18x 45	18x 45

7	7.00	3.00	-3.37	7	8	.200
8	7.00	5.50	1.79	8	9	.200
9	6.50	5.50	4.00			
5	1	11.00	11.00	1	2	.180
6	2	11.00	7.00	1	2	.180
	1	11.00	6.00	1	2	.180
	2	11.00	4.00			
7	1	11.00	3.00	1	2	.180
	2	11.00	.00			

 GROUPE D'ETAGES 2

voiles pts/segmts X Y Omega I J epaisseurs

1	1	.00	10.00	.00	1	2	.180
	2	.00	6.00	.00			
2	repete						
3	1	5.00	10.00	.00	1	2	.180
	2	5.00	7.00	.00			
4	1	3.00	.00	-1.87	1	2	.180
	2	5.00	.00	.29	2	3	.180
	3	7.00	.00	2.45	2	4	.180
	4	5.00	3.00	.47	4	5	.180
	5	5.00	5.50	.63	5	6	.180
	6	5.50	5.50	-1.58	4	7	.180
	7	7.00	3.00	-3.37	7	8	.180
	8	7.00	5.50	1.79	8	9	.180
	9	6.50	5.50	4.00			
5	1	11.00	10.00	.00	1	2	.180
	2	11.00	7.00	.00			

6 supprime

7 repete

RAIDEURS DES LINTEAUX (MN/m)

Files de linteaux	1	2	3	4
niveau 2.70	112.08	326.26	205.07	205.07
niveau 5.40	112.08	326.26	205.07	205.07
niveau 8.10	112.08	326.26	205.07	205.07
niveau 10.80	112.08	326.26	205.07	205.07
niveau 13.50	112.08	326.26	205.07	205.07
niveau 16.20	112.08	326.26	00	00
niveau 18.90	112.08	293.64	00	00
niveau 21.60	112.08	293.64	00	00
niveau 24.30	112.08	293.64	00	00
niveau 27.00	112.08	293.64	00	00

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES ET SISMQUES

L'analyse modale du batiment est demandee pour un nombre de modes propres correspondant a au moins 90 pour cent de la masse totale....

CALCUL SUIVANT LES REGLES PS 69 :

- coefficient d'intensite alpha : 1.00
 - coefficient de fondation delta : 1.00
- L'amortissement est moyen (cf. regles 3,112-131)
 Pas d'importante formation de sols meubles (cf. regles 3,114-121)

CARACTERISTIQUES MASSIQUES DES ETAGES

Niveaux	Xg (m)	Yg (m)	M (t)	J (t.m2)
2.70	5.50	5.50	120.00	9600.00
5.40	5.50	5.50	120.00	9600.00
8.10	5.50	5.50	120.00	9600.00
10.80	5.50	5.50	120.00	9600.00
13.50	5.50	5.50	120.00	9600.00
16.20	5.50	5.00	110.00	8800.00
18.90	5.50	5.00	110.00	8800.00
21.60	5.50	5.00	110.00	8800.00
24.30	5.50	5.00	110.00	8800.00
27.00	5.50	5.00	75.00	6000.00

CHARGES PERMANENTES ET D'EXPLOITATION

CHARGES PERMANENTES AVEC LE POIDS PROPRE DES VOILES (kN)

Voiles	1	2	3	4	5
niveau 0.00	30.375	24.300	24.300	101.250	24.300
niveau 2.70	146.250	120.100	194.600	380.500	126.100
niveau 5.40	146.250	120.100	194.600	380.500	126.100
niveau 8.10	146.250	120.100	194.600	380.500	126.100
niveau 10.80	146.250	120.100	194.600	380.500	126.100
niveau 13.50	146.250	120.100	194.600	380.500	126.100
niveau 16.20	140.175	120.100	188.525	370.375	120.025
niveau 18.90	118.600	118.600	151.950	360.250	118.950
niveau 21.60	118.600	118.600	151.950	360.250	118.950
niveau 24.30	118.600	118.600	151.950	360.250	118.950
niveau 27.00	94.300	94.300	133.725	269.125	100.725

voiles 6 7

niveau 0.00	12.150	18.225		
niveau 2.70	62.800	94.450		
niveau 5.40	62.800	94.450		
niveau 8.10	62.800	94.450		
niveau 10.80	62.800	94.450		
niveau 13.50	62.800	94.450		
niveau 16.20	50.650	94.450		
niveau 18.90	0.000	109.450		
niveau 21.60	0.000	109.450		
niveau 24.30	0.000	109.450		
niveau 27.00	0.000	91.225		

CHARGES D'EXPLOITATION TOTALES (kN)

Voiles	1	2	3	4	5
niveau 2.70	11.250	9.500	20.000	24.000	10.000
niveau 5.40	11.250	9.500	20.000	24.000	10.000
niveau 8.10	11.250	9.500	20.000	24.000	10.000
niveau 10.80	11.250	9.500	20.000	24.000	10.000
niveau 13.50	13.500	11.400	24.000	28.800	12.000
niveau 16.20	15.750	13.300	28.000	33.600	14.000
niveau 18.90	15.200	15.200	24.800	38.400	17.600
niveau 21.60	17.100	17.100	27.900	43.200	19.800
niveau 24.30	19.000	19.000	31.000	48.000	22.000
niveau 27.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

CAPACITÉS GEOMETRIQUES CALCULEES DES GROUPE D'ETAGES

GROUPE D'ETAGES 1									
Voiles	Xc, Yc (m)	Xg, Yg (m)	Iy', Ix' (m4)	Jomega, Jd (m6, m5)	aire (m2)	alpha (deg)			
1	.00 8.50	.00 8.50	0.0000E+00 0.1875E+01	0.0000E+00 0.9720E-02	.900	0.			
2	.00 2.00	.00 2.00	0.0000E+00 0.9600E+00	0.0000E+00 0.7776E-02	.720	0.			
3	5.00 9.00	5.00 9.00	-0.7153E-06 0.9600E+00	0.0000E+00 0.7776E-02	.720	0.			
4	4.94 1.08	5.53 2.48	0.2341E+01 0.1225E+02	0.5240E+01 0.4000E-01	3.000	-16.			
5	11.00 9.00	11.00 9.00	-0.7153E-06 0.9600E+00	0.0000E+00 0.7776E-02	.720	0.			
6	11.00 5.00	11.00 5.00	-0.3576E-06 0.1200E+00	0.0000E+00 0.3888E-02	.360	0.			
7	11.00 1.50	11.00 1.50	0.1371E-05 0.4050E+00	0.0000E+00 0.5832E-02	.540	0.			
Niveau total	4.60 .80		0.2596E+01 0.1728E+02	0.1273E+03 0.8277E-01		-10.			

GROUPE D'ETAGES 2									
Voiles	Xc, Yc (m)	Xg, Yg (m)	Iy', Ix' (m4)	Jomega, Jd (m6, m5)	aire (m2)	alpha (deg)			
1	.00 8.00	.00 8.00	0.0000E+00 0.9600E+00	0.0000E+00 0.7776E-02	.720	0.			
2Rpt	.00 2.00	.00 2.00	0.0000E+00 0.9600E+00	0.0000E+00 0.7776E-02	.720	0.			
3	5.00 8.50	5.00 8.50	-0.5364E-06 0.4050E+00	0.0000E+00 0.5832E-02	.540	0.			

CHARGES D'EXPLOITATION REDUITES (kN)

Voiles	6	7	1	2	3	4	5
niveau 2.70	5.250	7.500	4.500	3.800	8.000	9.600	4.000
niveau 5.40	5.250	7.500	4.500	3.800	8.000	9.600	4.000
niveau 8.10	5.250	7.500	4.500	3.800	8.000	9.600	4.000
niveau 10.80	6.300	9.000	4.500	3.800	8.000	9.600	4.000
niveau 13.50	7.350	10.500	4.500	3.800	8.000	9.600	4.000
niveau 16.20	.000	15.600	4.500	3.800	8.000	9.600	4.000
niveau 18.90	.000	17.550	3.800	3.800	6.200	9.600	4.400
niveau 21.60	.000	19.500	3.800	3.800	6.200	9.600	4.400
niveau 24.30	.000	.000	3.800	3.800	6.200	9.600	4.400
niveau 27.00	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

Voiles	6	7
niveau 2.70	2.100	3.000
niveau 5.40	2.100	3.000
niveau 8.10	2.100	3.000
niveau 10.80	2.100	3.000
niveau 13.50	2.100	3.000
niveau 16.20	2.100	3.000
niveau 18.90	.000	3.900
niveau 21.60	.000	3.900
niveau 24.30	.000	3.900
niveau 27.00	.000	.000

ANALYSE MODALE : CARACTERISTIQUES DES MODES PROPRES

MODE PROPRE NUMERO 1

Periode : .89287 s
 Pulsation : 7.04 rad/s
 Frequence : 1.12 Hz

DEFORMEE NORMALISEE PAR RAPPORT A LA MASSE

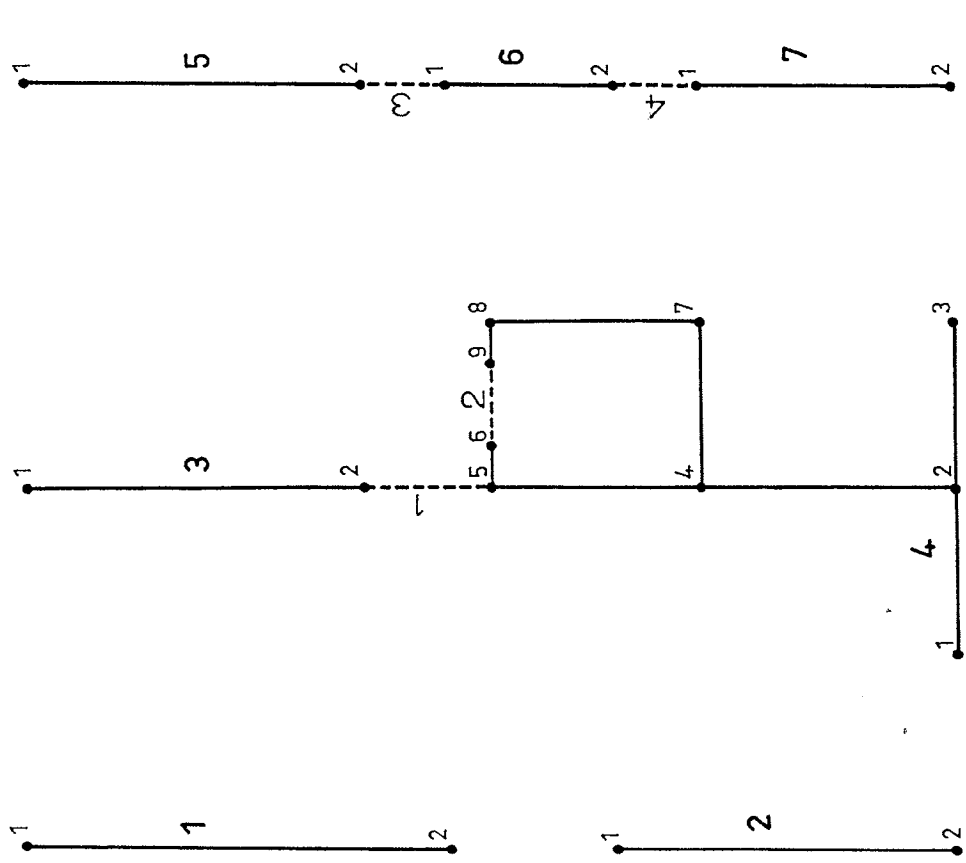
(deplacements des centres de gravite des planchers d'etage)

Niveaux	DXG (m)	DYG (m)	TETA (rad)
2.70	-.9552E-03	0.5729E-04	0.5198E-04
5.40	-.3573E-02	0.1938E-03	0.1870E-03
8.10	-.7526E-02	0.3730E-03	0.3810E-03
10.80	-.1253E-01	0.5740E-03	0.6171E-03
13.50	-.1835E-01	0.7880E-03	0.8842E-03
16.20	-.2420E-01	0.1017E-02	0.1177E-02
18.90	-.3102E-01	0.1293E-02	0.1506E-02
21.60	-.3823E-01	0.1613E-02	0.1868E-02
24.30	-.4559E-01	0.1941E-02	0.2239E-02
27.00	-.5297E-01	0.2259E-02	0.2606E-02

FACTEURS DE PARTICIPATION ET MASSES MODALES

Facteur de participation selon OX : -24.42
 Facteur de participation selon OY : 1.05
 Facteur de participation de torsion : 95.75
 Masse modale effective selon OX : 596.37 t (53 %)
 Masse modale effective selon OY : 1.11 t (0 %)
 Inertie massique modale effective : 9168.58 t.m (10 %)
 Direction de Participation Maximum : 177.53 degrees
 Facteur de Participation Maximum : 24.44
 Masse Modale Maximum : 597.48 t (54 %)

4	4.94 1.08	5.53 2.48	0.2107E+01 0.1103E+02	0.4716E+01 0.2916E-01	2.700	-16.
5	11.00 8.50	11.00 8.50	0.1371E-05 0.4050E+00	0.0000E+00 0.5832E-02	.540	0.
7Rpt	11.00 1.50	11.00 1.50	0.1371E-05 0.4050E+00	0.0000E+00 0.5832E-02	.540	0.
Niveau Complet	4.55 .75		0.2278E+01 0.1399E+02	0.7952E+02 0.6221E-01		-12.



MODE PROPRE NUMERO 2

Periode : .59864 s
 Pulsation : 10.50 rad/s
 Frequence : 1.67 Hz

DEFORMEE NORMALISEE PAR RAPPORT A LA MASSE

(deplacements des centres de gravite des planchers d'etage)

Niveaux	DXG (m)	DYG (m)	TETA (rad)
2.70	0.2743E-03	-.9254E-04	0.1151E-03
5.40	0.1134E-02	-.3708E-03	0.4190E-03
8.10	0.2573E-02	-.8176E-03	0.8620E-03
10.80	0.4530E-02	-.1400E-02	0.1407E-02
13.50	0.6898E-02	-.2073E-02	0.2026E-02
16.20	0.1088E-01	-.2783E-02	0.2703E-02
18.90	0.1390E-01	-.3445E-02	0.3453E-02
21.60	0.1685E-01	-.4030E-02	0.4264E-02
24.30	0.1983E-01	-.4576E-02	0.5089E-02
27.00	0.2284E-01	-.5106E-02	0.5908E-02

FACTEURS DE PARTICIPATION ET MASSES MODALES

Facteur de participation selon OX : 10.32
 Facteur de participation selon OY : -2.59
 Facteur de participation de torsion : 218.29
 Masse modale effective selon OX : 106.57 t (10 %)
 Masse modale effective selon OY : 6.68 t (1 %)
 Inertie massique modale effective : 47649.38 t.m (53 %)
 Direction de Participation Maximum : 165.94 degres
 Facteur de Participation Maximum : -10.64
 Masse Modale Maximum : 113.25 t (10 %)

MODE PROPRE NUMERO 3

Periode : .25684 s
 Pulsation : 24.46 rad/s
 Frequence : 3.89 Hz

DEFORMEE NORMALISEE PAR RAPPORT A LA MASSE

(deplacements des centres de gravite des planchers d'etage)

Niveaux	DXG (m)	DYG (m)	TETA (rad)
2.70	-.7607E-03	0.1163E-02	0.1126E-03
5.40	-.2281E-02	0.4242E-02	0.3453E-03
8.10	-.3675E-02	0.8723E-02	0.5793E-03
10.80	-.4351E-02	0.1420E-01	0.7377E-03
13.50	-.3986E-02	0.2034E-01	0.7817E-03
16.20	-.2178E-02	0.2692E-01	0.7102E-03
18.90	0.1144E-03	0.3382E-01	0.5459E-03
21.60	0.3170E-02	0.4089E-01	0.2992E-03
24.30	0.6835E-02	0.4794E-01	-.1251E-04
27.00	0.1084E-01	0.5492E-01	-.3542E-03

FACTEURS DE PARTICIPATION ET MASSES MODALES

Facteur de participation selon OX : -.12
 Facteur de participation selon OY : 26.41
 Facteur de participation de torsion : 35.99
 Masse modale effective selon OX : .01 t (0 %)
 Masse modale effective selon OY : 697.57 t (63 %)
 Inertie massique modale effective : 1295.55 t.m (1 %)
 Direction de Participation Maximum : 90.26 degres
 Facteur de Participation Maximum : 26.41
 Masse Modale Maximum : 697.58 t (63 %)

RECAPITULATION DE L'ANALYSE MODALE

Pourcentage de masse modale demandé : 90.00 %
 Nombre de modes calculés : 12

MASSES MODALES ET INERTIE MASSIQUES MODALES EFFECTIVES

Modés	T (s)	MX (t)	MY (t)	Mmax (t)	J (t.m)
1	.893	596 (53%)	1 (0%)	597 (54%)	9169 (10%)
2	.599	107 (10%)	7 (1%)	113 (10%)	47649 (53%)
3	.257	0 (0%)	698 (63%)	698 (63%)	1296 (1%)
4	.211	101 (9%)	13 (1%)	113 (10%)	7978 (9%)
5	.120	124 (11%)	2 (0%)	126 (11%)	7503 (8%)
6	.081	30 (3%)	0 (0%)	30 (3%)	3939 (4%)
7	.054	3 (0%)	211 (19%)	214 (19%)	15 (0%)
8	.044	59 (5%)	1 (0%)	60 (5%)	1354 (2%)
9	.042	3 (0%)	0 (0%)	3 (0%)	3576 (4%)
10	.027	15 (1%)	0 (0%)	15 (1%)	849 (1%)
11	.023	18 (2%)	0 (0%)	18 (2%)	1752 (2%)
12	.020	1 (0%)	77 (7%)	79 (7%)	1 (0%)

La masse modale effective maximum est obtenue pour le mode 3...

BILAN DES MASSES ET INERTIES MASSIQUES MODALES CALCULEES

Masse totale du batiment : 1115 t
 Inertie massique totale du batiment : 89200 t.m
 Masse modale effective totale des modes calculés...
 - suivant OX: 1056 t (95 %)
 - suivant OY: 1010 t (91 %)
 Inertie massique totale des modes calculés : 85082 t.m (95 %)

PARAMETRES SISMIQUES

1) RAPPEL DES HYPOTHESES SISMIQUES

Calcul suivant les Regles PS 69 :

- coefficient d'intensite alpha : 1.00
- coefficient de fondation delta : 1.00
- L'amortissement est moyen (cf. regles 3,112-131)
- Pas d'importante formation de sols meubles (cf. regles 3,114-121)

2) COEFFICIENTS SISMIQUES CALCULES

Les coefficients de reponse beta sont calculés selon les prescriptions de l'article 3,114-22 des regles (cf. notice d'utilisation).

Mode	Periode	Beta	Alpha * Beta * Delta
1	.893	.0883	.0883
2	.599	.1058	.1058
3	.257	.2000	.2000
4	.211	.2000	.2000
5	.120	.1197	.1197
6	.081	.0806	.0806
7	.054	.0536	.0536
8	.044	.0480	.0480
9	.042	.0480	.0480
10	.027	.0480	.0480
11	.023	.0480	.0480
12	.020	.0480	.0480

3) DIRECTIONS DE CALCUL, FACTEURS DE PARTICIPATION, MASSES MODALES

Les composantes horizontales du mouvement sismique de calcul seront orientées suivant les deux directions perpendiculaires suivantes :

- direction 1 : direction de participation maximum du mode propre 3 (mode le plus sollicité par un seisme horizontal)

- direction 2 : direction perpendiculaire a la precedente

Angle de la direction 1 avec OX : 90.26 degrees
 Angle de la direction 2 avec OX : .26 degrees

Le tableau ci-apres donne les facteurs de participation et les masses modales de chaque mode suivant ces deux directions :

Modes	P1	M1 (t)	P2	M2 (t)
1	1.16	1 (0%)	-24.42	596 (53%)
2	-2.63	7 (1%)	10.31	106 (10%)
3	26.41	698 (63%)	0.00	0 (0%)
4	-3.55	13 (1%)	-10.04	101 (9%)
5	-1.55	2 (0%)	11.13	124 (11%)
6	-2.20	0 (0%)	-5.45	30 (3%)
7	14.50	210 (19%)	1.90	4 (0%)
8	-1.14	1 (0%)	7.66	59 (5%)
9	-.20	0 (0%)	-1.58	3 (0%)
10	.61	0 (0%)	-3.82	15 (1%)
11	-.42	0 (0%)	4.25	18 (2%)
12	8.79	77 (7%)	1.18	1 (0%)

Masse modale totale dans la direction 1 : 1009 t (90%)
 Masse modale totale dans la direction 2 : 1057 t (95%)

Dans la suite du calcul, les reliquats de masse modale correspondant aux modes negliges seront reportes sur le dernier mode pour chacune des directions 1 et 2.

CHARGEMENTS SISMIQUES RESULTANTS

(efforts rapportes au point O, origine du repere utilisateur)

MODE PROPRE 1 :

Niveaux	FX1 (kN)	FY1 (kN)	C1 (kN.m)	FX2 (kN)	FY2 (kN)	C2 (kN.m)
2.70	-1	0.0	1.2	2.4	-1	-24.7
5.40	-4	0.0	4.3	9.1	-5	-90.5
8.10	-9	0.0	8.9	19.1	-9	-187.6
10.80	-1.5	.1	14.7	31.8	-1.5	-308.1

MODE PROPRE 2 :

Niveaux	FX1 (kN)	FY1 (kN)	C1 (kN.m)	FX2 (kN)	FY2 (kN)	C2 (kN.m)
13.50	-2.2	.1	21.3	46.6	-2.0	-446.6
16.20	-2.7	.1	24.5	56.3	-2.4	-513.4
18.90	-3.4	.1	31.3	72.2	-3.0	-657.6
21.60	-4.2	.2	38.7	88.9	-3.8	-812.8
24.30	-5.1	.2	46.3	106.0	-4.5	-971.5
27.00	-4.0	.2	36.7	84.0	-3.6	-770.2

MODE PROPRE 3 :

Niveaux	FX1 (kN)	FY1 (kN)	C1 (kN.m)	FX2 (kN)	FY2 (kN)	C2 (kN.m)
2.70	-1	0.0	-2.4	.4	-1	9.2
5.40	-4	.1	-8.3	1.5	-5	32.4
8.10	-8	.3	-16.5	3.3	-1.0	64.6
10.80	-1.5	.5	-26.2	5.8	-1.8	102.6
13.50	-2.3	.7	-37.0	8.9	-2.7	144.8
16.20	-3.3	.8	-44.0	12.8	-3.3	172.5
18.90	-4.2	1.0	-56.4	16.4	-4.1	221.1
21.60	-5.1	1.2	-70.5	19.8	-4.7	276.2
24.30	-6.0	1.4	-85.0	23.3	-5.4	333.0
27.00	-4.7	1.0	-67.7	18.3	-4.1	265.1

MODE PROPRE 4 :

Niveaux	FX1 (kN)	FY1 (kN)	C1 (kN.m)	FX2 (kN)	FY2 (kN)	C2 (kN.m)
2.70	-4.7	7.2	121.8	0.0	0.0	0.0
5.40	-14.2	26.4	394.9	0.0	0.0	0.0
8.10	-22.9	54.2	712.2	0.0	0.0	0.0
10.80	-27.1	88.3	1001.3	0.0	0.0	0.0
13.50	-24.8	126.5	1221.0	0.0	0.0	0.0
16.20	-12.4	153.4	1229.8	0.0	0.0	0.0
18.90	.7	192.8	1305.9	0.0	0.0	0.0
21.60	18.1	233.1	1328.0	0.0	0.0	0.0
24.30	39.0	273.3	1302.6	0.0	0.0	0.0
27.00	42.1	213.4	853.2	0.0	0.0	0.0

MODE PROPRE 4 :

Niveaux	FX1 (kN)	FY1 (kN)	C1 (kN.m)	FX2 (kN)	FY2 (kN)	C2 (kN.m)
2.70	2.7	-2	-41.9	7.7	-7	-118.3
5.40	8.9	-7	-134.7	25.0	-1.9	-380.7
8.10	15.6	-1.0	-236.4	44.1	-2.7	-667.9
10.80	20.8	-8	-313.1	58.7	-2.4	-884.5
13.50	22.7	-2	-340.5	64.2	-5	-961.9
16.20	17.7	1.0	-264.2	50.1	2.9	-746.4

DEPLACEMENTS HORIZONTAUX D'ENSEMBLE

(deplacements maximum du point O, origine du repere utilisateur)

Niveaux	DX (mm)	DY (mm)	TETA (rad)
.00	.000	.000	0.0000E+00
	.000	.000	0.0000E+00
2.70	.064	.137	0.1496E-04
	.603	.255	0.5226E-04
5.40	.227	.544	0.4696E-04
	2.286	.926	0.1867E-03
8.10	.456	1.204	0.8244E-04
	4.868	1.895	0.3773E-03
10.80	.735	2.088	0.1141E-03
	8.179	3.076	0.6062E-03
13.50	1.061	3.156	0.1405E-03
	12.056	4.407	0.8621E-03
16.20	1.440	4.360	0.1648E-03
	16.354	5.851	0.1140E-02
18.90	1.877	5.645	0.1937E-03
	20.958	7.432	0.1452E-02
21.60	2.370	6.978	0.2301E-03
	25.761	9.134	0.1797E-02
24.30	2.909	8.333	0.2729E-03
	30.664	10.881	0.2154E-02
27.00	3.481	9.692	0.3205E-03
	35.601	12.629	0.2511E-02

EFFORTS TRANCHANTS DANS LES LINTEAUX (KN)

Files de linteaux	1	2	3	4
niveau 2.70	38.63	15.48	60.48	53.77
	17.73	58.87	71.93	64.03
	M 38.63	58.87	71.93	64.03
niveau 5.40	65.30	20.95	93.80	83.65
	29.40	99.49	114.14	101.94
	M 65.30	99.49	114.14	101.94
niveau 8.10	82.71	20.88	109.07	97.57
	36.93	127.33	138.09	123.69
	M 82.71	127.33	138.09	123.69
niveau 10.80	92.98	19.62	113.42	101.76
	41.69	146.86	152.92	137.29
	M 92.98	146.86	152.92	137.29
niveau 13.50	98.00	20.68	113.30	101.89
	44.76	162.05	166.80	149.87
	M 98.00	162.05	166.80	149.87
niveau 16.20	99.71	23.86	115.08	103.56
	47.22	176.74	187.26	167.96
	M 99.71	176.74	187.26	167.96
niveau 18.90	100.66	26.20	.00	.00
	51.78	185.73	.00	.00
	M 100.66	185.73	.00	.00
niveau 21.60	97.62	30.19	.00	.00
	52.97	198.32	.00	.00
	M 97.62	198.32	.00	.00
niveau 24.30	93.14	32.13	.00	.00
	51.75	200.52	.00	.00
	M 93.14	200.52	.00	.00
niveau 27.00	89.79	32.38	.00	.00
	50.02	198.23	.00	.00
	M 89.79	198.23	.00	.00

MOMENTS DANS LES LINTEAUX (kN.m)

Files de linteaux	1	2	3	4
niveau 2.70	28.97 13.30 28.97	7.74 29.44 29.44	30.24 35.96 35.96	26.89 32.01 32.01
niveau 5.40	48.98 22.05 48.98	10.47 49.75 49.75	46.90 57.07 57.07	41.82 50.97 50.97
niveau 8.10	62.03 27.70 62.03	10.44 63.67 63.67	54.53 69.04 69.04	48.78 61.85 61.85
niveau 10.80	69.74 31.26 69.74	9.81 73.43 73.43	56.71 76.46 76.46	50.88 68.65 68.65
niveau 13.50	73.50 33.57 73.50	10.34 81.02 81.02	56.65 83.40 83.40	50.95 74.93 74.93
niveau 16.20	74.78 35.42 74.78	11.93 88.37 88.37	57.54 93.63 93.63	51.78 83.98 83.98
niveau 18.90	75.50 38.83 75.50	13.10 92.87 92.87	.00 .00 .00	.00 .00 .00
niveau 21.60	73.22 39.72 73.22	15.10 99.16 99.16	.00 .00 .00	.00 .00 .00
niveau 24.30	69.86 38.81 69.86	16.07 100.26 100.26	.00 .00 .00	.00 .00 .00
niveau 27.00	67.34 37.51 67.34	16.19 99.12 99.12	.00 .00 .00	.00 .00 .00

EFFORTS INTERNES DE CONTREVENTEMENT DANS LE VOILE 4

Niveaux	My (kN.m)	Mx (kN.m)	B (kN.m ²)	N (kN)
(4) .00 1	2033.80	11719.06	528.23	857.91
(4) .00 2	10367.95	7003.77	1622.21	416.12
(4) .00 M	10367.95	11719.06	1622.21	857.91
(4) 2.70- 1	1977.68	9319.80	150.76	857.91
(4) 2.70- 2	8871.15	6685.90	825.64	416.12
(4) 2.70- M	8871.15	9319.80	825.64	857.91
(4) 2.70+ 1	1958.77	9464.65	320.63	819.37
(4) 2.70+ 2	8880.19	6626.54	1420.09	399.58
(4) 2.70+ M	8880.19	9464.65	1420.09	819.37
(4) 5.40- 1	1915.00	7356.89	126.93	819.37
(4) 5.40- 2	7423.14	5999.51	301.49	399.58
(4) 5.40- M	7423.14	7356.89	301.49	819.37
(4) 5.40+ 1	1882.17	7601.71	185.35	754.20
(4) 5.40+ 2	7437.85	5904.06	1277.25	371.78
(4) 5.40+ M	7437.85	7601.71	1277.25	754.20
(4) 8.10- 1	1823.92	5694.30	231.21	754.20
(4) 8.10- 2	6049.37	5096.29	259.22	371.78
(4) 8.10- M	6049.37	5694.30	259.22	754.20
(4) 8.10+ 1	1781.81	6004.20	156.91	671.61
(4) 8.10+ 2	6067.50	4978.95	1189.69	336.49
(4) 8.10+ M	6067.50	6004.20	1189.69	671.61
(4) 10.80- 1	1678.06	4265.82	257.35	671.61
(4) 10.80- 2	4771.46	4068.35	470.87	336.49
(4) 10.80- M	4771.46	4265.82	470.87	671.61
(4) 10.80+ 1	1630.66	4613.64	199.59	578.75
(4) 10.80+ 2	4791.62	3936.62	1160.70	296.26
(4) 10.80+ M	4791.62	4613.64	1160.70	578.75
(4) 13.50- 1	1459.78	3060.12	216.07	578.75
(4) 13.50- 2	3600.96	2963.26	600.18	296.26
(4) 13.50- M	3600.96	3060.12	600.18	578.75
(4) 13.50+ 1	1410.12	3425.56	225.27	480.84
(4) 13.50+ 2	3622.48	2818.52	1193.24	252.69
(4) 13.50+ M	3622.48	3425.56	1193.24	480.84
(4) 16.20- 1	1169.28	2330.89	151.20	480.84
(4) 16.20- 2	2543.11	1646.87	583.07	252.69
(4) 16.20- M	2543.11	2330.89	583.07	480.84

ATTENTION : changement de section de section du voile...

	16.20+ 1	1119.20	2701.25	248.81	381.19
	2	2565.99	1484.58	1443.90	206.29
M		2565.99	2701.25	1443.90	381.19
(4)	18.90- 1	838.21	1360.25	121.83	381.19
	2	1602.39	963.42	635.48	206.29
M		1602.39	1360.25	635.48	381.19
	18.90+ 1	788.15	1730.87	266.28	280.55
	2	1628.19	795.70	1420.10	154.71
M		1628.19	1730.87	1420.10	280.55

COMPOSANTES SIGMIQUES VERTICALES DANS LES VOILES
(Efforts en kN, contraintes en MPa)

VOILE 1	sigma	Vs	Nvs	Svs	Z-	Z+
.00	.0000	.00	161.90	.18	.18	.18
2.70	.0051	.61	161.29	.18	.18	.18
5.40	.0189	2.85	158.44	.18	.18	.18
8.10	.0398	6.00	152.44	.17	.17	.17
10.80	.0663	9.99	142.45	.16	.16	.16
13.50	.0970	14.63	127.82	.16	.14	.15
16.20	.1280	19.29	108.53	.14	.15	.15
18.90	.1640	21.07	87.46	.15	.12	.12
21.60	.2021	24.74	62.72	.12	.09	.09
24.30	.2410	29.50	33.21	.09	.05	.05
27.00	.2801	33.21	0.00	.05	0.00	0.00

VOILE 2	sigma	Vs	Nvs	Svs	Z-	Z+
.00	.0000	.00	151.40	.21	.21	.21
2.70	.0051	.50	150.90	.21	.21	.21
5.40	.0189	2.34	148.56	.21	.20	.20
8.10	.0398	4.93	143.62	.20	.19	.19
10.80	.0663	8.21	135.41	.19	.17	.17
13.50	.0970	12.02	123.39	.17	.15	.15
16.20	.1280	15.85	107.54	.17	.12	.12
18.90	.1640	20.08	87.46	.15	.09	.09
21.60	.2021	24.74	62.72	.12	.05	.05
24.30	.2410	29.50	33.21	.09	0.00	0.00
27.00	.2801	33.21	0.00	.05	0.00	0.00

VOILE 3	sigma	Vs	Nvs	Svs	Z-	Z+
.00	.0000	.00	211.38	.29	.29	.29
2.70	.0051	.90	210.48	.29	.29	.29
5.40	.0189	3.83	206.65	.29	.28	.28
8.10	.0398	8.06	198.59	.28	.26	.26
10.80	.0663	13.43	185.16	.26	.23	.23
13.50	.0970	19.66	165.50	.23	.21	.21
16.20	.1280	25.93	139.58	.21	.15	.15
18.90	.1640	26.94	112.64	.21	.15	.15
21.60	.2021	31.97	80.68	.15	.08	.08
24.30	.2410	38.12	42.55	.08	0.00	0.00
27.00	.2801	42.55	0.00	.08	0.00	0.00

VOILE 4	sigma	Vs	Nvs	Svs	Z-	Z+
.00	.0000	.00	465.11	.16	.16	.16
2.70	.0051	1.46	463.65	.15	.15	.15
5.40	.0189	7.37	456.27	.15	.15	.15
8.10	.0398	15.53	440.75	.15	.14	.14
10.80	.0663	25.85	414.89	.14	.13	.13
13.50	.0970	37.85	377.04	.13	.12	.12
16.20	.1280	49.92	327.12	.12	.10	.10
18.90	.1640	62.33	264.80	.10	.07	.07
21.60	.2021	74.76	264.80	.07	.04	.04
24.30	.2410	89.15	190.04	.07	.04	.04
27.00	.2801	100.89	100.89	.04	0.00	0.00

EFFORTS (kN) ET CONTRAINTES (MPa) DE DESCENTE DE CHARGES

VOILE 1	Np	Nem	Ner	Sp	Sem	Ser
.00	1351.90	125.55	38.40	1.50	.14	.04
2.70	1291.15	125.55	38.40	1.43	.14	.04
	1205.65	114.30	33.90	1.34	.13	.04
5.40	1144.90	114.30	33.90	1.27	.13	.04
	1059.40	103.05	29.40	1.18	.11	.03
8.10	998.65	103.05	29.40	1.11	.11	.03
	913.15	91.80	24.90	1.01	.10	.03
10.80	852.40	91.80	24.90	.95	.10	.03
	766.90	80.55	20.40	.85	.09	.02

CONTRAINTES REPARTIES (MPa) DU VOILE 4

Les contraintes localisees, qui dependent du mode de ferrailage, (appuis de linteaux, liaisons rigides...) devront etre rajoutees aux contraintes reparties (cf. notice).

	Np	Nem	Ner	Sp	Sem	Ser	Niveaux	pts	Sc1	Sc2	ScM	Smin	Smax
13.50	706.15	80.55	20.40	.78	.09	.02	(4)	.00	2.33	7.42	7.42	-6.30	8.91
	620.65	67.05	15.90	.69	.07	.02			2.52	1.38	2.52	-1.41	4.01
16.20	559.90	67.05	15.90	.62	.07	.02		1	2.84	4.86	4.86	-3.74	6.35
	474.40	51.30	11.40	.66	.07	.02		2	.36	1.77	1.77	-.66	3.26
18.90	425.80	51.30	11.40	.59	.07	.02		3	2.72	2.17	2.72	-1.60	4.21
	355.80	36.10	7.60	.49	.05	.01		4	2.50	.64	2.50	-1.38	3.99
21.60	307.20	36.10	7.60	.43	.05	.01		5	.48	5.50	5.50	-4.38	6.99
	237.20	19.00	3.80	.33	.03	.01		6	2.41	4.14	4.14	-3.03	5.63
24.30	188.60	19.00	3.80	.26	.03	.01		7	2.61	2.12	2.61	-1.49	4.10
	118.60	0.00	0.00	.16	0.00	0.00		8					
27.00	70.00	0.00	0.00	.10	0.00	0.00		9					
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							
VOILE 2							(4)	2.70	2.22	6.88	6.88	-5.89	8.30
.00	1195.00	114.00	34.20	1.66	.16	.05		1	2.29	1.32	2.29	-1.30	3.71
								2	2.46	4.43	4.43	-3.45	5.86
2.70	1146.40	114.00	34.20	1.59	.16	.05		3	.26	1.60	1.60	-.61	3.02
	1074.90	104.50	30.40	1.49	.15	.04		4	2.33	1.90	2.33	-1.35	3.76
5.40	1026.30	104.50	30.40	1.43	.15	.04		5	2.21	.59	2.21	-1.22	3.63
	954.80	95.00	26.60	1.33	.13	.04		6	.36	5.00	5.00	-4.02	6.43
8.10	906.20	95.00	26.60	1.26	.13	.04		7	2.18	3.90	3.90	-2.91	5.32
	834.70	85.50	22.80	1.16	.12	.03		8	2.29	2.07	2.29	-1.30	3.71
10.80	786.10	85.50	22.80	1.09	.12	.03	(4)	5.40	2.02	5.80	5.80	-4.95	7.09
	714.60	76.00	19.00	.99	.11	.03		1	1.86	1.17	1.86	-1.00	3.15
13.50	666.00	76.00	19.00	.93	.11	.03		2	1.79	3.64	3.64	-2.78	4.93
	594.50	64.60	15.20	.83	.09	.02		3	.10	1.28	1.28	-.42	2.57
16.20	545.90	64.60	15.20	.76	.09	.02		4	1.63	1.45	1.63	-.78	2.92
	474.40	51.30	11.40	.66	.07	.02		5	1.67	.50	1.67	-.81	2.96
18.90	425.80	51.30	11.40	.59	.07	.02		6	.31	4.09	4.09	-3.23	5.38
	355.80	36.10	7.60	.49	.05	.01		7	1.76	3.39	3.39	-2.53	4.68
21.60	307.20	36.10	7.60	.43	.05	.01	(4)	8.10	1.71	1.91	1.91	-1.05	3.20
	237.20	19.00	3.80	.33	.03	.01		1	1.82	4.75	4.75	-4.02	5.90
								2	1.49	.98	1.49	-.75	2.64
								3	1.23	2.93	2.93	-2.20	4.09
								4	.12	1.01	1.01	-.27	2.16
								5	1.08	1.11	1.11	-.38	2.26
								6	1.22	.40	1.22	-.49	2.37
								7	.43	3.30	3.30	-2.56	4.45
								8	1.42	2.83	2.83	-2.10	3.98
								9	1.27	1.67	1.67	-.93	2.82

(4)	10.80	1	1.60	3.74	3.74	-3.13	4.75
		2	1.15	.77	1.15	-.54	2.16
		3	.78	2.32	2.32	-1.71	3.33
		4	.19	.78	.78	-.17	1.80
		5	.66	.87	.87	-.26	1.88
		6	.85	.31	.85	-.24	1.86
		7	.51	2.61	2.61	-2.00	3.63
		8	1.12	2.25	2.25	-1.64	3.27
		9	.92	1.36	1.36	-.74	2.37
(4)	13.50	1	1.36	2.79	2.79	-2.30	3.66
		2	.86	.54	.86	-.37	1.73
		3	.45	1.79	1.79	-1.29	2.66
		4	.22	.60	.60	-.11	1.47
		5	.38	.72	.72	-.22	1.58
		6	.55	.22	.55	-.05	1.41
		7	.51	2.04	2.04	-1.54	2.90
		8	.86	1.68	1.68	-1.18	2.54

DEPLACEMENTS (mm) DES POINTS DES VOILES

Niveaux		pts	dx1	dy1	dx2	dy2	dz1	dz2	dzM
(1)	27.00	1	3.18	9.69	56.42	12.63	.78	1.04	1.04
		2	2.91	9.69	47.60	12.63	1.24	1.59	1.59
(2)	27.00	1	2.98	9.69	43.39	12.63	1.01	1.32	1.32
		2	3.48	9.69	35.60	12.63	1.01	1.32	1.32
(3)	27.00	1	3.18	9.62	56.42	1.98	1.54	.64	1.54
		2	2.93	9.62	49.76	1.98	.16	.40	.40
(4)	27.00	1	3.48	9.62	35.60	5.32	1.85	4.48	4.48
		2	3.48	9.62	35.60	1.98	1.49	.85	1.49
		3	3.48	9.66	35.60	5.48	1.20	2.88	2.88
		4	3.06	9.62	41.35	1.98	.13	.99	.99
		5	2.91	9.62	46.53	1.98	1.06	1.16	1.16
		6	2.91	9.63	46.53	2.39	1.16	.31	1.16
		7	3.06	9.66	41.35	5.48	.35	3.28	3.28
		8	2.91	9.66	46.53	5.48	1.41	2.63	2.63
		9	2.91	9.65	46.53	4.33	1.30	1.47	1.47
(5)	27.00	1	3.18	9.88	56.42	15.28	.90	1.55	1.55
		2	2.93	9.88	49.76	15.28	.44	.99	.99
(7)	27.00	1	3.06	9.88	41.35	15.28	.19	.61	.61
		2	3.48	9.88	35.60	15.28	1.20	2.00	2.00

(6)	.00	1	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
		2	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
(7)	.00	1	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
		2	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
(2)	2.70	1	.19	.14	1.09	.26	.26	.45	.45	.45	.45	.45	.45
		2	.12	.14	.85	.26	.26	.45	.45	.45	.45	.45	.45
(3)	2.70	1	.10	.14	.76	.26	.26	.36	.36	.36	.36	.36	.36
		2	.06	.14	.60	.26	.26	.36	.36	.36	.36	.36	.36
(4)	2.70	1	.06	.17	.60	.10	.10	.33	.33	.33	.33	.33	.33
		2	.06	.19	.60	.04	.04	.20	.20	.20	.20	.20	.20
		3	.06	.22	.60	.12	.12	.40	.40	.40	.40	.40	.40
		4	.09	.19	.72	.04	.04	.05	.05	.05	.05	.05	.05
		5	.12	.19	.83	.04	.04	.39	.39	.39	.39	.39	.39
		6	.12	.20	.83	.05	.05	.35	.35	.35	.35	.35	.35
		7	.09	.22	.72	.12	.12	.07	.07	.07	.07	.07	.07
		8	.12	.22	.83	.12	.12	.34	.34	.34	.34	.34	.34
		9	.12	.21	.83	.10	.10	.37	.37	.37	.37	.37	.37
(5)	2.70	1	.19	.27	1.09	.33	.33	.48	.48	.48	.48	.48	.48
		2	.14	.27	.90	.33	.33	.25	.25	.25	.25	.25	.25
(6)	2.70	1	.12	.27	.85	.33	.33	.16	.16	.16	.16	.16	.16
		2	.10	.27	.76	.33	.33	.21	.21	.21	.21	.21	.21
(7)	2.70	1	.09	.27	.72	.33	.33	.13	.13	.13	.13	.13	.13
		2	.06	.27	.60	.33	.33	.42	.42	.42	.42	.42	.42
(1)	5.40	1	.59	.54	4.00	.93	.93	.50	.50	.50	.50	.50	.50
		2	.39	.54	3.17	.93	.93	.50	.50	.50	.50	.50	.50
(2)	5.40	1	.31	.54	2.86	.93	.93	.40	.40	.40	.40	.40	.40

SUMMARY

The author of the EPICENTRE software presents the design method developed on a microcomputer for the general study of irregular shaped buildings. It features the modal analysis and seismic computation of bracing systems made up of thin walled panels connected by lintels.

After indicating the theoretical aspects on the application of the matrix method by transfer to the dynamic analysis of buildings — the very basis of the study, the author rapidly describes the software (a dynamic extension of the EOLE software for the static computation of stiffening with thin walled panels + lintels, given elsewhere in this issue, section IA 50) then presenting a practical example.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Autor des Software-Programms EPICENTRE stellt hier diese auf Mikro-Rechner entwickelte Rechenmethode vor, die es erlaubt, bei der allgemeinen Berechnung unregelmäßiger Gebäude die Modalanalyse und die Berechnungen zur Erdbebensicherung von Aussteifungssystemen vorzunehmen, die aus untereinander durch Stürze verbundenen Scheiben bestehen.

Nach einer kurzen Darstellung der theoretischen Aspekte zur Anwendung des auf die dynamische Bauwerksberechnung übertragenen Matrizenverfahrens, das den Kern der Untersuchung darstellt, beschreibt der Autor das Programm selbst und gibt ein Anwendungsbeispiel (es handelt sich um die dynamische Erweiterung des Programms EOLE für die statische Berechnung von Aussteifungen aus Scheiben und Stürzen, wie es in Heft IA 50 dieser Zeitschrift dargestellt wurde).

RESUMEN

En el presente artículo, el autor del programa de informática EPICENTRE presenta este método de cálculo desarrollado en un microordenador que permite realizar, en el estudio general de los edificios irregulares, el análisis modal y el cálculo sísmico de los sistemas de paravientos formados por pantallas unidas por medio de dinteles.

Tras exponer los aspectos teóricos relativos a la aplicación del método de las matrices transfer al análisis dinámico de los edificios, que constituye la base del estudio, el autor describe rápidamente el programa propiamente dicho (extensión dinámica del programa EOLE que permite efectuar el cálculo estático de paravientos de pantallas + dinteles, expuesto en esta revista, fascículo IA 50) y, acto seguido, presenta un ejemplo de aplicación.

Les thèses et la méthode d'exposition adoptées par les auteurs peuvent parfois heurter certains points de vue habituellement admis. Mais il doit être compris que ces thèses, à l'égard desquelles l'Institut Technique ne saurait prendre parti, ne visent en rien les personnes ni le principe des Institutions.

© 1988 by S.E.B.T.P. (S.A.R.L.)

