

FRCEA-TH-559 Pub n° 9800 6432



FR9806103

Section INIS
Doc. enreg. le : 26/3/88
TRN : FR 9.80.6.163
Destination : I.I.D.D.

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE
DRN/DMT/SEMT/EMSI
CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES de Saclay
91191 GIF S/ YVETTE

APPLICATION DES ELEMENTS GLOBAUX A UNE STRUCTURE EN BETON ARME

ODILE MORAND

stage du 6 avril au 30 juin 1994

- D.E.A. DE MECANIQUE DES SOLIDES ET STRUCTURES -
UNIVERSITE PARIS VI
OPTION IV

RESPONSABLE DE L'OPTION : René-Jean GIBERT
RESPONSABLE DE STAGE : Sylvain LAVARENNE

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....p.1

PREMIERE PARTIE ANALYSE DE LA STRUCTURE

I - Présentation de la structure.....p.2

II - Etages en portique.....p.2

1 - Premier étage.....p.2

1 - 1 - Etude du premier etage.....p.2

1 - 2 - Modélisation retenue.....p.4

 a) Poutre et poteaux.....p.4

 b) Remarques sur les autres éléments.....p.4

1 - 3 - Conditions aux limites.....p.5

2 - Second étage.....p.5

2 - 1 - Etude du second etage.....p.5

2 - 2 - Modélisation retenue.....p.5

2 - 3 - Conditions aux limites.....p.6

3 - Sixième étage.....p.6

III - Etages avec voiles.....p.6

1 - Troisième étage.....p.6

1 - 1 - Etude du troisieme etage.....p.6

1 - 2 - Modélisation retenue.....p.7

 a) Poteaux.....p.7

 b) Voile VOIL1 : voile porteur.....p.7

 c) Remarques sur les autres éléments.....p.7

1 - 3 - Conditions aux limites.....p.7

2 - Quatrième et cinquième étages.....	p.8
2 - 1 - Etude de ces deux étages.....	p.8
2 - 2 - Modélisation retenue.....	p.8
a) Poutre et poteaux.....	p.8
b) Voile porteur dans le plan.....	p.9
c) Remarques sur les autres éléments.....	p.9
2 - 3 - Conditions aux limites.....	p.9
3 - Septième étage.....	p.10
3 - 1 - Etude de cet étage.....	p.10
3 - 2 - Remarques.....	p.10

DEUXIEME PARTIE

CREATION DES ELEMENTS GLOBAUX

I - Simulation numérique d'un chargement monotone.....	p.11
1 - Définition du chargement appliqué.....	p.11
2 - Point de rupture local et point de rupture global.....	p.11
3 - Etude détaillée du premier étage.....	p.12
3 - 1 - Etude pour un chargement positif.....	p.12
3 - 2 - Etude pour un chargement négatif.....	p.13
3 - 3 - Influence du sens du chargement.....	p.13
4 - Les autres étages.....	p.14
4 - 1 - Commentaires sur ces résultats.....	p.14
a) Second étage.....	p.14
b) Sixième étage.....	p.14
II - Application des éléments globaux.....	p.15
1 - Qu'est-ce qu'un élément global ?.....	p.15
2 - Méthode de calcul.....	p.15
3 - Application à chaque sous-structure en portique.....	p.16
3 - 1 - Premier étage.....	p.16
3 - 2 - Second étage.....	p.16
3 - 3 - Sixième étage.....	p.17
4 - Commentaires.....	p.17

CONCLUSION.....p.18

annexes

- a** - Maillage des étages
- b** - Premiers modes de chaque étage pour la bande de fréquences 0 - 60 hz
- c** - Résultats
 - c - 1** - Sous chargement statique monotone
 - c - 2** - Pour les éléments globaux
- d** - Notes sur l'élément global

bibliographie

RESUME

Nous nous sommes proposés d'effectuer une analyse sismique d'une structure complexe en béton armé comportant des portiques et des voiles porteurs. Cette étude devait utiliser les éléments globaux de CASTEM 2000 afin de réduire les temps de calcul pour les simulations dynamiques temporelles. Ces éléments globaux sont en fait des systèmes à un degré de liberté comportant une loi de comportement non linéaire représentative du béton armé.

Pour les étages dont le fonctionnement était dominé par les voiles porteurs, nous n'avons pas pu trouver une modélisation, adaptée à notre méthodologie, qui nous aurait permis de concevoir les éléments représentatifs.

En ce qui concerne les étages en portique, nous avons réalisé des simulations de chargements statiques monotones qui nous ont renseigné sur le comportement local et global de ces structures. Nous avons donc pu réaliser des éléments globaux représentatifs de ces structures.

Les résultats obtenus sont satisfaisants pour ces étages fonctionnant essentiellement en flexion et pourront être exploités dès que les autres étages auront pu être traités.

INTRODUCTION

Pour dimensionner les installations nucléaires (centrales ou usines de retraitement), il faut tenir compte des risques éventuels tels que les séismes. Cependant ces installations ont en général des structures complexes composées de poteaux, poutres, voiles et portiques en béton armé.

Les calculs de vérification de la tenue aux séismes de ces installations sont non seulement longs mais aussi très coûteux car le comportement du béton armé est non-linéaire à cause notamment, de la fissuration du béton et de la plastification des armatures en acier. Pour réduire ces deux inconvénients, le SERVICE des ETUDES de MECANIQUE et de THERMIQUE (S.E.M.T) cherche à développer des éléments dits éléments globaux, spécifiques aux structures en béton armé, pour son code de calcul CASTEM 2000.

Ces éléments globaux sont conçus pour permettre la condensation de structures complexes et prendre en compte le comportement non-linéaire du béton armé.

Le but de ce travail est de faire une démonstration de la faisabilité d'une étude de vérification employant ces éléments globaux sur l'exemple d'une tranche d'usine de retraitement de la Hague, déjà analysée suivant d'autres méthodes.

Ce morceau de bâtiment comporte sept étages et sa structure porteuse est très irrégulière suivant l'axe vertical.

Dans un premier temps nous allons 'sous-structurer' cette tranche de bâtiment étage par étage.

Puis dans la deuxième partie, nous allons faire l'étude de chaque étage pour les aspects concernant leur comportement linéaire, vibratoire ou non-linéaire sous chargement monotone statique. Nous créerons ensuite avec les résultats de l'étude, les éléments globaux représentant chaque étage.

Nous nous efforcerons de dégager les difficultés pour trouver une modélisation adaptée à chaque type de sous-structure (suivant que la sous-structure est en portique ou à voile porteur).

L'étape suivante du travail sera d'appliquer à l'ensemble de la tranche de bâtiment un séisme synthétique pour faire une étude dynamique et vérifier la tenue de la structure complète et de faire une étude selon les recommandations du PS92 par une méthode statique équivalente, pour obtenir une base de comparaison.

PREMIERE PARTIE

ANALYSE DE LA STRUCTURE

I - PRESENTATION DE LA STRUCTURE

Nous nous proposons d'étudier les effets lors d'une sollicitation accidentelle de type sismique, sur une tranche d'usine de retraitement de la Hague.

Ce bâtiment de sept étages ne présente pas de symétrie géométrique, ce qui rend plus complexe son étude.

Le plus difficile sera de passer d'une structure tridimensionnelle à une modélisation bidimensionnelle simple. Pour ce faire nous allons effectuer une étude en deux dimensions des premier, second, troisième, sixième et septième étages. Pour le quatrième et le cinquième étages, leur complexité nous impose une étude spécifique plus complète.

Nous effectuerons l'analyse de ce bâtiment suivant les critères du B.A.E.L 91 en ce qui concerne le comportement des matériaux.

Nous utiliserons pour la modélisation de ce portique, trois types de modèles :

① le modèle PLASTIQUE GAUVAIN qui est un modèle homogénéisé du béton armé pour les éléments en flexion.

② le modèle BETON PLASTIQUE où le comportement du béton est non-linéaire dans le domaine des tractions et linéaire par ailleurs.

③ le modèle PLASTIQUE PARFAIT qui est un modèle de Von Mises sans écrouissage pour le ferrailage des voiles.

II - ETAGES EN PORTIQUE

1 - PREMIER ETAGE

1 - 1 - ETUDE DU PREMIER ETAGE

La structure du premier étage est simple. Il est constitué de deux poteaux, d'une poutre et d'un plancher.

Dans le maillage de cet étage, il faut certes tenir compte de la composition exacte de la structure, mais également de la répartition du ferrailage dans le modèle.

Etant donnés les dimensions de la structure du premier étage nous pouvons dire qu'elle fonctionne principalement en flexion car ces poteaux ont un élancement réduit de 23. (L'élancement réduit est le rapport entre la longueur libre de flambement et le rayon de giration).

La descente des charges du second étage est reprise par les deux poteaux appelés POTP1 et POTM1.

Dans cet étage le ferrailage est :

- vertical au niveau des poteaux, et symétrique donc ne pose pas de problème.
- horizontal et dissymétrique pour la poutre.

En fait, la poutre est modélisable par une poutre biencastée soumise à son poids propre (qui est un chargement uniformément réparti). Le moment fléchissant dans ce cas de figure est parabolique et ses extrema se situent aux bords et au centre de la poutre. Ce sont donc les parties les plus sollicitées. De ce fait, le ferrailage est renforcé à ces niveaux. Ceci étant, cette répartition n'est pas tout à fait symétrique.

La poutre est découpée de façon très régulière et les tronçons en travée sont à peine plus longs que sur appui.

Nous aurions pu choisir un maillage plus complexe de la poutre, où chaque zone de ferrailage distincte serait représentée. Cependant, vu la longueur des zones de transition, l'erreur commise est négligeable.

Le premier étage sera donc constitué :

- de matériaux : le béton a une résistance de 30 MPa, une masse volumique de 2400 kg.m^{-3} et un coefficient de Poisson de 0.2. L'acier a une masse volumique de 7800 kg.m^{-3} .
- de deux poteaux : leur section est de 0.39 m^2 , leur inertie et leur module d'Young (qui sont homogénéisés) sont de $1.2238 \times 10^{-2} \text{ m}^4$ et $42170 \times 10^6 \text{ Pa}$ respectivement, leur hauteur est de 2.05 m.
- d'une poutre : ses dimensions sont (6 m \times 0.3 m \times 0.6 m), sa masse de 2592 kg.
- d'un plancher : sa masse est de 12960 kg.

Aussi le maillage des autres étages en portique poteaux-poutre se fera de la même manière.

1 - 2 - MODELISATION RETENUE

a) Poteaux et poutres

Pour ces deux éléments nous avons utilisé le modèle PLASTIQUE GAUVAIN sur des éléments SEG2, éléments définis par deux points.

Ce modèle est un modèle de plasticité globale pour les éléments POUTRE en béton armé soumis à des chargements où la flexion est dominante.

Les lois de comportement utilisées sont issues du module de calcul SAMSON, comme toutes celles utilisées par la suite pour les éléments GAUVAIN. Les données nécessaires au module SAMSON sont les caractéristiques des matériaux, de la section (géométrie du béton et position des armatures). Des résultats de SAMSON, nous extrayons ainsi les lois de comportement global (M, χ) et (σ, ϵ) , mais nous obtenons également l'évolution des contraintes et des déformations en tout point de la section que ce soit pour l'acier ou le béton. Ceci nous permet également de passer du comportement local au comportement global et inversement.

Ces lois de comportement sont symétriques pour les poteaux, mais pas pour la poutre car le ferrailage de la section n'y est pas symétrique.

Pour cet étage les poteaux sont divisés en cinq éléments et la poutre en onze éléments.

b) Remarques sur les autres éléments

Nous aurions pu mailler le plancher (6 m × 1.5 m × 6 m) qui est entièrement soutenu par la poutre (6 m × 0.3 m × 0.6 m) et analyser sa contribution à la rigidité de la structure.

Mais il est préférable pour des raisons de souplesse de modélisation, de calculer une masse volumique équivalente de la poutre en y incluant la contribution du plancher car les dimensions de celui-ci font qu'il n'intervient pratiquement pas dans la rigidité de l'étage. Nous avons fait le calcul suivant :

masse équivalente = masse de la poutre + masse du plancher

soit

$$\rho_{\text{équivalente}} * S_{\text{équivalente}} = \rho_{\text{poutre}} * S_{\text{poutre}} + \rho_{\text{plancher}} * S_{\text{plancher}}$$

Or nous ne nous intéressons qu'à la contribution du plancher sur le tronçon de poutre donc la surface équivalente n'est autre que la surface de la poutre.

Ainsi la masse volumique qui sera introduite dans le modèle est donnée par :

$$\rho_{\text{équivalente}} = \rho_{\text{poutre}} + \rho_{\text{plancher}} \frac{S_{\text{plancher}}}{S_{\text{poutre}}}$$

1 - 3 - CONDITIONS AUX LIMITES

En supposant que les fondations du bâtiment constituent un encastrement parfait, nous bloquons le déplacement et la rotation des deux poteaux du premier étage.

Pour le premier étage, la modélisation est faite en vingt et un éléments et vingt-deux noeuds.

2 - SECOND ETAGE

2 - 1 - ETUDE DU SECOND ETAGE

Ce second étage diffère du premier étudié précédemment par le poteau de gauche qui est renforcé par deux petits voiles de refend. Ces derniers sont perpendiculaires au plan de coupe et de part et d'autre du poteau appelé POTP2.

Cet étage fonctionne lui aussi en flexion vu les dimensions de ces poteaux élancés. Le voile de refend associé au poteau POTP2 rendra ce dernier plus rigide.

La disposition du ferrailage suit le même principe que celui du premier étage. De même, la poutre POU2 du second étage a été divisée en trois portions de poutre et ce pour les mêmes raisons.

Ainsi le second étage est constitué :

- de matériaux : le béton a une résistance de 30 MPa, une masse volumique de 2400 kg.m^{-3} et un coefficient de Poisson de 0.2. L'acier a une masse volumique de 7800 kg.m^{-3} .
- de deux poteaux : leur section est de 0.39 m^2 et 1.19 m^2 (nous prendrons 1.58 m^2), leur inertie et leur module d'Young (qui sont homogénéisés) sont de $1.2238 \times 10^{-2} \text{ m}^4$ et $42170 \times 10^6 \text{ Pa}$ respectivement ou $2.3250 \times 10^{-2} \text{ m}^4$ et $41143 \times 10^6 \text{ Pa}$, leur hauteur est de 3.95 m. Nous moyennerons le module d'Young, d'où la valeur introduite $41656.5 \times 10^6 \text{ Pa}$.
- d'une poutre : ses dimensions sont (6 m \times 0.25 m \times 0.5 m), sa masse de 1800 kg.
- d'un plancher : sa masse est de 12960 kg.

2 - 2 - MODELISATION RETENUE

Ce qui change de l'étage précédent, c'est le voile de refend qui prolonge de part et d'autre le poteau POTP2, et l'état de contrainte des poteaux dû à la descente des charges. La modélisation du voile sera intégrée dans la loi de comportement du poteau de gauche POTP2 après avoir introduit des caractéristiques équivalentes telles que le module d'Young E, la section droite S et l'inertie I dans le module SAMSON du code de calcul. Nous obtiendrons ainsi une loi de comportement décrivant le comportement général du poteau et du voile de refend.

Les poteaux seront divisés en une vingtaine d'éléments et la poutre en une trentaine d'éléments.

2 - 3 - CONDITIONS AUX LIMITES

Ici également les poteaux ont été encastres en pied. Ceci s'explique par le fait que le ferrailage des poteaux est continu d'étage en étage et renforcé en pied des poteaux du fait des règles constructives (recouvrement des aciers et cadres d'effort tranchant plus serrés) ce qui bloque la rotation des poteaux en pied.

3 - SIXIEME ETAGE

Mises à part les données géométriques qui sont différentes, le sixième étage a une structure semblable à celle du premier étage. Les commentaires faits pour l'étage précédent sont donc valables pour cet étage.

Le sixième étage sera constitué :

- de matériaux : le béton a une résistance de 30 MPa, une masse volumique de 2400 kg.m^{-3} et un coefficient de Poisson de 0.2. L'acier a une masse volumique de 7800 kg.m^{-3} .
- de deux poteaux : leur section est de 0.25 m^2 , leur inertie et leur module d'Young (qui sont homogénéisés) sont de $5.4449 \times 10^{-3} \text{ m}^4$ et $42413 \times 10^6 \text{ Pa}$ respectivement, leur hauteur est de 3.41 m.
- d'une poutre : ses dimensions sont (6 m \times 0.3 m \times 0.7 m), sa masse de 3024 kg.
- d'un plancher : sa masse est de 12960 kg.

III - ETAGES AVEC VOILES

1 - TROISIEME ETAGE

1 - 1 - ETUDE DU TROISIEME ETAGE

Cet étage de la tranche de bâtiment est très différent des deux étages étudiés jusqu'ici. Il comporte en effet un voile en béton armé (le voile VOIL1) sur toute sa longueur .

Si la descente des charges du quatrième étage est reprise par les deux poteaux POTP3 et POTM3, le plancher PLA3 est supporté par le voile VOIL1 uniquement. Ce troisième étage ne comporte pas de poutre.

Nous avons modélisé cet étage par un seul élément global qui représentera l'ensemble du comportement de la sous-structure.

Si, les poteaux fonctionnent essentiellement en flexion ainsi que le voile de refend (puisque' il n'est pas sollicité dans son plan), le voile VOIL1 sollicité dans son plan, fonctionne en cisaillement et également en flexion car son élancement géomécanique est de 0.8. (L'élancement géomécanique est le rapport entre la hauteur et la largeur)

C'est pourquoi il faudra modéliser finement cet étage afin d'identifier convenablement le mode de comportement vibratoire dominant et le mécanisme de ruine (flexion ou effort tranchant, ou plus vraisemblablement concurrence entre les deux phénomènes) .

1 - 2 - MODELISATION RETENUE

a) Poteaux

Nous utilisons toujours le modèle PLASTIQUE GAUVAIN pour décrire ces éléments. Les lois de comportement (σ, ϵ) sont issues du module SAMSON de CASTEM 2000. Pour cet étage les poteaux sont divisés en dix-sept éléments.

b) Voile VOIL1 : voile porteur

Le ferrailage du voile est régulier et renforcé en partie basse conformément au B.A.E.L 91. Les lois de comportement que nous prenons en compte sont les valeurs réglementaires issues de l'application du B.A.E.L 91.

Nous avons tenté de représenté le voile en utilisant le modèle PLASTIQUE BETON mais après l'apparition de la première fissure pour un déplacement de 0.7 mm, la procédure NONLIN du code de calcul CASTEM 2000 diverge. Nous n'obtenons donc que les limites du domaine de comportement élastique.

Comme nous n'avons trouvé de modèle réellement adapté à notre cas de figure et permettant une étude jusqu'à la ruine de la structure, nous ne pouvons faire convenablement l'étude des étages comportant des voiles à l'heure actuelle.

c) Remarques sur les autres éléments

Le plancher n'est pas pris en compte dans la raideur de la sous-structure, il n'intervient que par sa masse, celle-ci est répartie uniformément sur le voile VOIL1.

Quant au voile de refend, il est introduit dans la rigidité et la masse du poteau POTP3. Cette dernière est rentrée dans les caractéristiques du poteau dans le module SAMSON.

1 - 3 - CONDITIONS AUX LIMITES

Le voile VOIL1 et les poteaux sont encastés à leur base à cause des fers en attente.

Comme le ferrailage est continu à travers les poteaux et le voile VOIL1, le déplacement horizontal doit être relié entre les poteaux et les bords du voile à l'aide de

l'opérateur RELA. De même la solidarisation du voile VOIL1 et des poteaux avec le plancher PLA3 impose la continuité des déplacements verticaux.

La partie béton du troisième étage (poteaux POTP3, POTM3 et voile VOIL1) représente 432 éléments et 450 noeuds. Quant à la sous-structure complète (coffrage et ferrailage), elle comporte 817 éléments et 433 noeuds.

2 - QUATRIEME ET CINQUIEME ETAGES

2 - 1 - ETUDE DE CES DEUX ETAGES

Ces deux étages de la tranche de bâtiment étudiée sont les plus hétérogènes de la structure. En effet les éléments qui soutiennent ces étages sont constitués de voiles qui travaillent dans le plan de sollicitation, et de poteaux.

La descente des charges des étages supérieurs six et sept est assurée par les poteaux. Cependant les planchers des deux étages étudiés ne sont pas supportés de la même manière : le plancher du quatrième étage est entièrement repris par un voile tandis que celui du cinquième étage est supporté en partie par un voile et une poutre, cette dernière étant reprise par un poteau.

Nous avons jugé préférable d'intégrer cette complexité de construction dans un élément global unique qui représentera le comportement d'ensemble de ces deux étages plutôt que de créer un élément global pour chaque étage comme nous l'avons fait pour les autres niveaux.

Cela nous permet ainsi de maîtriser les difficultés liées à la singularité des descentes de charges entre les voiles et les poteaux.

A priori, le fonctionnement des deux étages dans le plan sera dominé par celui du voile et le principal mode de sollicitation devrait être le cisaillement. Néanmoins les points de la structure caractérisant les changements de comportement peuvent résulter d'éléments fonctionnant en flexion (poteau droit ou poutre 20 cm × 40 cm).

Il faut donc procéder à une modélisation fine de ce sous-ensemble pour obtenir la loi de comportement enveloppe de l'élément global représentatif et ses points particuliers.

2 - 2 MODELISATION RETENUE POUR CES DEUX ETAGES

a) Poteaux et poutre

Pour ces deux éléments nous avons utilisé le modèle PLASTIQUE GAUVAIN sur des éléments SEG2 du code de calcul CASTEM 2000.

Les diagrammes relatifs aux lois de comportement (σ, ϵ) sont issus de l'exploitation des résultats donnés par le module SAMSON comme pour les étages précédents.

Le poteau de droite est décrit avec deux lois de comportement différentes suivant que la portion du poteau appartienne au quatrième étage (POTM4) ou au cinquième étage (POTM5). Ceci permet de tenir compte de la variation de l'effet normal pour POTM4 et POTM5. De même pour la poutre qui reprend une partie du plancher du cinquième étage, nous distinguons la position du ferrailage sur appui et en travée.

A chaque niveau, les poteaux sont divisés en une dizaine d'éléments. Il en est de même pour la poutre.

b) Voile porteur dans le plan

Pour le voile nous avons modélisé séparément le béton et le ferrailage. Nous n'avons pas utilisé un modèle homogénéisé comme le modèle GAUVAIN dont nous nous sommes servi précédemment.

Le béton du voile est décrit avec le modèle PLASTIQUE BETON appuyé sur des éléments QUA4.

Les armatures faisant seize millimètres de diamètre, ont été décrites avec le modèle PLASTIQUE PARFAIT BARR appuyé sur des éléments SEG2.

Les valeurs décrivant les lois de comportement des voiles correspondent aux valeurs réglementaires du B.A.E.L 91.

Le ferrailage du voile est très régulier, mis à part le renforcement en partie basse, et conforme au B.A.E.L 91.

c) Remarques sur les autres éléments

La contribution des planchers et du voile perpendiculaire au plan de sollicitation n'est pas prise en compte dans la rigidité. Ces éléments n'interviennent pratiquement que par leur masse. Ces masses sont, soit réparties le long des arêtes des voiles qui jouxtent ces éléments (cas du plancher du troisième étage), soit incorporées à la masse de la poutre porteuse (cas des planchers des étages un et deux et de la portion de plancher en cinquième étage).

2 - 3 - CONDITIONS AUX LIMITES

Les voiles et les poteaux sont encastrés à leur base car le ferrailage est continu d'étage en étage. La poutre est elle, encastrée dans le voile pour son extrémité gauche.

Le poteau de gauche et le voile sont solidarités horizontalement et verticalement par l'opérateur RELA. En effet les treillis sont prolongés dans le poteau donc impose la continuité

des déplacements horizontaux, et les dalles du plancher impose celle des déplacements verticaux.

Pour ces deux étages, la partie béton représente 395 éléments (poutre, poteaux et voile).

L'ensemble (ferraillage compris) comporte 710 éléments et 381 noeuds.

3 - SEPTIEME ETAGE

3 - 1 - ETUDE DE CET ETAGE

Cet étage ressemble au troisième, sans voile de refend sur le poteau de gauche, mais avec une poutre qui reprend les charges du toit.

Certains éléments fonctionnent en flexion (poteau, poutre) et d'autres seront en mode de cisaillement et en mode de flexion à la fois. Cependant le comportement global de cette sous-structure sera dominé par celui du voile car son élancement géomécanique est de 0.78.

3 - 2 -REMARQUES

Cet étage ayant la même structure que le troisième, nous y avons rencontré les mêmes difficultés quant au choix d'un modèle descriptif approprié.

Pour la modélisation à retenir et les conditions aux limites, les commentaires faits pour le troisième étage restent encore valable pour celui-ci.

DEUXIEME PARTIE

CREATION DES ELEMENTS GLOBAUX

I - SIMULATION NUMERIQUE D'UN CHARGEMENT MONOTONE

1 - DEFINITION DU CHARGEMENT APPLIQUE

Pour faire l'étude du bâtiment sous chargement monotone nous avons tout d'abord effectué un pilotage en force en tête de poteau de la sous-structure.



figure n°1
essai de
chargement
monotone à
force imposée

Cependant la procédure NONLIN du code de calcul CASTEM 2000 demandait l'utilisation de certaines options qui n'étaient pas toujours maîtrisées.

Nous avons donc effectué un chargement à déplacement imposé progressif au lieu de celui à force imposée.

Comme la structure que nous étudions n'est pas symétrique, nous avons dû appliquer ces chargements dans un sens puis dans l'autre.

2 - POINT DE RUPTURE LOCAL ET POINT DE RUPTURE GLOBAL

Grâce au module SAMSON de CASTEM 2000, nous avons tiré les lois de comportement (σ, ϵ) de chaque élément constitutif d'une sous-structure. Nous pouvons ainsi

déterminer pour quel déplacement moyen un élément atteint sa contrainte ultime, nous parlerons alors d'un point de rupture local (P.R.L.) d'un élément de la sous-structure.

Lorsque nous poursuivons le chargement, la sous-structure atteint un état où la descente des charges (planchers et étages supérieurs) ne peut plus être assurée. Nous parlons alors de point de rupture global (P.R.G.) de la sous-structure.

Pour des éléments en portique, lorsqu'un poteau est détérioré en pied, la descente des charges des étages supérieurs est parfois encore assurée par la redistribution plastique des efforts, jusqu'à ce qu'une liaison poutre-poteau ou l'autre liaison poteau-base de l'autre poteau cède à son tour. Lorsqu'une liaison poutre-poteau cède en premier, la descente des charges du plancher ne peut plus être assurée.

Les P.R.L. peuvent être distingués sur les diagrammes "moment à l'encastrement-déplacement moyen", puisqu'ils correspondent à une baisse de raideur de la sous-structure, qui se traduit par un affaiblissement très visible de la pente de cette loi de comportement.

3 - ETUDE DETAILLEE DU PREMIER ETAGE

3 - 1 - ETUDE POUR UN CHARGEMENT POSITIF

Le premier élément qui atteint sa contrainte ultime (1^{er} P.R.L.) est le poteau de gauche POTP1, en pied, au point p1, après un déplacement moyen de 3.2 mm. (Le déplacement moyen est la moyenne des déplacements en tête de poteaux).

Pour le premier étage, le P.R.G. correspond au point pour lequel la section gauche de la portion de poutre P56 cède, après que le poteau POTP1 ait atteint sa contrainte maximale .

Le déplacement moyen correspondant au P.R.G, est de 4.4 mm et le moment à l'encastrement de -1.224 MN.m .

Lorsque ce point est atteint, une étude locale de la sous-structure montre que chaque élément a dépassé sa limite plastique en tête et en pied, sauf la portion de poutre P56 dont la section extrême droite plastifie toujours.

Nous allons maintenant étudier le comportement global avant ruine du premier étage à l'aide de la loi de comportement " moment à l'encastrement-déplacement moyen".

La sous-structure a un comportement élastique jusqu'au point correspondant à un déplacement moyen de 0.7 mm et un moment à l'encastrement de -0.592 MN.m .

La pente élastique ainsi obtenue est de -845.71 MN.

La phase d'endommagement cesse lorsque le moment à l'encastrement est de -1.224 MN.m et le déplacement moyen de 4.4 mm . Ce point correspond également au point ultime choisi.

La pente post-élastique est de -170.81 MN .

La phase plastique cesse lorsque le déplacement moyen est de 12.2 mm .

3 - 2 - ETUDE POUR UN CHARGEMENT NEGATIF

Le premier élément à atteindre sa contrainte maximale est également le poteau de gauche POTP1, en pied avec un déplacement moyen de -2.75 mm . Ce déplacement correspond à un moment à l'encastrement de 0.944 MN.m . A ce point le poteau de droite POTM1 et la poutre POU1 ont franchi leur limite élastique au niveau de leur section d'entrée. Le reste des sections est toujours dans sa phase élastique.

L'étude du comportement global de la structure permet de dégager les deux points caractérisant les changements de phase de la sous-structure.

La phase élastique cesse lorsque le déplacement moyen est de -0.67 mm et le moment à l'encastrement de 0.584 MN.m .

La pente élastique correspondante est de -871.64 MN .

La phase post-élastique s'achève lorsque le déplacement moyen est de -4.33 mm et le moment à l'encastrement de 1.216 MN.m .

La pente correspondante est de -172.68 MN .

Le point de rupture quant à lui, correspond au point pour lequel le poteau de droite POTM1 a atteint sa limite de rupture et ce pour un déplacement moyen de -9.7 mm et un moment à l'encastrement de 1.472 MN.m .

3 - 3 -INFLUENCE DU SENS DU CHARGEMENT

Suivant le signe du déplacement imposé, le déplacement résultant varie. L'écart observé oscille entre 0.15 mm et 0.2 mm soit 1.6% sur la rupture. Ce qui est faible.

Le comportement des éléments est également sensible au sens du chargement. Ainsi si, lors du chargement positif, chaque élément avait dépassé sa limite élastique lorsque le poteau de gauche POTP1 avait atteint sa contrainte maximale, il n'en est pas de même du chargement négatif.

En effet, une seule extrémité de chaque élément a atteint sa limite élastique, l'autre étant toujours élastique, lorsque que le poteau POTP1 s'endommage.

De plus, si le poteau POTP1 cède au bout de 3.2 mm de déplacement moyen au cours du chargement positif, il ne résiste plus après un déplacement de 2.75 mm au cours du chargement dans le sens opposé.

Toutes ces variations, sur le déplacement moyen, le comportement local et global de la sous-structure s'explique du fait de la non-symétrie de la sous-structure.

Cette irrégularité s'observe au niveau du ferrailage mais surtout au niveau de la distribution des descentes des charges du second étage.

4 - LES AUTRES ETAGES

Comme nous n'avons pas pu trouver de modélisation compatible avec les étages ayant des voiles, l'étude sous chargement monotone statique ne se fera qu'avec les étages en portique, à savoir le deuxième et le sixième (le premier ayant été étudié précédemment) .

Les résultats sont présentés dans les tableaux 1 et 2 de l'annexe c - 1.

4 - 1 -COMMENTAIRES SUR CES RESULTATS

a) Second étage

L'élément dont le P.R.L. constitue le P.R.G. de la sous-structure est le tronçon de poutre P63 au point p3 (bord extérieur du tronçon). Ce P.R.L., qui correspond à un déplacement moyen de 13.9 mm, se trouve dans la phase plastique du comportement global de la sous-structure, que ce soit pour un chargement positif ou un chargement négatif. Dans ce dernier cas ce n'est pas le tronçon P63 qui donne le P.R.G. mais le tronçon P25 (tronçon d'extrémité) au point p2 et pour un déplacement moyen de 14 mm.

b) Sixième étage

C'est le P.R.L. du tronçon de poutre en travée P56, qui constituera le P.R.G. de la sous-structure.

Cette poutre de cet étage a de grandes dimensions par rapport aux poutres des autres étages (section droite 70 cm × 50 cm) ; à ce niveau le ferrailage n'est pas renforcé en partie haute. Nous voyons donc apparaître la rupture de l'élément rapidement par traction de la fibre supérieure, la phase d'endommagement est très courte. Cette particularité est en réalité une erreur de conception : les poteaux auraient dû être plus épais et l'épaisseur de la poutre plus importante.

II - APPLICATION DES ELEMENTS GLOBAUX

1 - QU'EST-CE QU'UN ELEMENT GLOBAL ?

Un élément global est un élément simple qui doit permettre d'obtenir un comportement linéaire et non-linéaire équivalent à une structure.

(- cf. figure n° 2 - cf. annexe d -).

Un étage en portique de la structure étudiée, qui fonctionne principalement en flexion aura pour élément global une poutre encastrée-libre avec une masse en tête (puisque sa masse est essentiellement concentrée au niveau du plancher).

Cette poutre représente dans ce cas, principalement le comportement mécanique des deux poteaux qui soutiennent le plancher.

Nous appliquons à cette poutre encastrée-libre, des caractéristiques homogénéisées et utilisons le modèle PLASTIQUE GLOBAL pour tirer nos résultats.

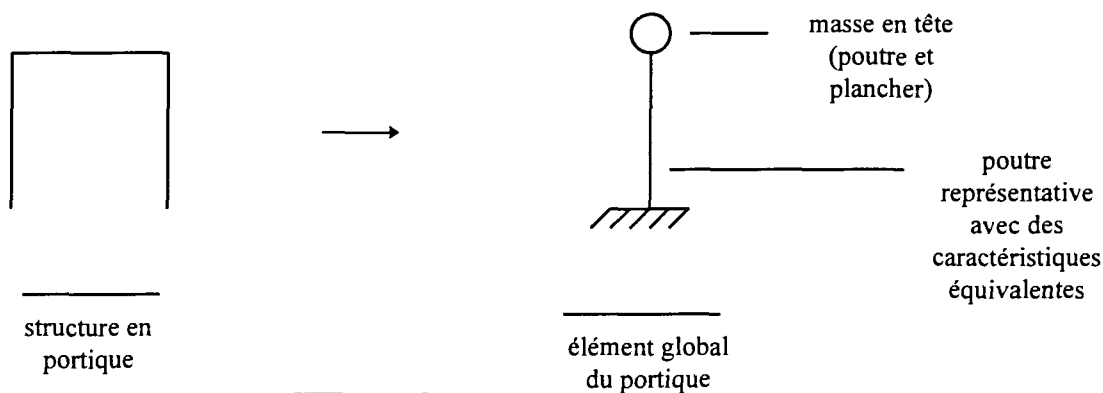


figure n° 2

2 - METHODE DE CALCUL

De la loi de comportement "moment à l'encastrement-déplacement moyen" suivant les deux sens de chargement, nous avons extrait une loi (moment-déplacement) qui constitue maintenant notre loi idéalisée.

En appliquant à l'élément global des caractéristiques équivalentes et cette loi idéalisée, nous observons la courbe moment-déplacement issue d'un chargement similaire à celui de la sous-structure pour contrôler la validité de l'élément global.

La pente de la loi de comportement théorique doit être la même de part et d'autre du déplacement pour la phase élastique. Elle est de la forme $\alpha \frac{EI}{l^3}$ en flexion avec α variable

suivant la structure (E, I, α, l étant les caractéristiques de la poutre support de l'élément global).

Comme nous avons extrait les valeurs de la loi de comportement théorique à la main (donc quelques erreurs peuvent être commises lors du dépouillement), nous nous permettons de modifier le déplacement dans les phases élastiques en les réajustant, connaissant la pente en théorie à partir du calcul modal par exemple. Celle-ci est calculée à partir des valeurs homogénéisées (E, \bar{I}). La différence que nous obtenons est négligeable sur les déplacements.

L'inertie équivalente est calculée à partir de la formule donnant la fréquence pour un mode de flexion d'un système à un degré de liberté, à savoir:

$$\bar{I} = \frac{(2\pi f)^2 \times m \times l^3}{3E}$$

f=fréquence du
1^{er} mode
m=masse de la
poutre et du
plancher

l=hauteur des
poteaux
E=module
d'Young
équivalent

3 - APPLICATION A CHAQUE SOUS-STRUCTURE EN PORTIQUE

3 - 1 - PREMIER ETAGE

Ce premier étage qui fonctionne en flexion a un premier mode à 17.698 Hz. L'inertie équivalente que nous insérons dans l'élément global est de $13.096 \times 10^6 \text{ m}^4$.

La rupture de l'élément global (qui correspond également à sa ruine) se fait après un déplacement de 4.5 mm. Ceci correspond à un moment de 1.172 MN.m .

3 - 2 - SECOND ETAGE

Ce deuxième étage qui fonctionne en flexion a un premier mode à 8.744 Hz. L'inertie équivalente que nous insérons dans l'élément global est de $21.97 \times 10^6 \text{ m}^4$.

La rupture de l'élément global se fait après un déplacement de 12 mm. Ceci correspond à un moment de 1.243 MN.m .

3 - 3 - SIXIEME ETAGE

Ce sixième étage qui fonctionne en flexion à un premier mode à 7.061 Hz. L'inertie équivalente que nous insérons dans l'élément global est de $13.075 \times 10^6 \text{ m}^4$.

La rupture de l'élément global se fait après un déplacement de 1. mm. Ceci correspond à un moment de -0.1584 MN.m .

4 - COMMENTAIRES

Les résultats comparatifs entre les lois provenant du modèle GAUVAIN et celles de l'élément global sont dans les tableaux de l'annexe c - 2.

Les éléments globaux nous permettent d'obtenir des résultats satisfaisants quant aux lois de comportement et aux P.R.G.

L'écart que nous obtenons entre les calculs issus du modèle GAUVAIN et ceux du modèle GLOBAL sont inférieurs à 10 % pour les premiers et second étages, ce qui permet d'avoir une idée sur le comportement réel de ces sous-structures.

Pour le sixième étage, les résultats obtenus sont plus difficiles à prendre en compte du fait de l'écart considérable avec les données issues du modèle GAUVAIN (jusqu'à 40 % d'écart).

CONCLUSION

Nous nous sommes essentiellement intéressés dans ce rapport à la réalisation d'éléments globaux pour faire une étude dynamique d'une structure de Génie Civil complexe.

Pour la représentation des étages dont les éléments fonctionnent essentiellement en flexion, nous sommes parvenus à créer des éléments globaux satisfaisants, dont les comportements statique et dynamique sont représentatifs des sous-structures étudiées. L'utilisation d'une modélisation fine utilisant des modèles GAUVAIN semblent être une méthode convenable pour l'étude de telles structures.

Par contre, en ce qui concerne les étages comportant des voiles, fonctionnant donc simultanément en flexion et en cisaillement, le passage par une modélisation fine utilisant le modèle BETON en contraintes planes n'a pas été concluante pour notre analyse.

La prochaine étape sera de vérifier la cohérence de l'ensemble de la structure, du point de vue vibratoire notamment, après avoir fait l'étude des étages avec voiles. Cette validation faite, nous pourrons faire l'étude dynamique de la structure complète selon le PS92 et comparer les résultats que nous obtiendrons avec ceux des études effectuées précédemment.

ANNEXES

ANNEXE A

MAILLAGE DES ETAGES

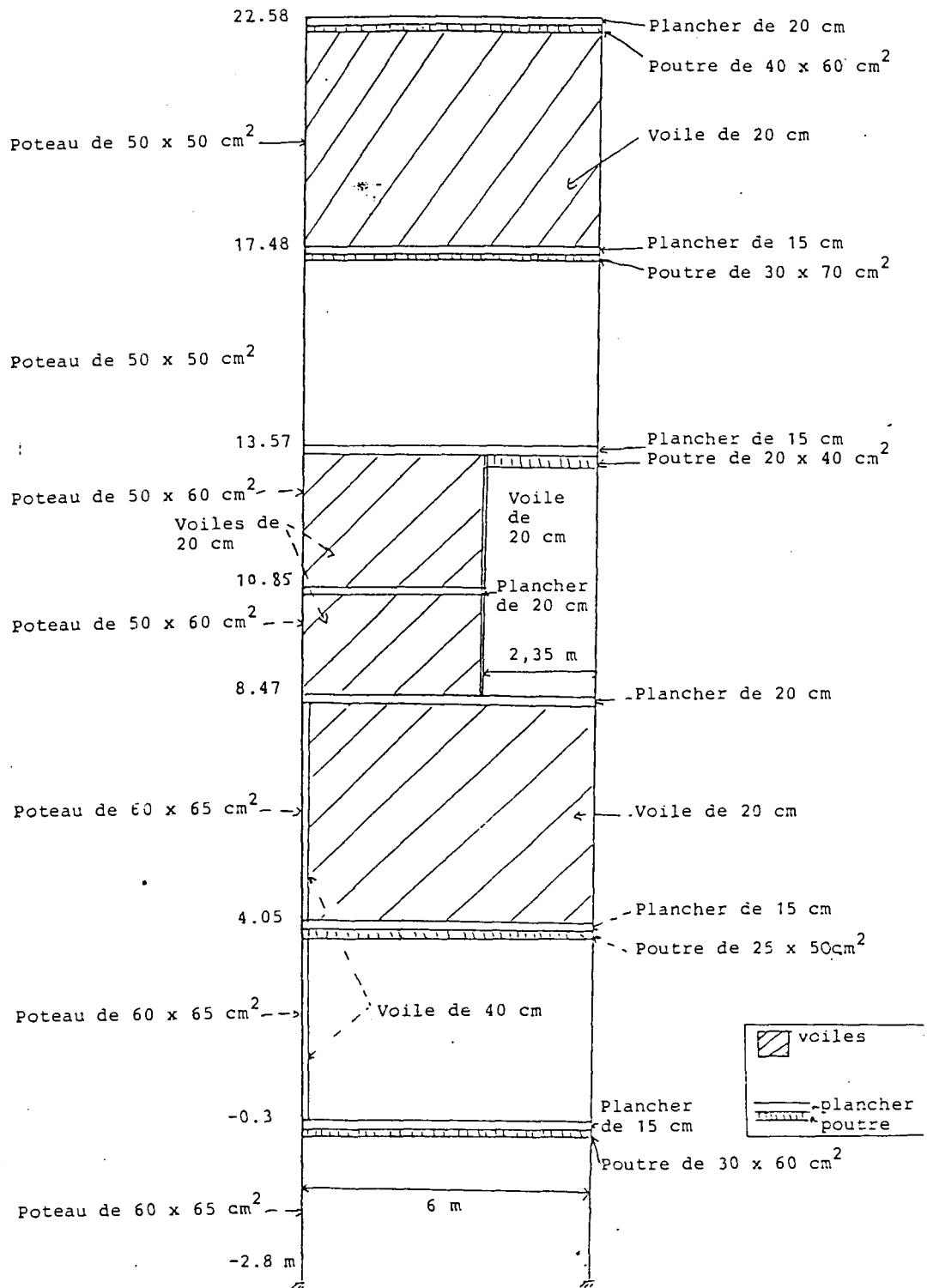
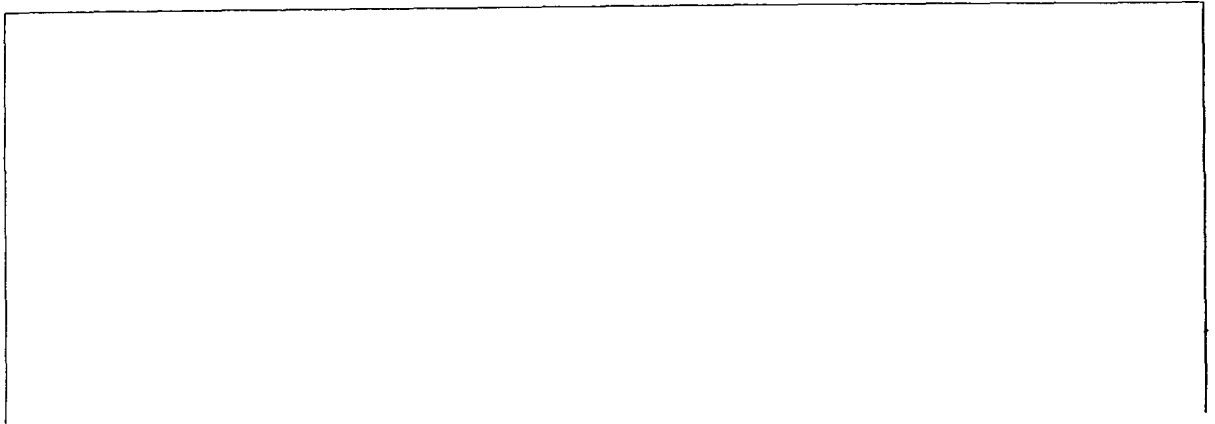


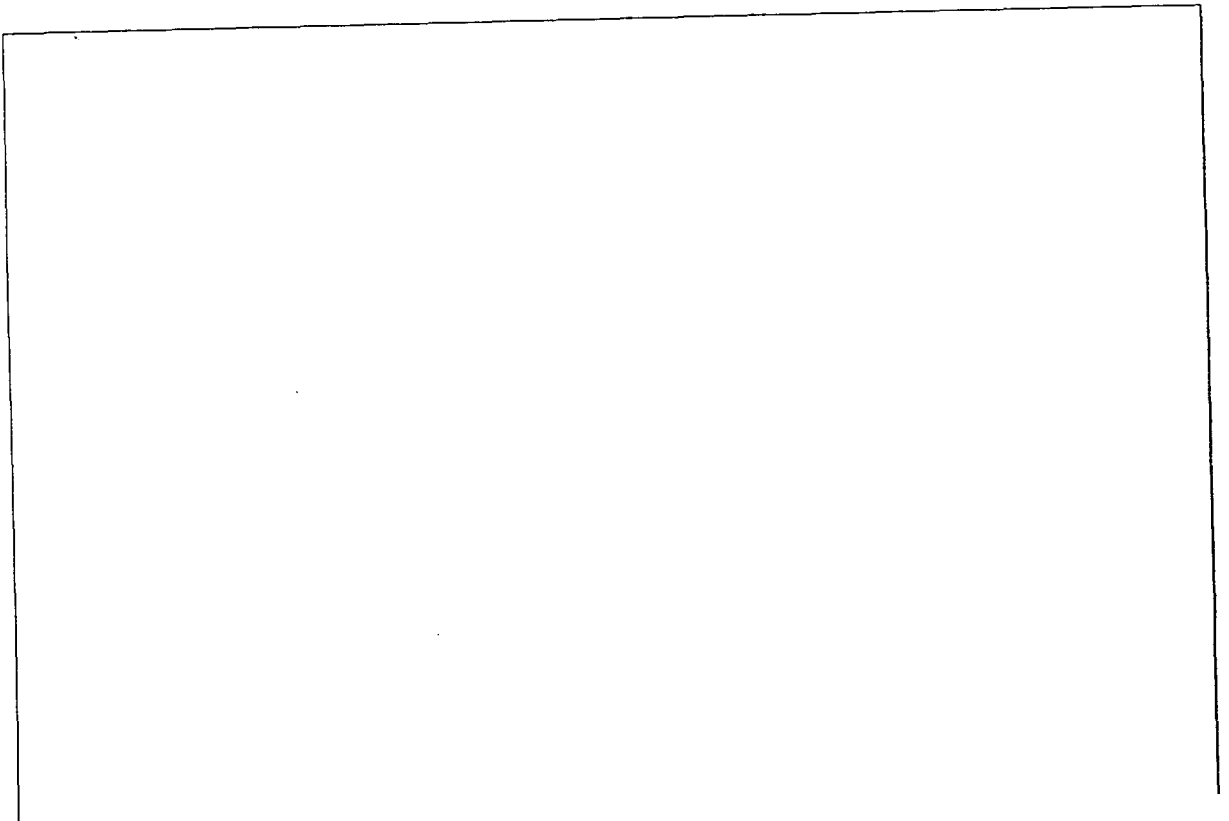
figure a - 0 : Schéma de la structure étudiée

figure a - 1 : Maillage du premier étage



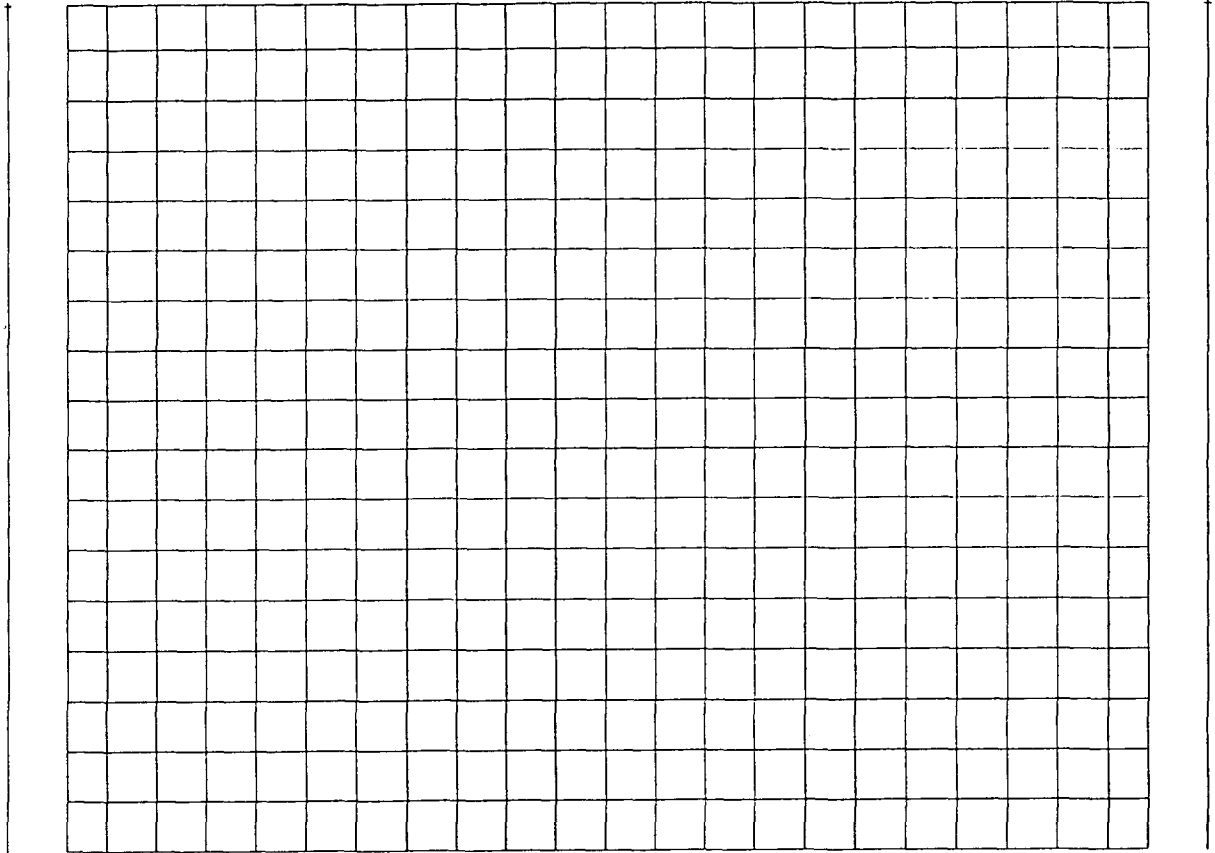
premier etage : 21 elements et 22 noeuds

figure a - 2 : Maillage du second étage



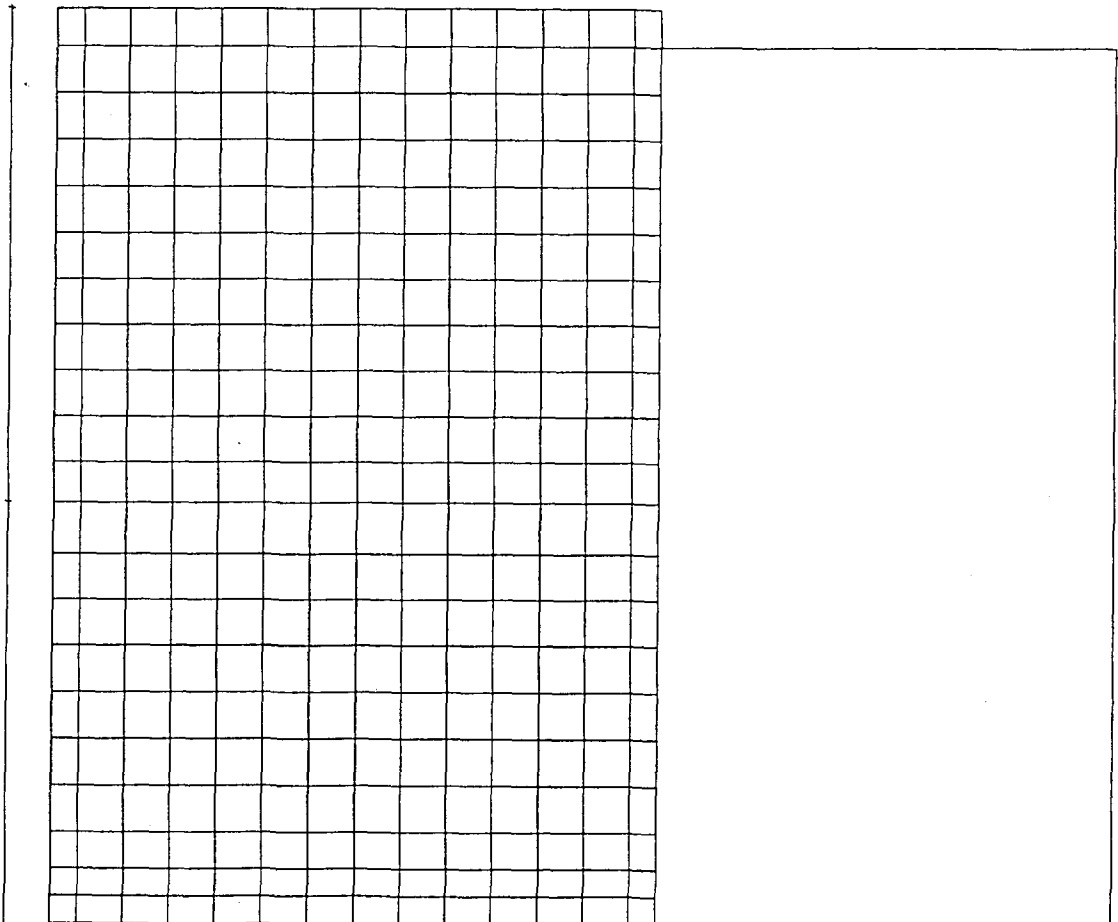
deuxieme etage : 81 elements et 82 noeuds

figure a - 3 : Maillage du troisième étage



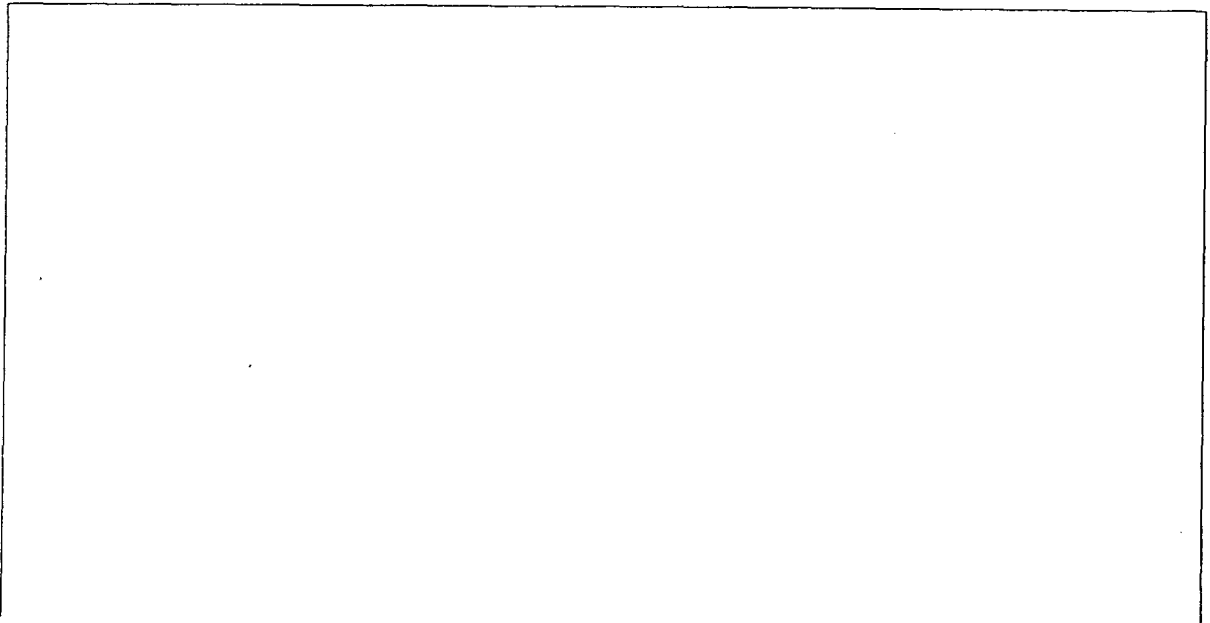
Troisième étage : 817 elements et 450 noeuds

figure a - 4 : Maillage des quatrième et cinquième étages



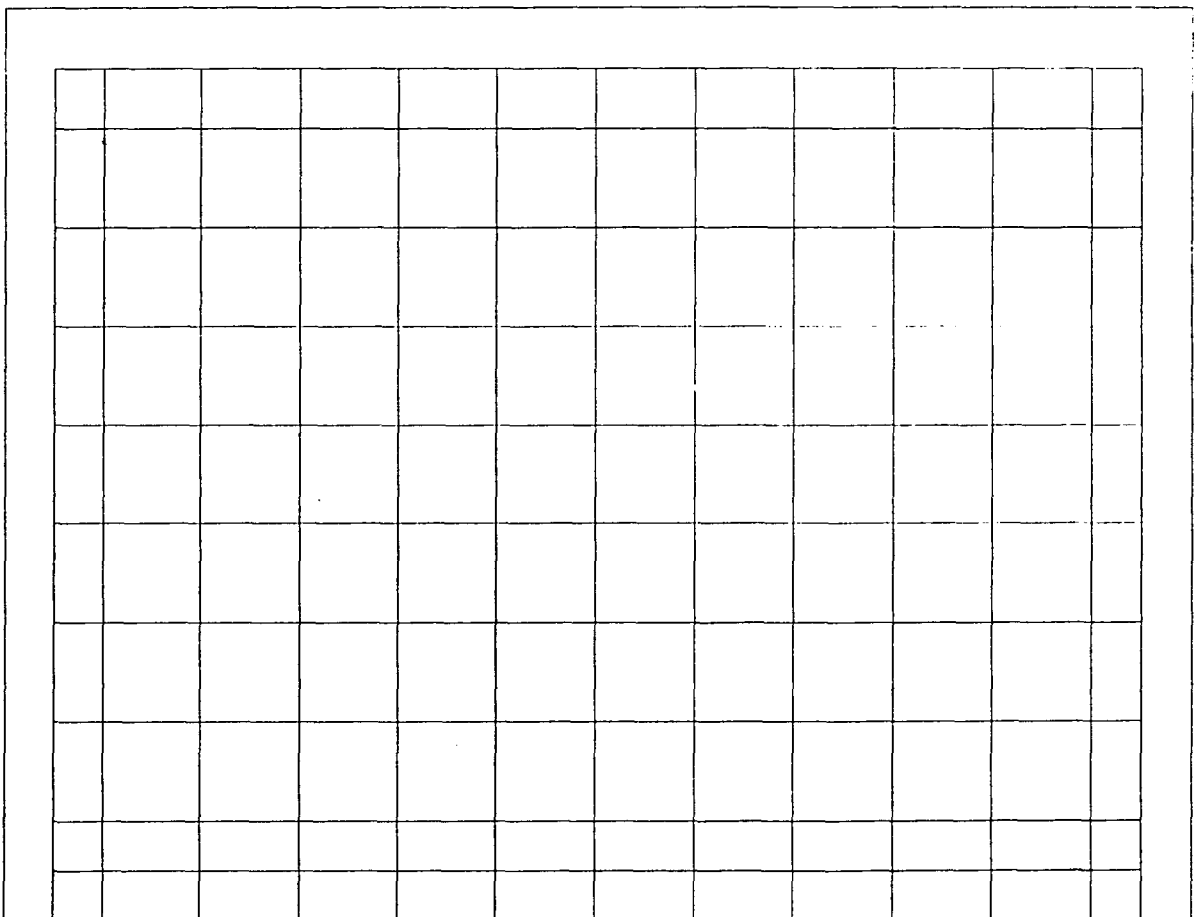
quatrième et cinquième étages: 710 elem 381 noeuds

figure a - 5 : Maillage du sixième étage



sixieme etage : 21 elements et 22 noeuds

figure a - 6 : Maillage du septième étage



septieme etage 374 elements 180 noeuds

ANNEXE B

ANALYSE MODALE ET PREMIERS MODES DE CHAQUE ETAGE

ANNEXE B - 1

ANALYSE MODALE DE CHAQUE ETAGE

	n° du mode	fréquence en Hz	déplacement généralisé q_n en tonnes	masse totale de l'étage en tonnes	masse modale M_{Gn} en tonnes	pourcentage de masse utilisée au cours du mode
premier étage	1	17.698	1.821×10^{-7}	18.828	7.134	$\cong 0 \%$
	2	28.778	4.303×10^{-3}	18.828	5.276	$\cong 0 \%$
	3	31.732	13.064	18.828	13.239	68.5 %
deuxième étage	1	8.744	-6.054×10^{-6}	27.024	10.704	$\cong 0 \%$
	2	12.072	18.997	27.024	17.232	77.5 %
troisième étage	1	56.332	27.024	43.005	21.206	80 %
quatrième et cinquième étages	1	26.906	22.494	48.970	16.441	62.8 %
	2	47.257	-1.161	48.970	2.131	1.3 %
sixième étage	1	7.061	1.825×10^{-8}	20.136	13.940	$\cong 0 \%$
	2	12.019	16.436	20.136	15.937	84.2 %
septième étage	1	43.527	23.166	36.96	20.151	61.2 %

tableau b - I - I : Analyse modale de chaque étage

ANNEXE B - 2

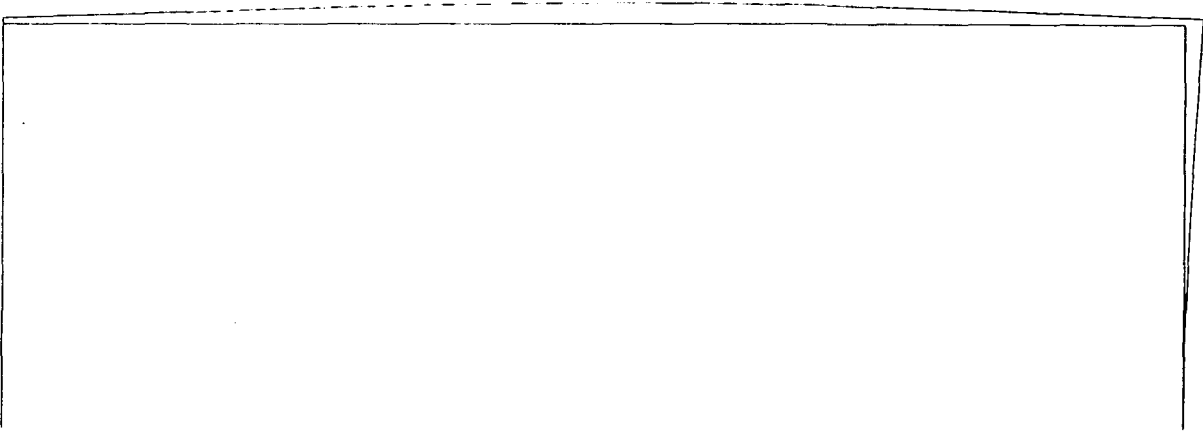
**PREMIERS MODES DE CHAQUE ETAGE POUR LA BANDE
DE FREQUENCE 0 - 60 HZ**

AMPLITUDE

0.00E+00

5.00E+04

figure b - 2 - 1 : Premier mode du premier étage



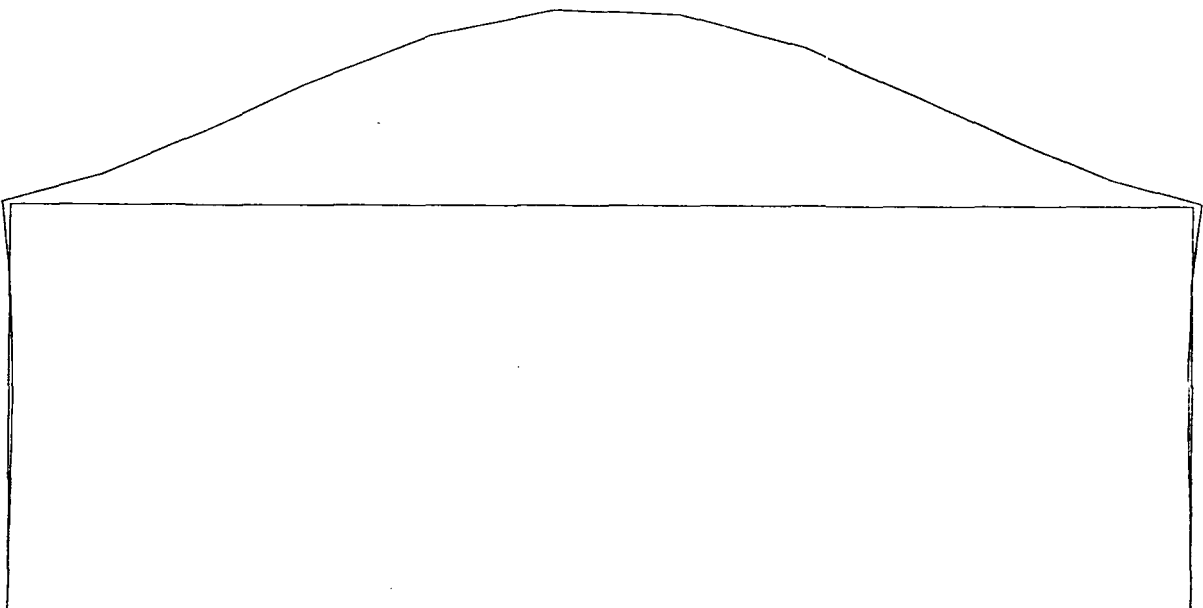
MODE NUMERO 1 FREQUENCE 17.698 HZ

AMPLITUDE

0.00E+00

1.0

figure b - 2 - 2 : Second mode du premier étage



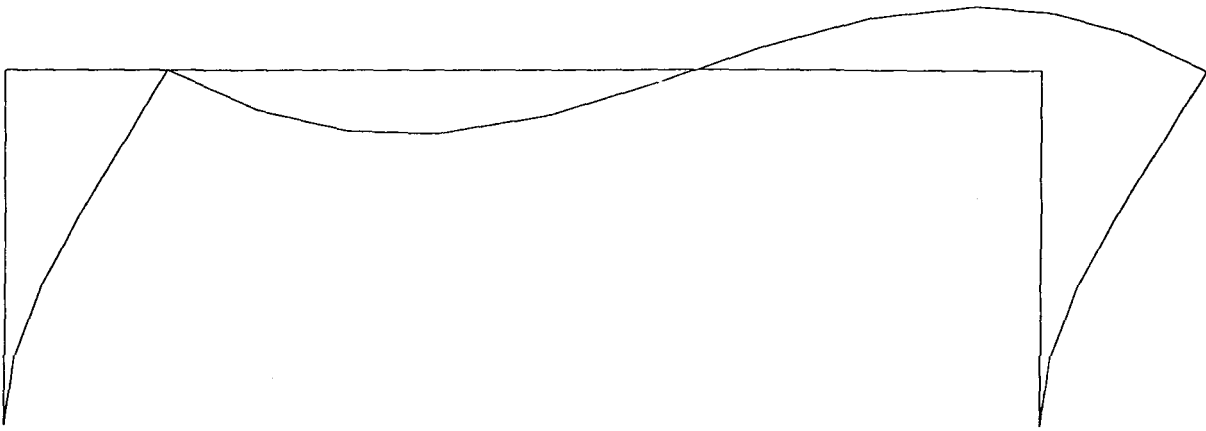
MODE NUMERO 2 FREQUENCE 28.778 HZ

AMPLITUDE

0.00E+00

1.0

figure b - 2 - 3 : Troisième mode du premier étage



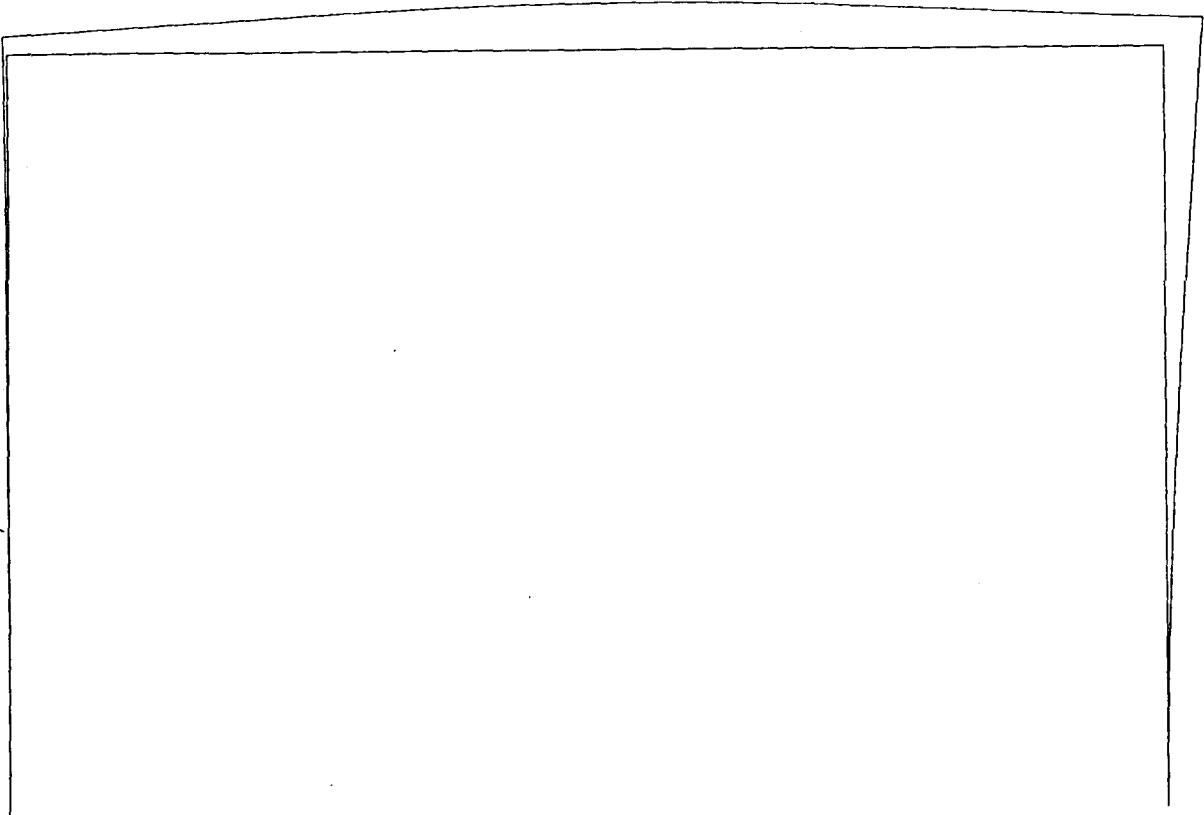
MODE NUMERO 3 FREQUENCE 31.732 HZ

figure b - 2 - 4 : Premier mode du second étage

AMPLITUDE

0.00E+00

5.00E+04



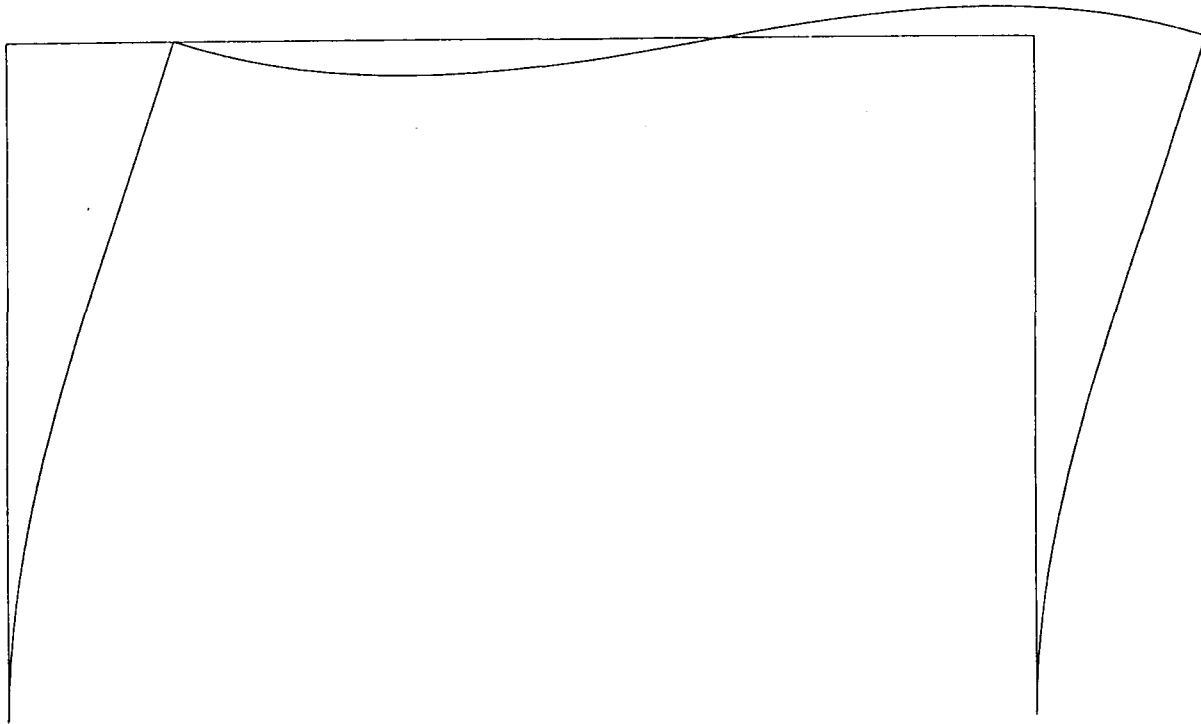
MODE NUMERO 1 FREQUENCE 8.744 HZ

AMPLITUDE

0.00E+00

1.0

figure b - 2 - 5 : Second mode du second étage



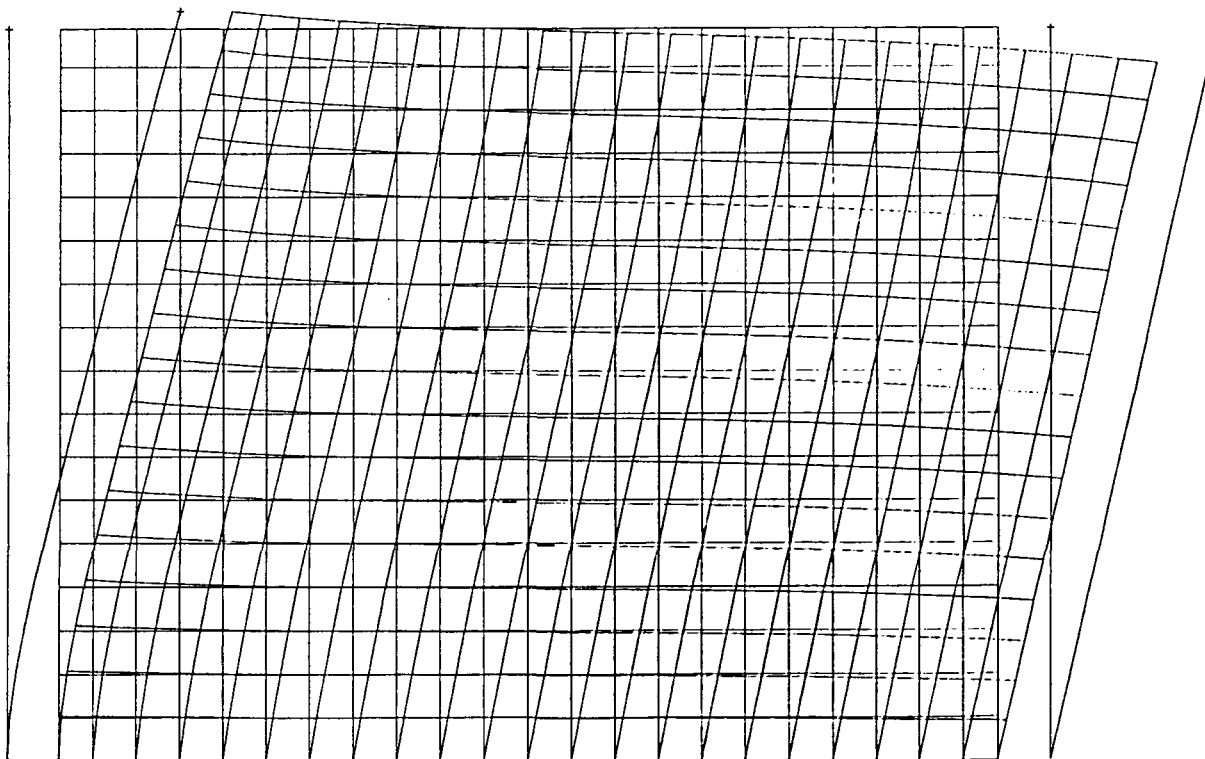
MODE NUMERO 2 FREQUENCE 12.072 HZ

AMPLITUDE

0.00E+00

1.0

figure b - 2 - 6 : Premier mode du troisième étage



MODE NUMERO 1 FREQUENCE 56.332 HZ

figure b - 2 - 7 : Premier mode des quatrième et cinquième étages

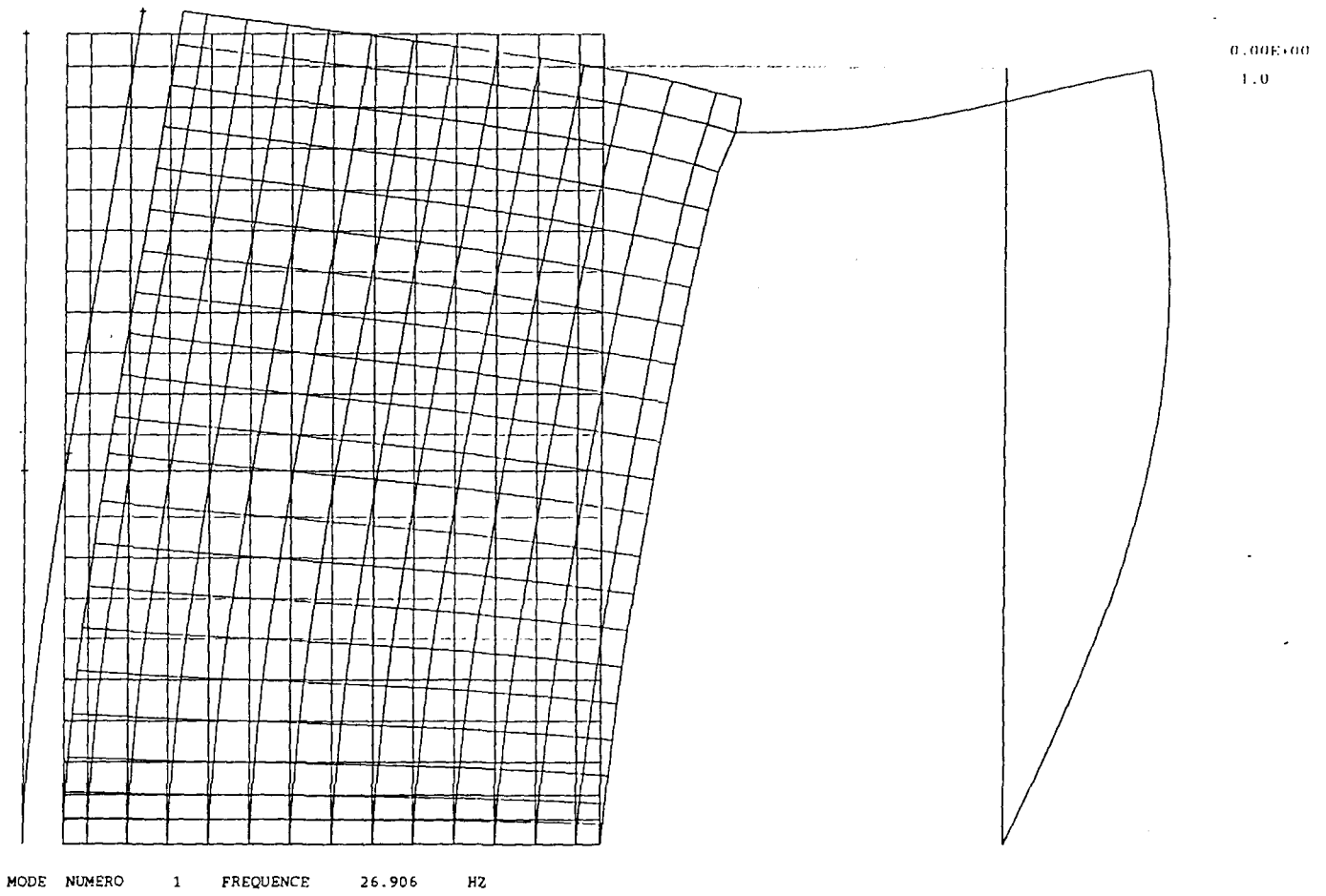
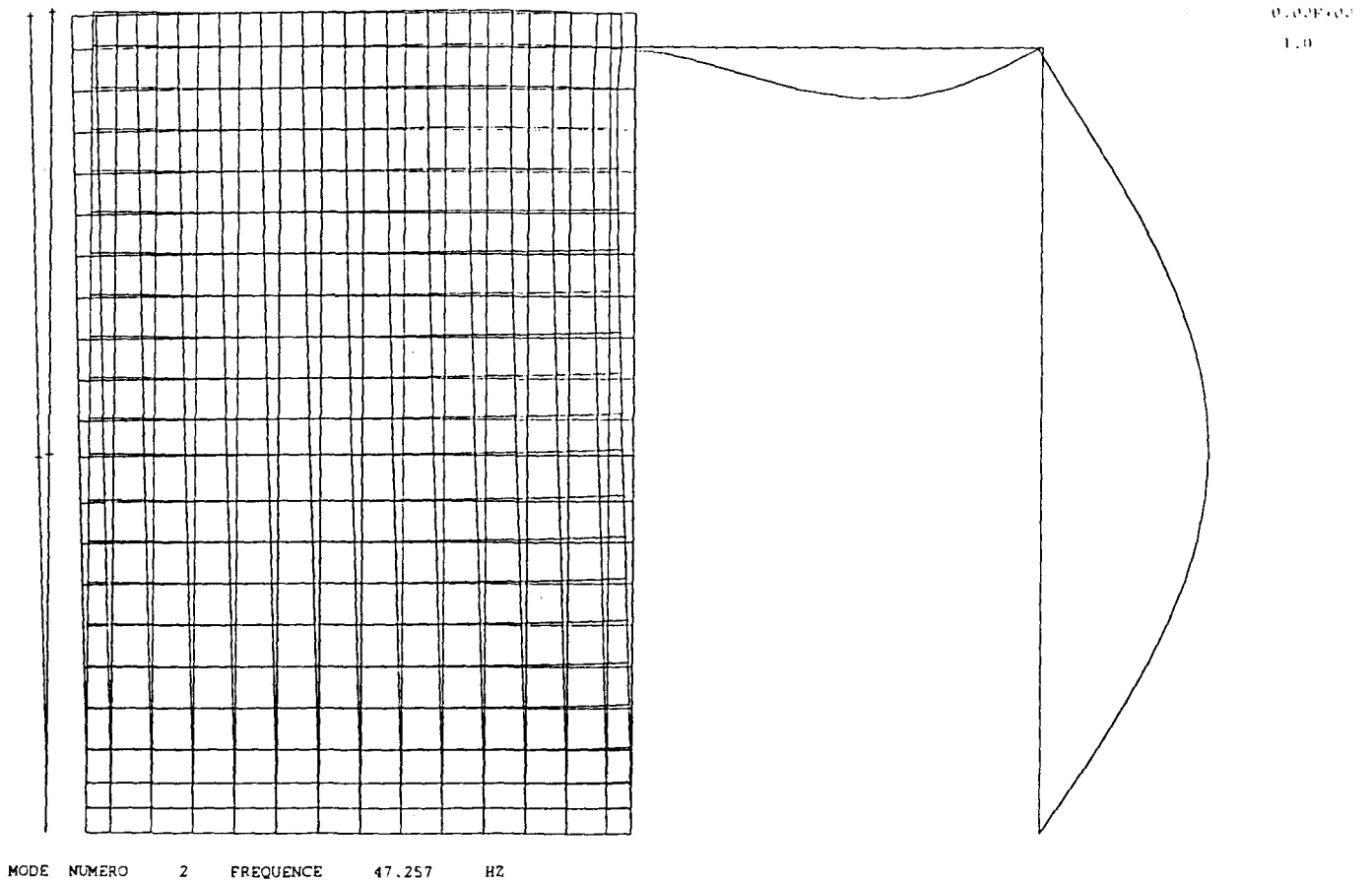


figure b - 2 - 8 : Second mode des quatrième et cinquième étages

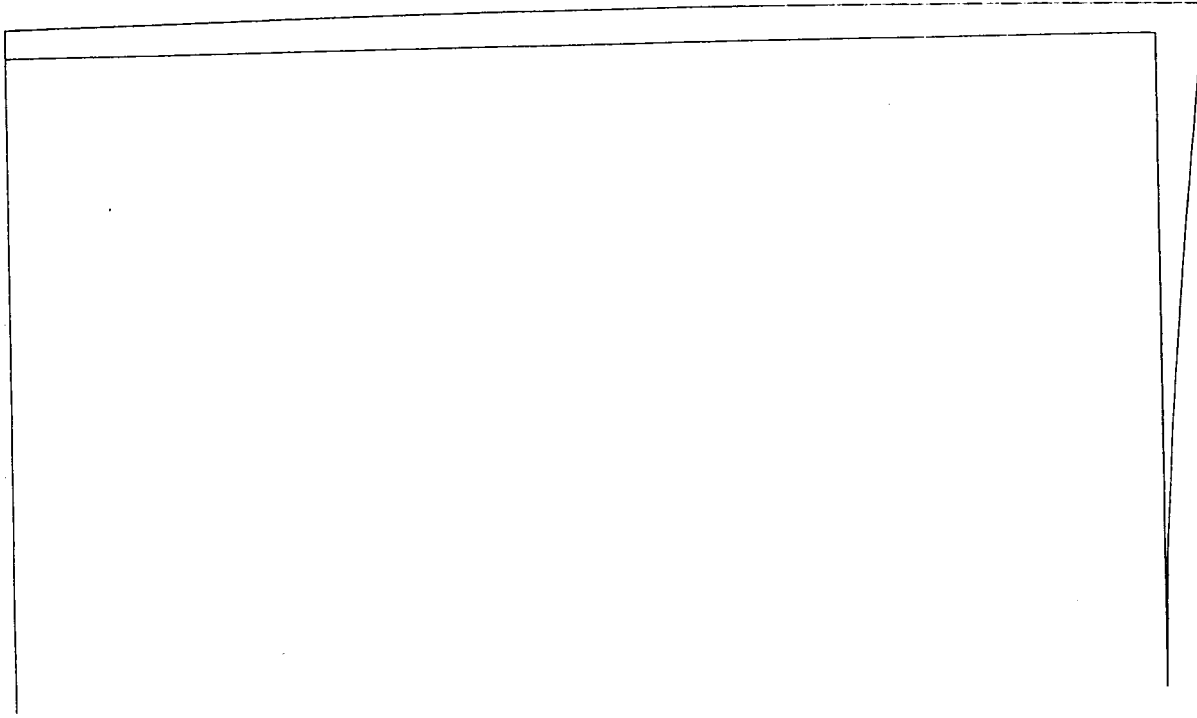


AMPLITUDE

0.00E+00

5.00E+04

figure b - 2 - 9 : Premier mode du sixième étage



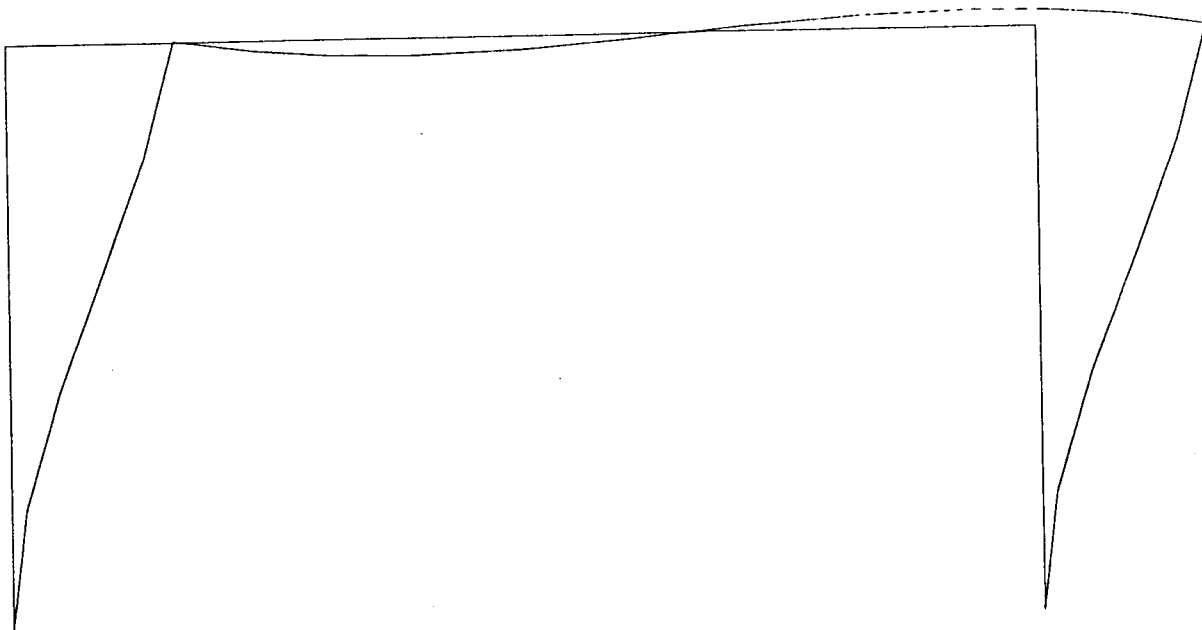
MODE NUMERO 1 FREQUENCE 7.061 HZ

AMPLITUDE

0.00E+00

1.0

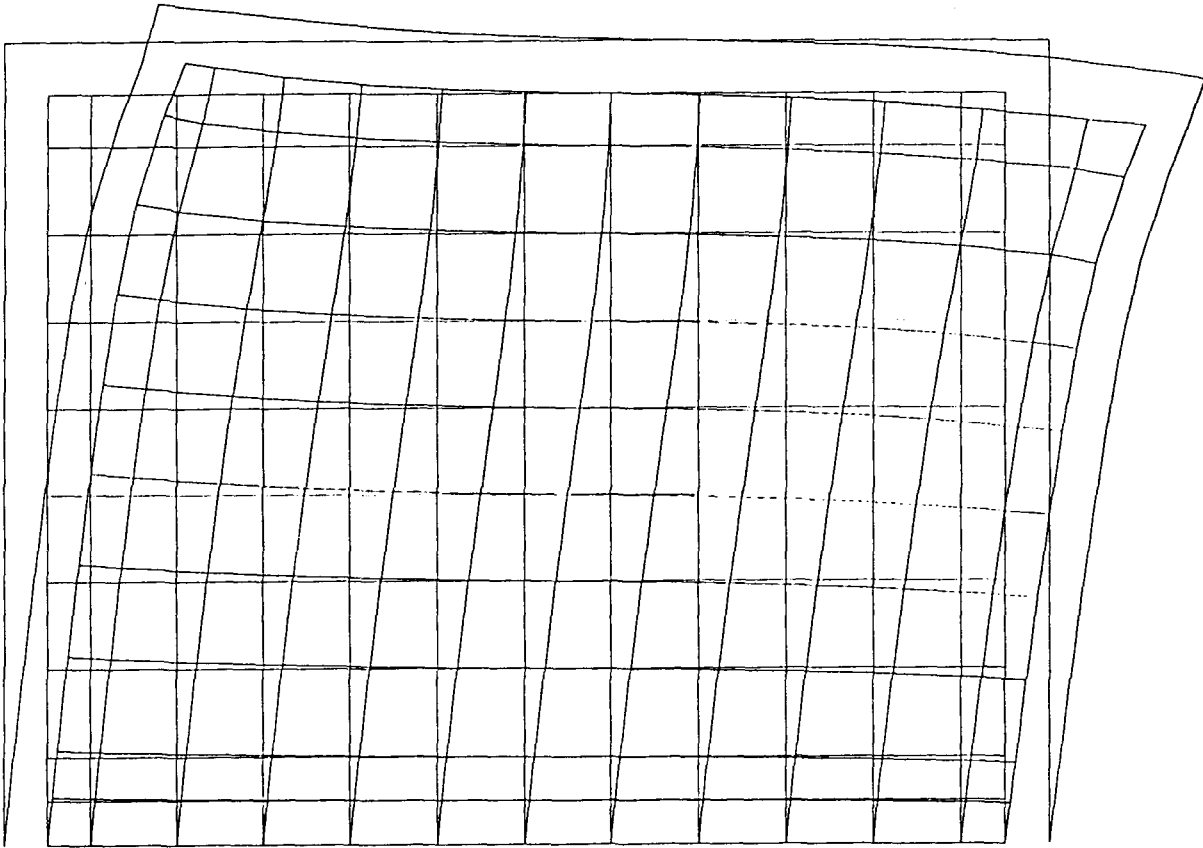
figure b - 2 - 10 : Second mode du sixième étage



MODE NUMERO 2 FREQUENCE 12.265 HZ

AMPLITUDE

0.00E+00
1.0



MODE NUMERO 1 FREQUENCE 43.527 HZ

figure b - 2 - 11 : Premier mode du septième étage

ANNEXE C

RESULTATS

ANNEXE C - 1

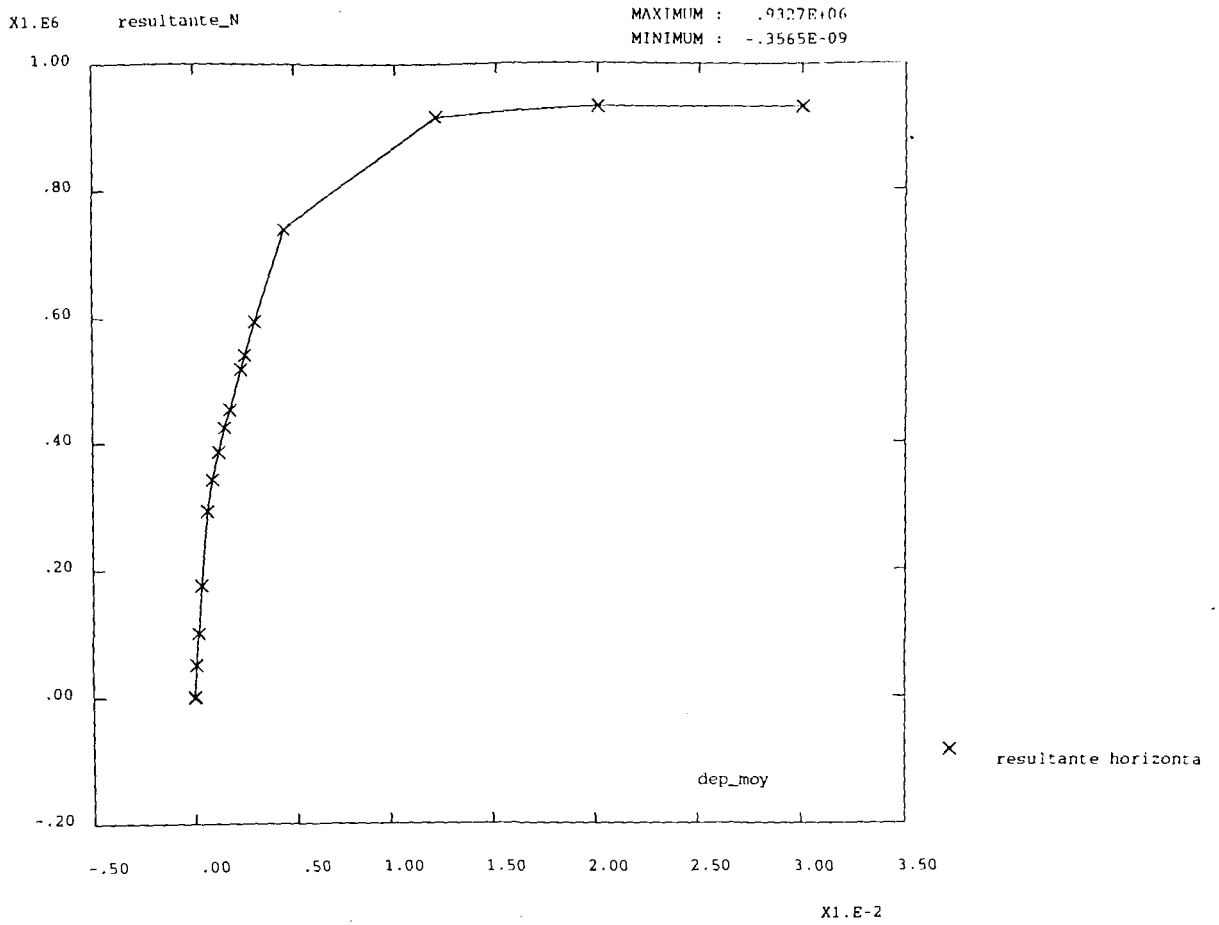
SOUS CHARGEMENT STATIQUE MONOTONE

tableau c - 1 - 1

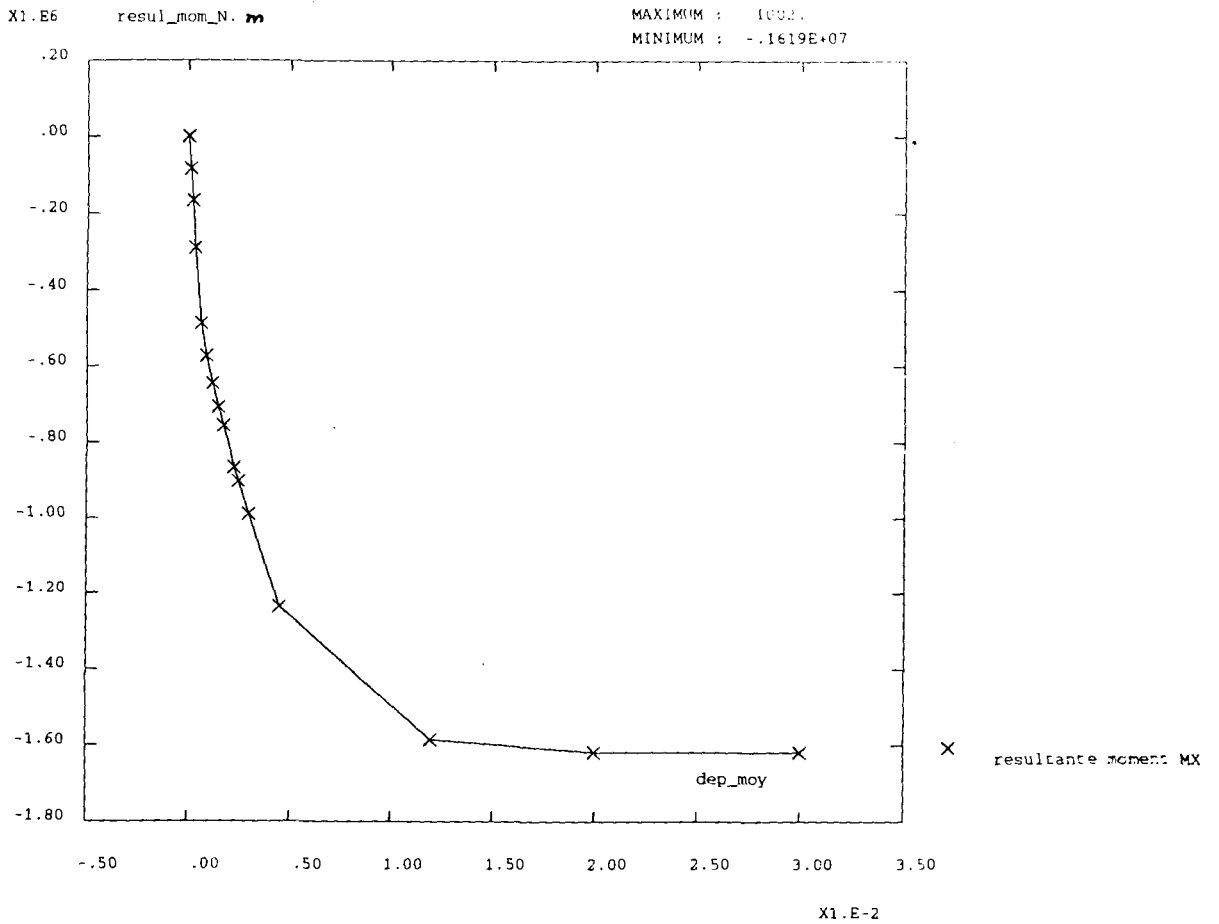
résultats de l'étude sous chargement monotone statique du second étage

		comportement global de la sous-structure			comportement local de la sous-structure
		limite élastique	limite d'endommagement	limite de ruine	point de rupture
chargement monotone positif	moment à l'encastrement en MN.m	0.3	0.78	1.06	1.24
	déplacement moyen en mm	1.1	5.	10.	13.9
	élément entraînant la ruine				tronçon de poutre P63 au point p3
chargement monotone négatif	moment à l'encastrement en MN.m	-0.29	-0.78	-1.06	-1.06
	déplacement moyen en mm	-1.03	-4.	-10.	-10.
	élément entraînant la rupture				tronçon de poutre P25 au point p2

figure c-1-1 : résultantes du 1er étage issues du modèle GAUVAIN pour un chargement positif



resultante horizontale FY



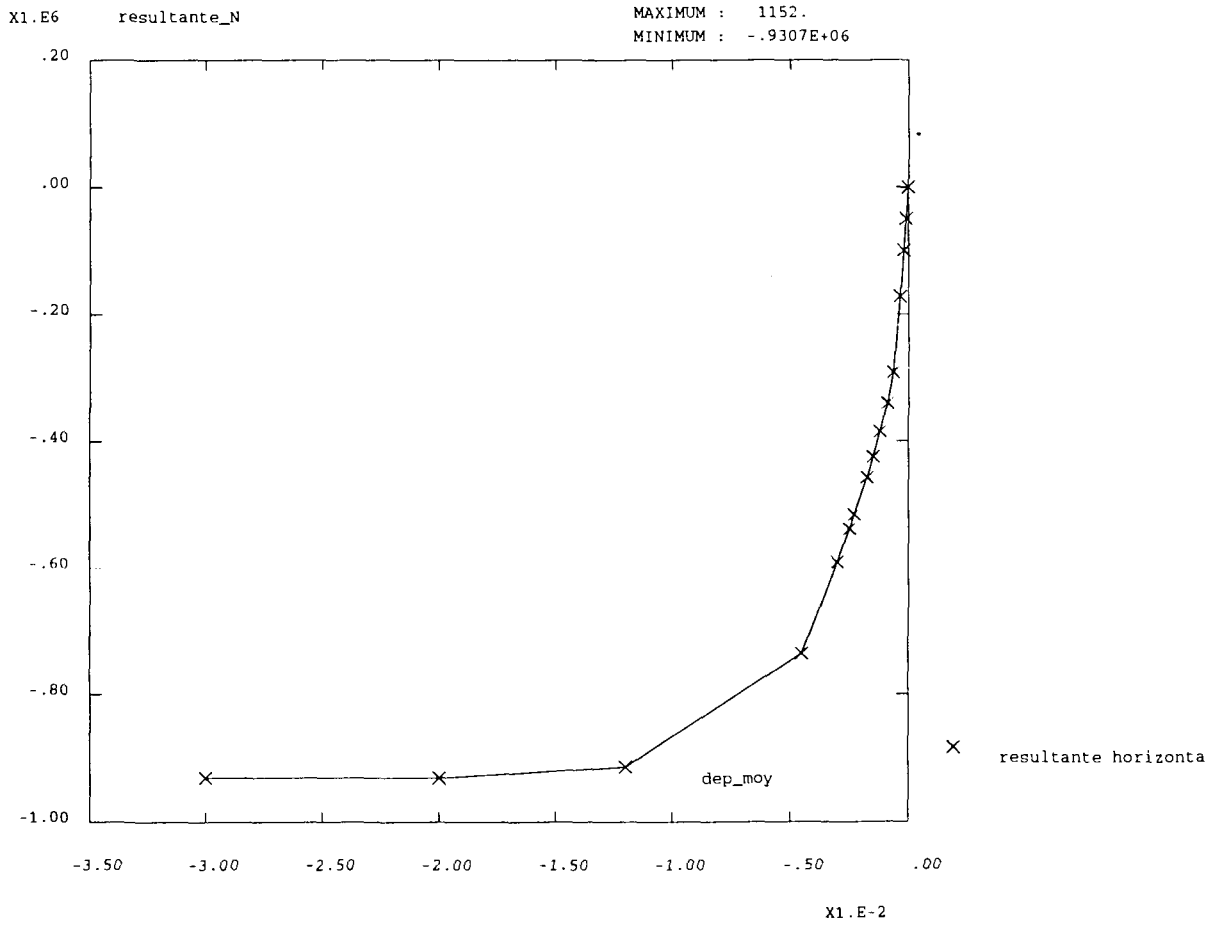
resultante moment MX

tableau c - 1 - 2

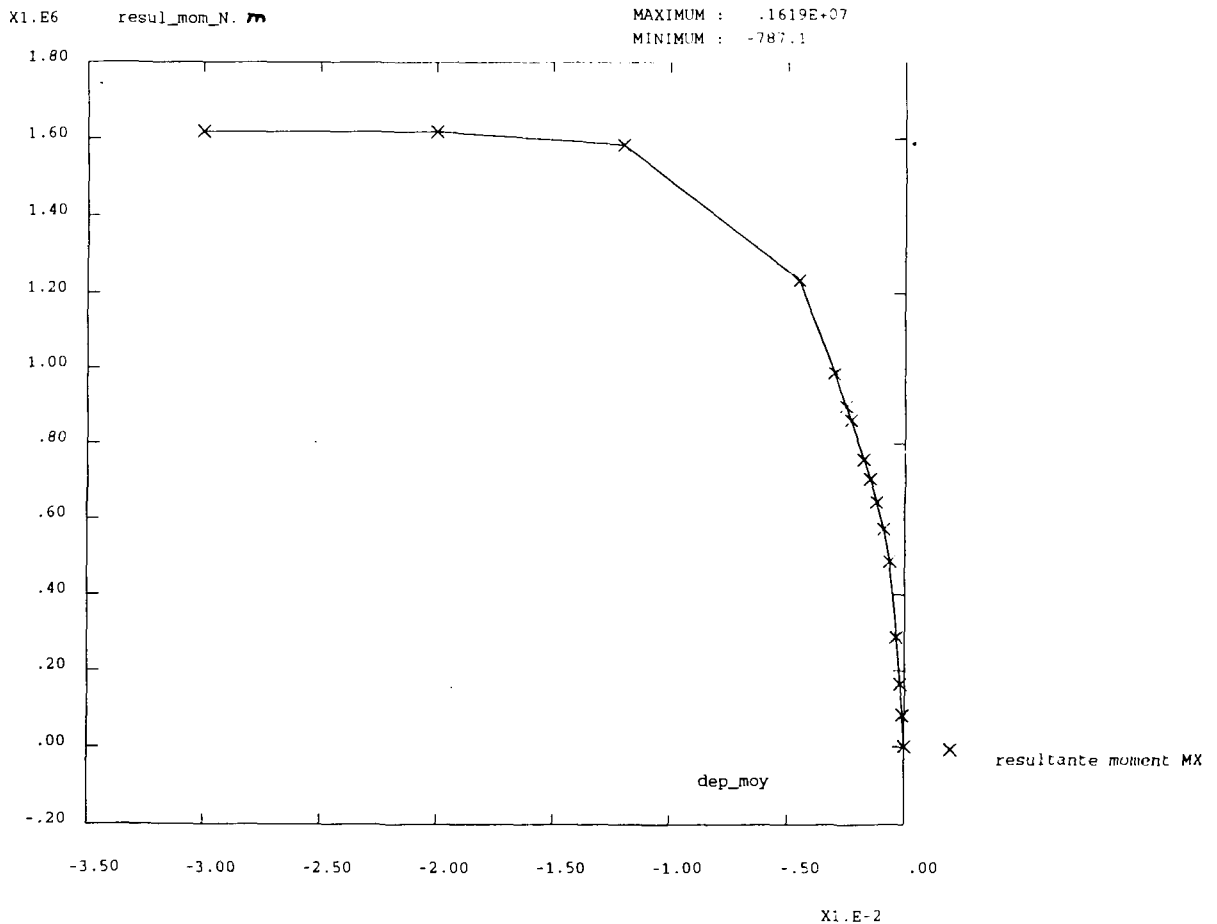
résultats de l'étude sous chargement monotone statique du sixième étage

		comportement global de la sous-structure			comportement local de la sous-structure
		limite élastique	limite d'endommagement	limite de rupture	point de rupture
chargement monotone positif	moment à l'encastrement en MN.m	0.162	0.2	0.206	0.083
	déplacement moyen en mm	1.	1.33	1.42	1.425
	élément entraînant la rupture				tronçon de poutre P56 en p6
chargement monotone négatif	moment à l'encastrement en MN.m	-0.162	-0.2	-0.205	0.2661
	déplacement moyen en mm	-1.	-1.33	-1.42	-1.4
	élément entraînant la rupture				

chargement négatif



resultante horizontale FY



resultante moment MX

figure c - 1 - 3 :

résultantes du 2ème étage issues du modèle GAUVAIN pour un chargement positif

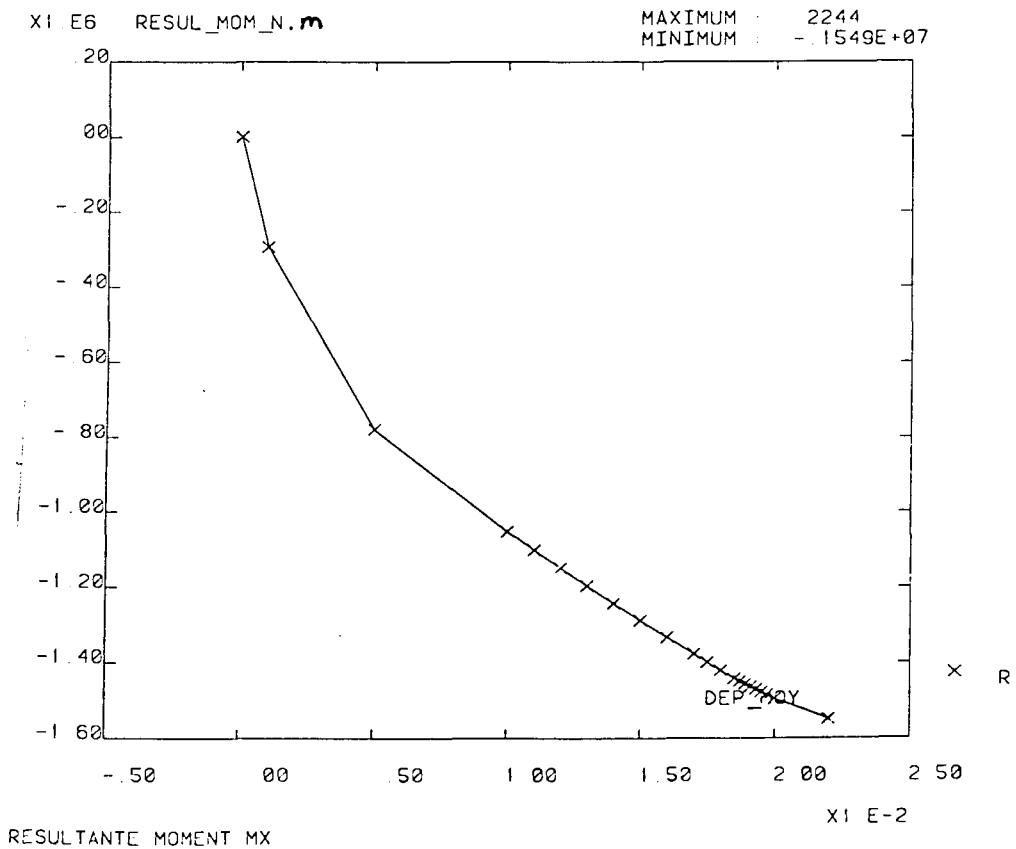
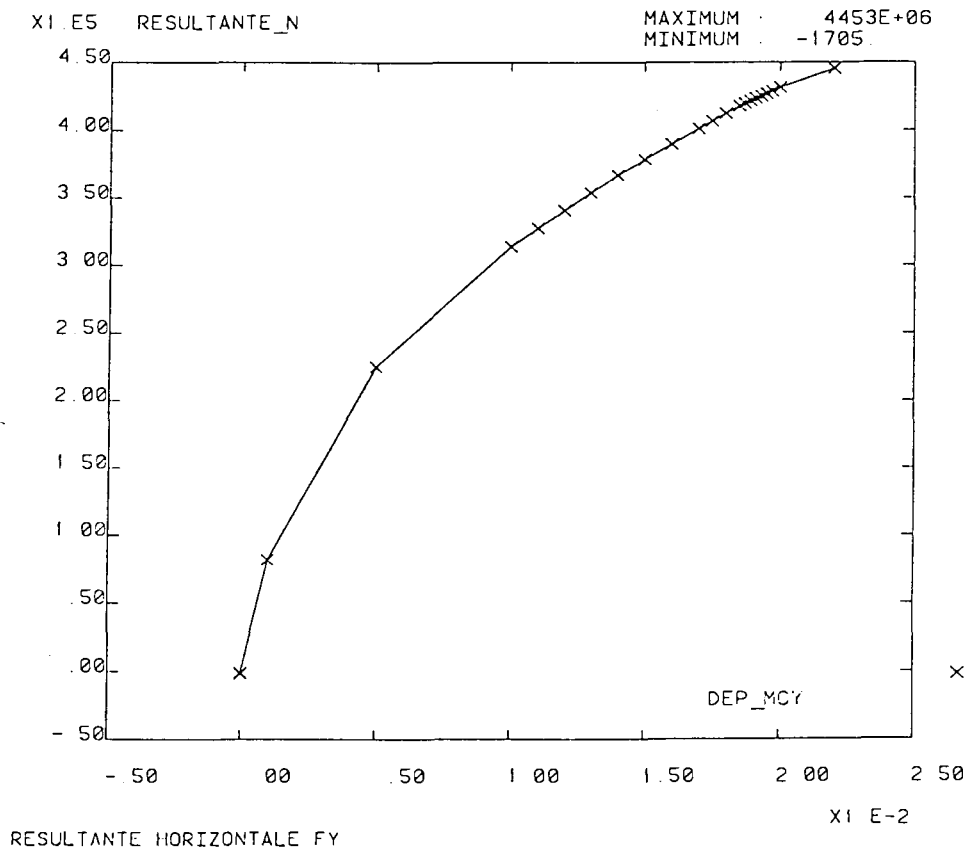


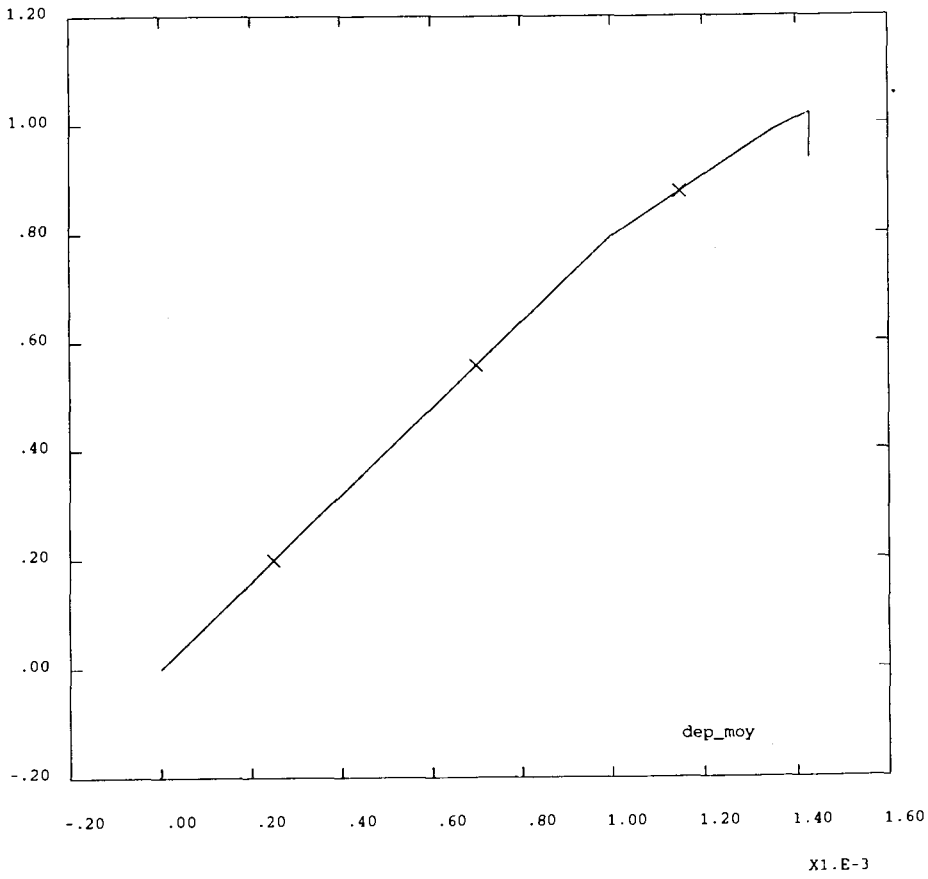
figure c - 1 - 5 :

résultantes du 6ème étage issues du modèle GAUVAIN pour un

chargement positif

X1.E5 resultante_N

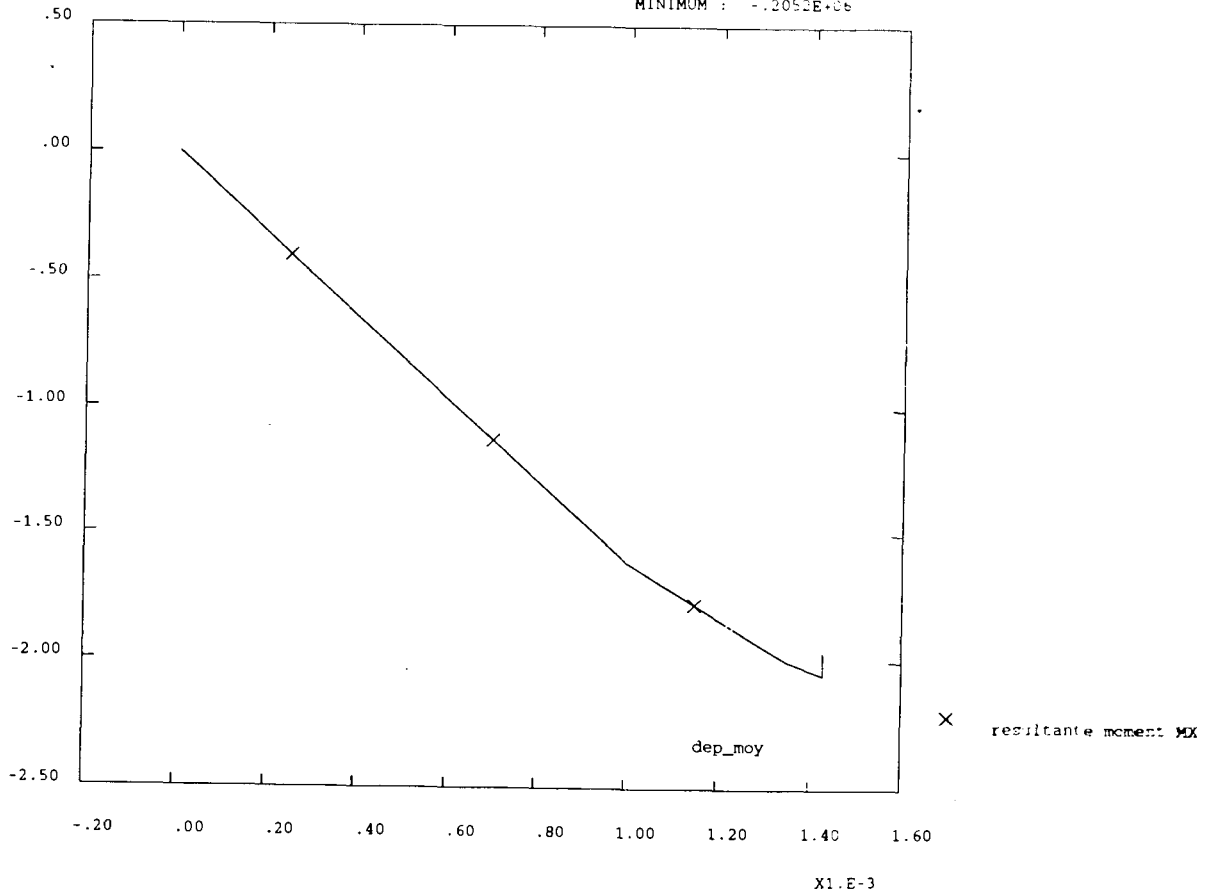
MAXIMUM : .1019E+06
MINIMUM : -.3129E-09



resultante horizontale FY

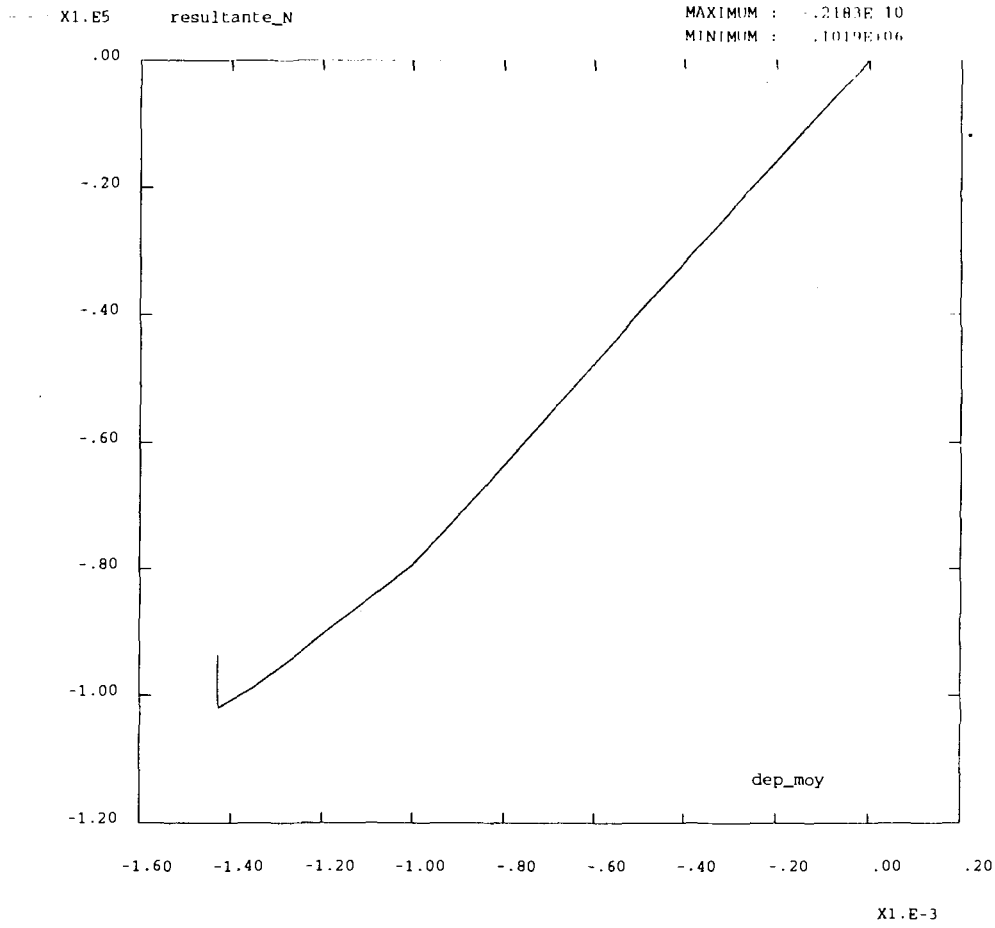
X1.E5 resul_mom_N. m

MAXIMUM : .14620E+09
MINIMUM : -.2052E+06

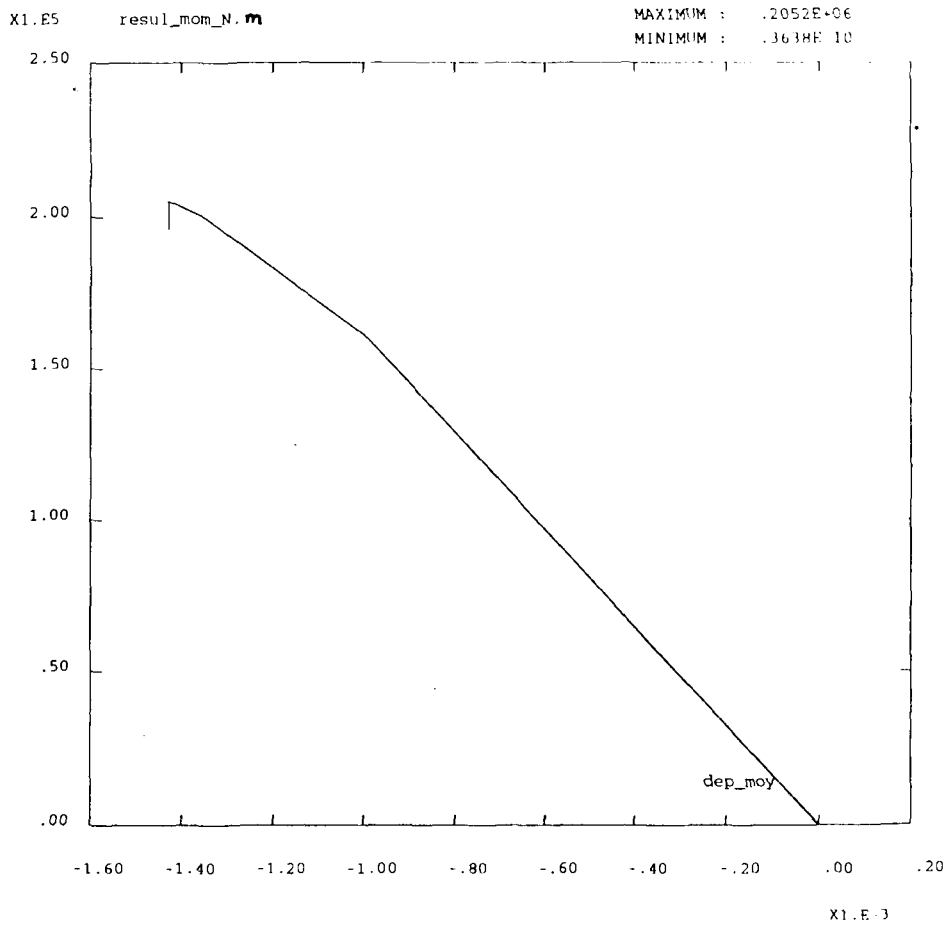


resultante moment MX

chargement négatif



resultante horizontale FY



resultante moment MX

ANNEXE C - 2
POUR LES ELEMENTS GLOBAUX

tableau c - 2 - 1

comparaison entre le modèle GAUVAIN et le modèle GLOBAL pour un chargement monotone statique positif

		Modèle GAUVAIN	Modèle GLOBAL	Ecart en pourcentage
premier étage	fréquence en Hz du premier mode	17.698	17.220	2.7 %
	moment à la ruine en MN.m	1.224	1.172	4.2 %
	déplacement à la ruine en mm	4.4	4.5	2.2 %
second étage	fréquence en Hz du premier mode	8.744	8.339	4.6 %
	moment à la ruine en MN.m	1.24	1.243	0.2 %
	déplacement à la ruine en mm	13.9	14.	0.7 %
sixième étage	fréquence en Hz du premier mode	7.061	6.948	1.6 %
	moment à la ruine en MN.m	0.083	-0.121	31.4 %
	déplacement à la ruine en mm	1.425	1.	29.8 %

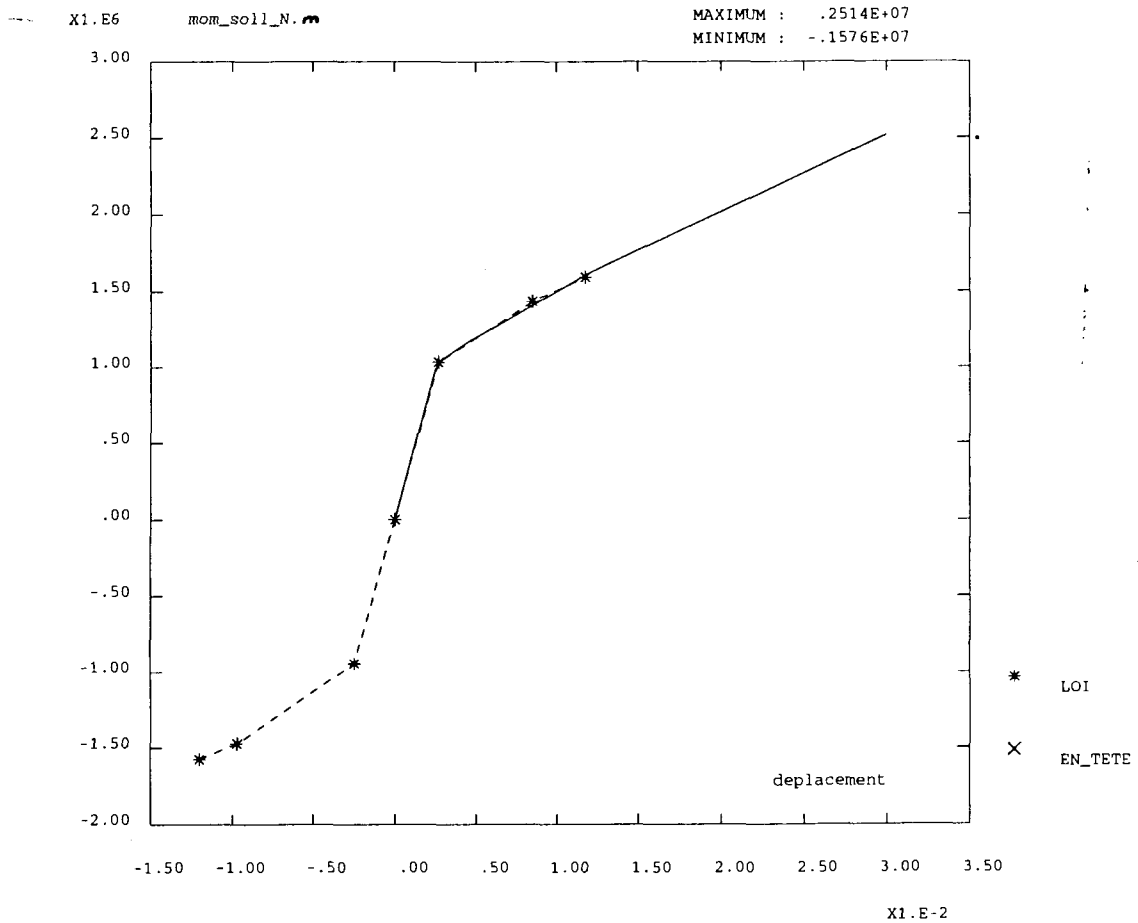
tableau c - 2 - 2

comparaison entre le modèle GAUVAIN et le modèle GLOBAL pour un chargement monotone statique négatif

		Modèle GAUVAIN	Modèle GLOBAL	Ecart en pourcentage
premier étage	fréquence en Hz du premier mode	17.698	17.220	2.7 %
	moment à la ruine en MN.m	-1.472	1.56	5.6 %
	déplacement à la ruine en mm	-9.7	10.8	10.2 %
second étage	fréquence en Hz du premier mode	8.744	8.339	4.6 %
	moment à la ruine en MN.m	-1.06	1.054	0.56 %
	déplacement à la ruine en mm	-10.	-10.	0 %
sixième étage	fréquence en Hz du premier mode	7.061	6.922	1.9 %
	moment à la ruine en MN.m	0.2661	0.121	38.7 %
	déplacement à la ruine en mm	-1.4	-1.	28.5 %.

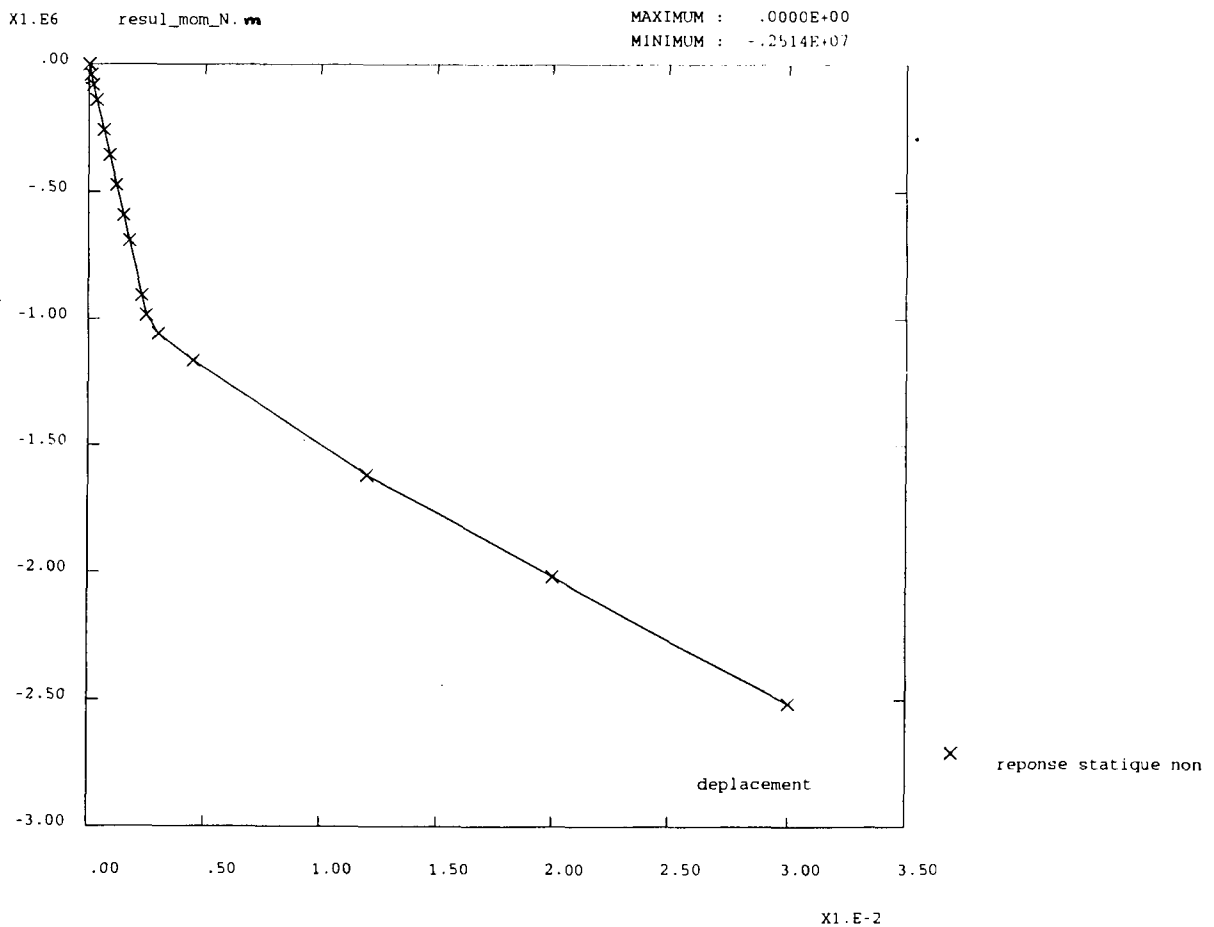
figure c - 1 - 7 : superposition de la loi idéalisee et de celle de l'élément global pour le

1er étage pour un chargement positif



reponse statique non-lineaire - flexion - elements globaux

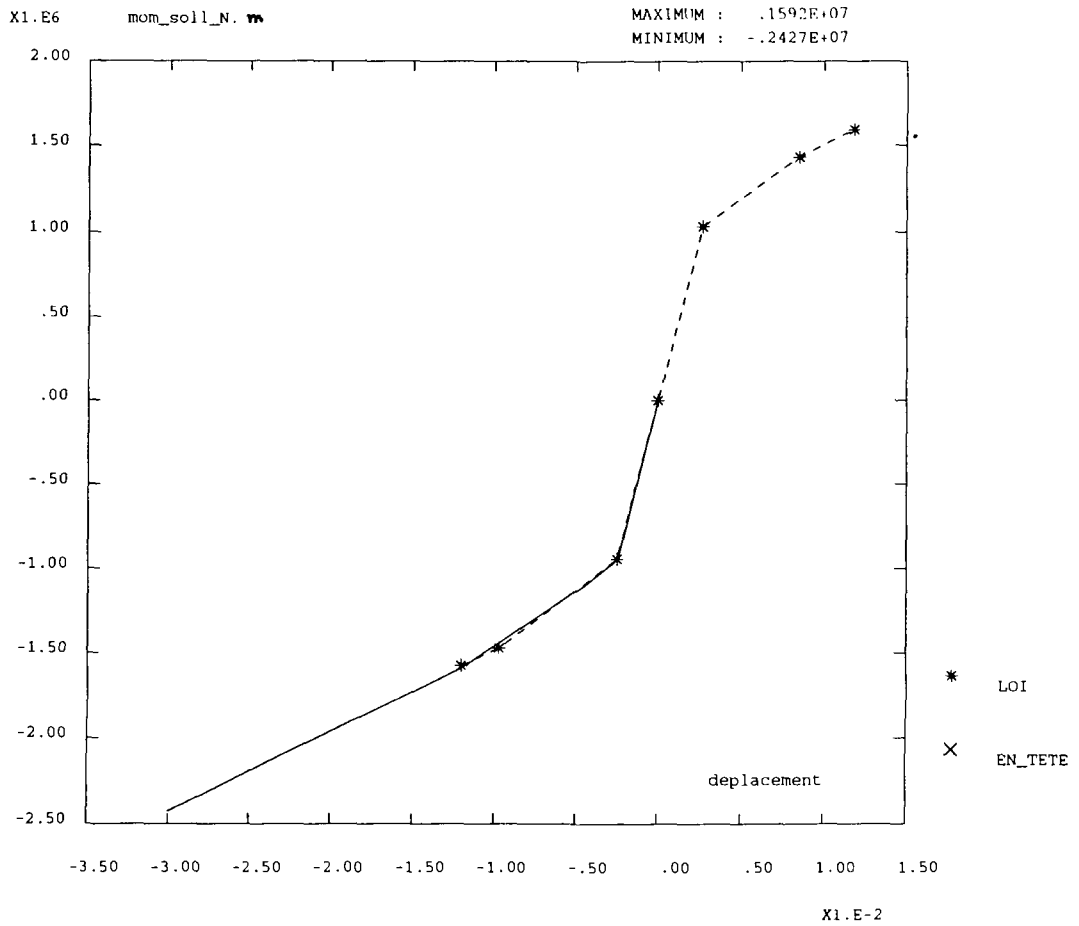
loi de comportement de l'élément global correspondante



reponse statique non-lineaire - flexion - elements globaux

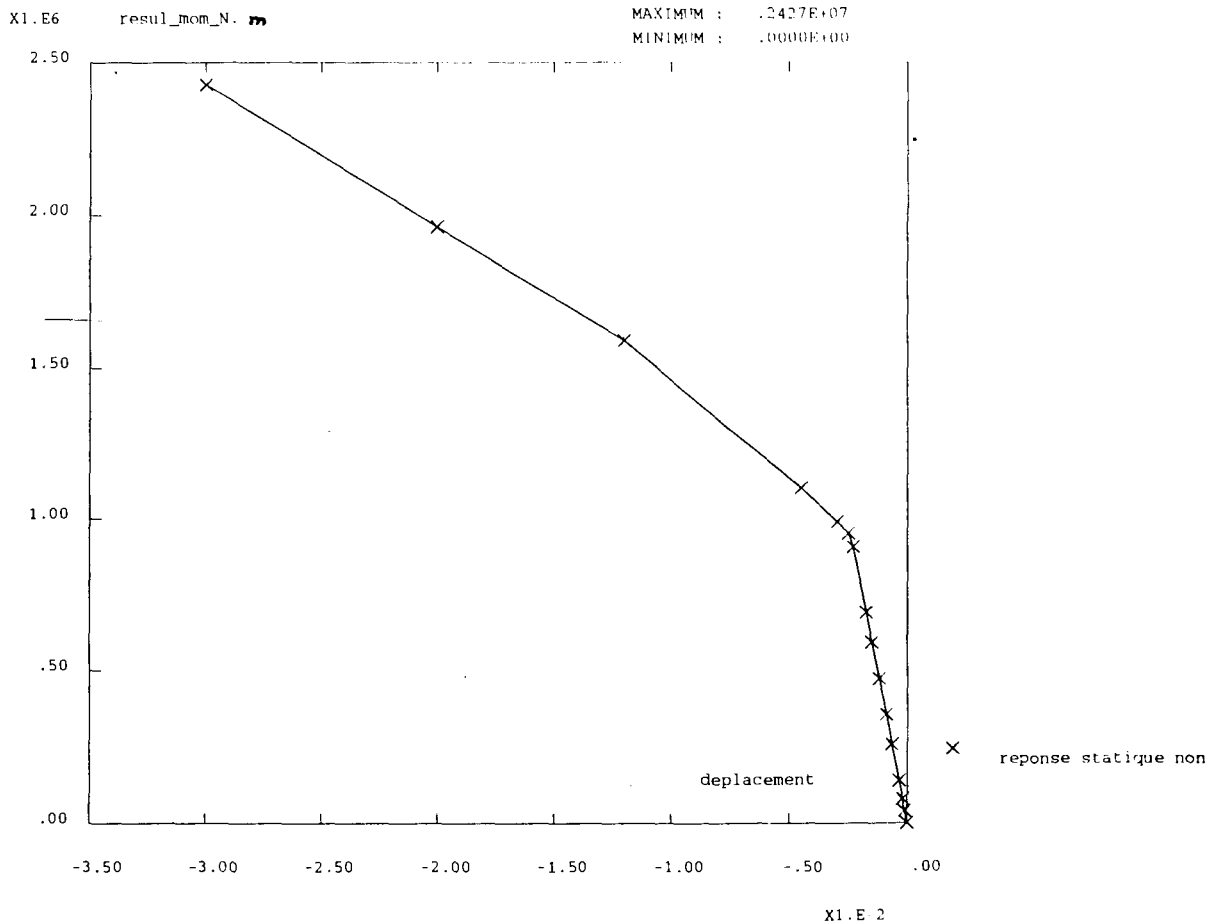
figure c - 1 - 8 : superposition de la loi idéalisee et de celle de l'élément global pour le

1er étage pour un chargement négatif



reponse statique non-lineaire - flexion - elements globaux

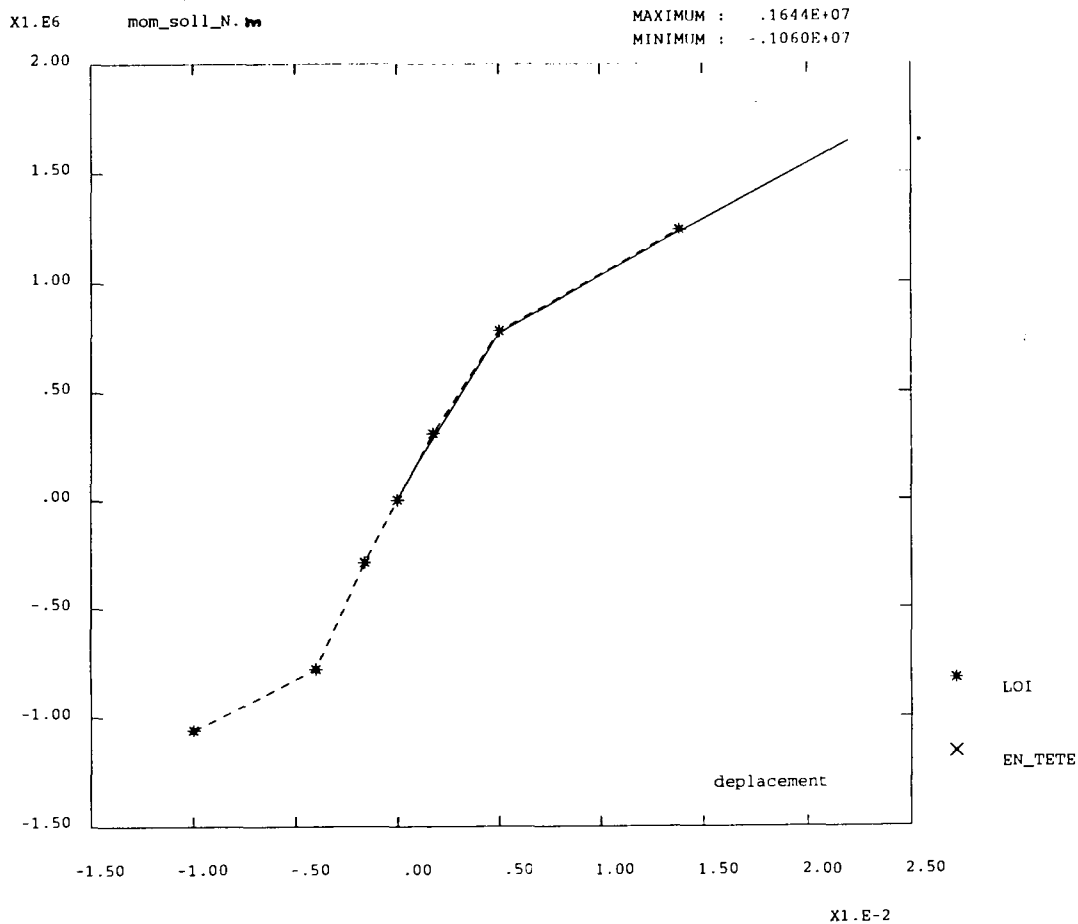
loi de comportement de l'élément global correspondante



reponse statique non-lineaire - flexion - elements globaux

figure c - 1 - 9 : superposition de la loi idéalisee et de celle de l'élément global pour le

2ème étage pour un chargement positif



loi de comportement de l'élément global correspondante

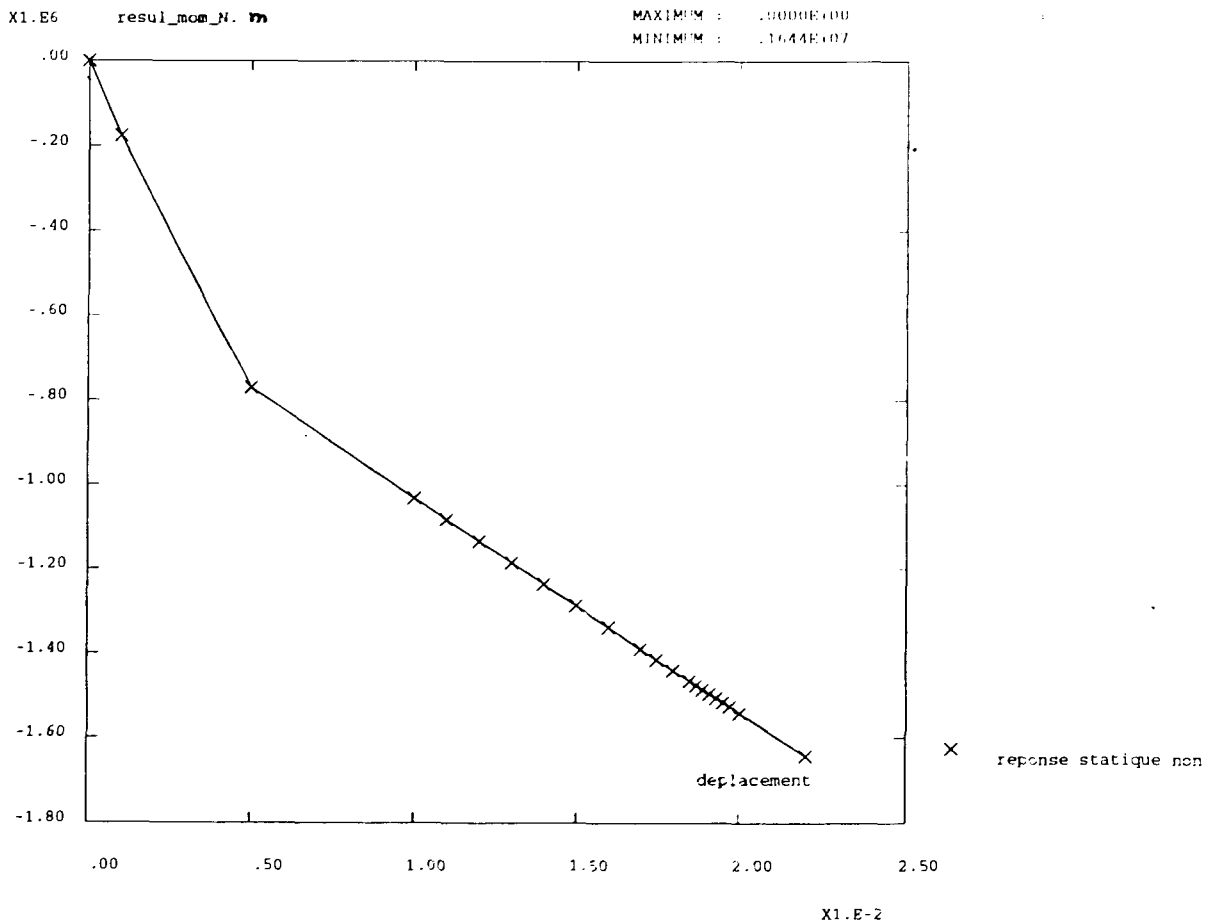
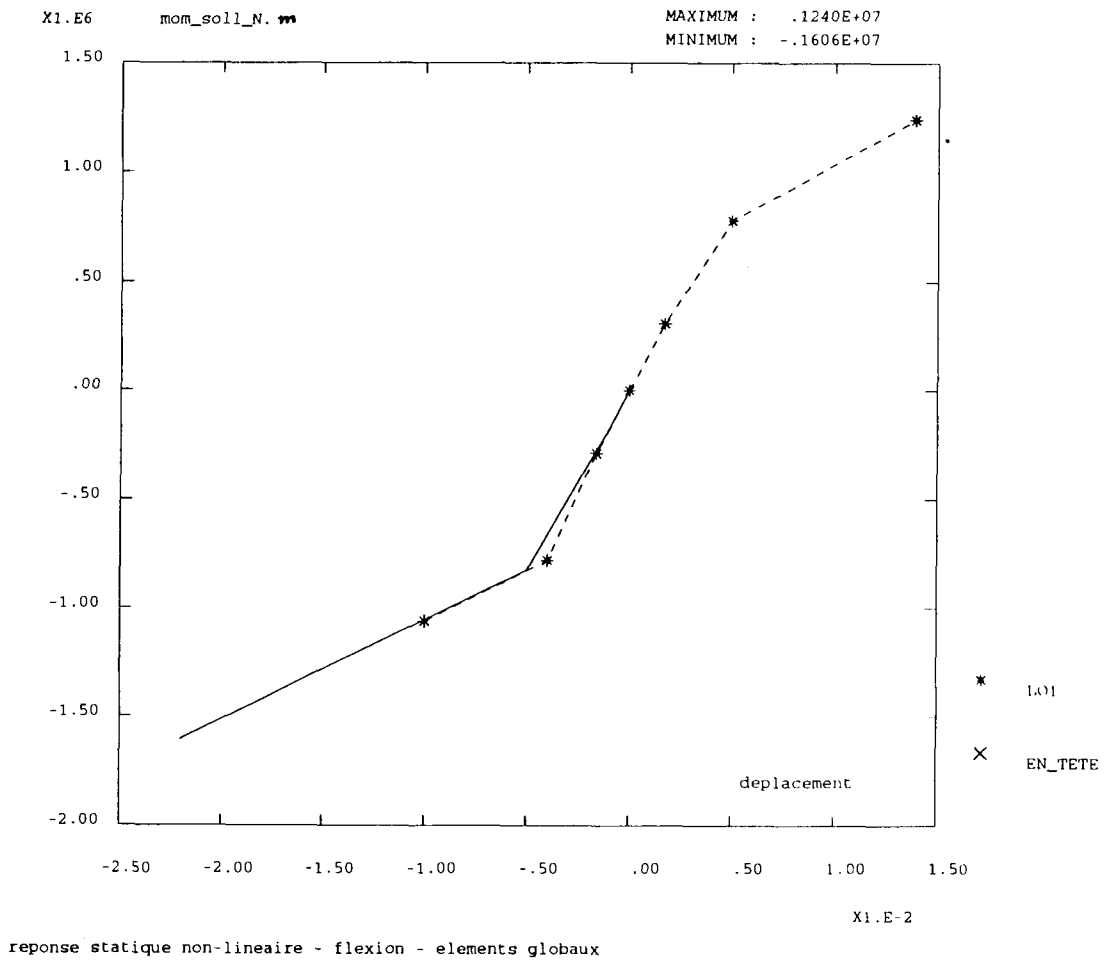


figure c - 1 - 10 : superposition de la loi idéalisée et de celle de l'élément global pour le 2ème étage pour un chargement négatif



loi de comportement de l'élément global correspondante

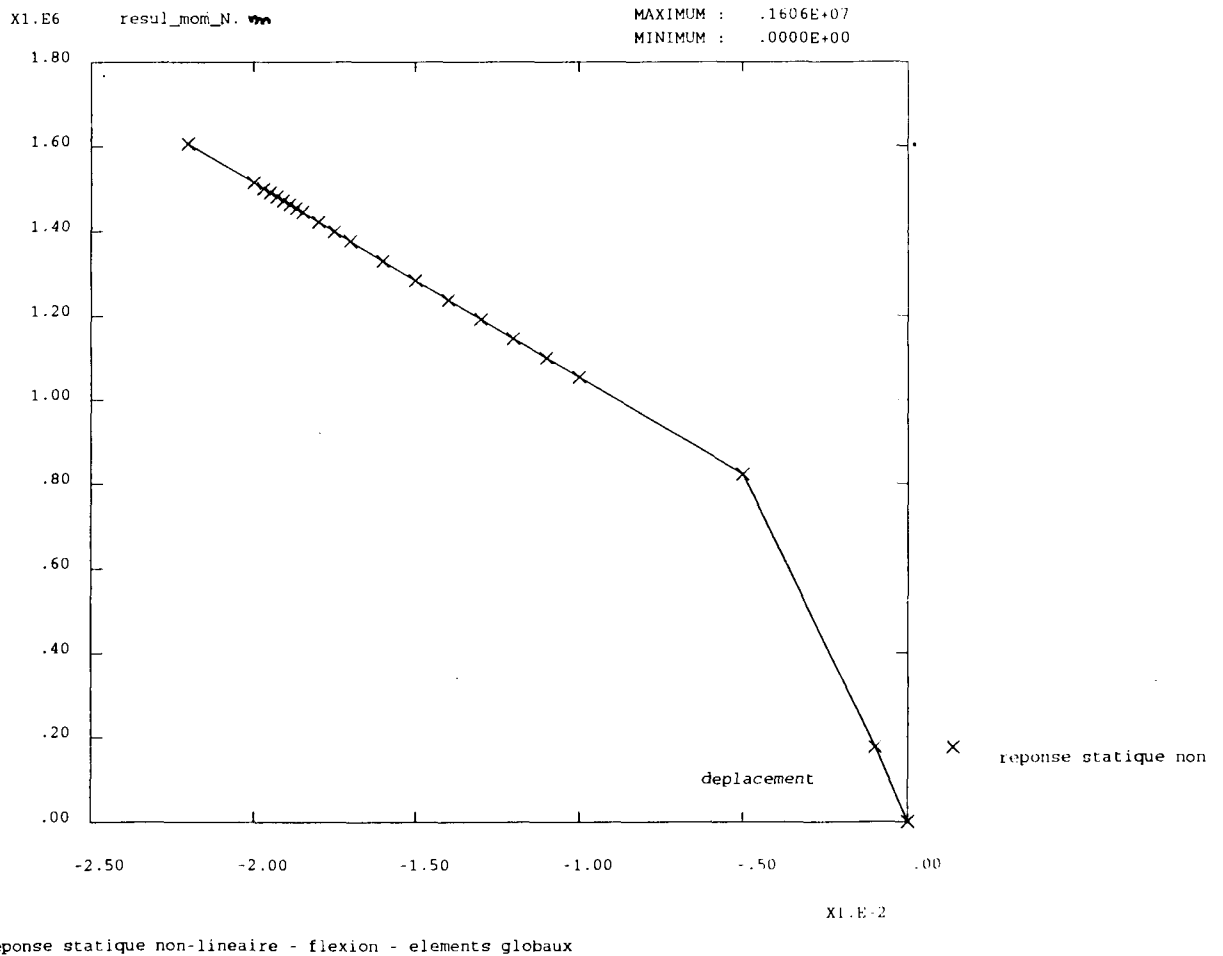
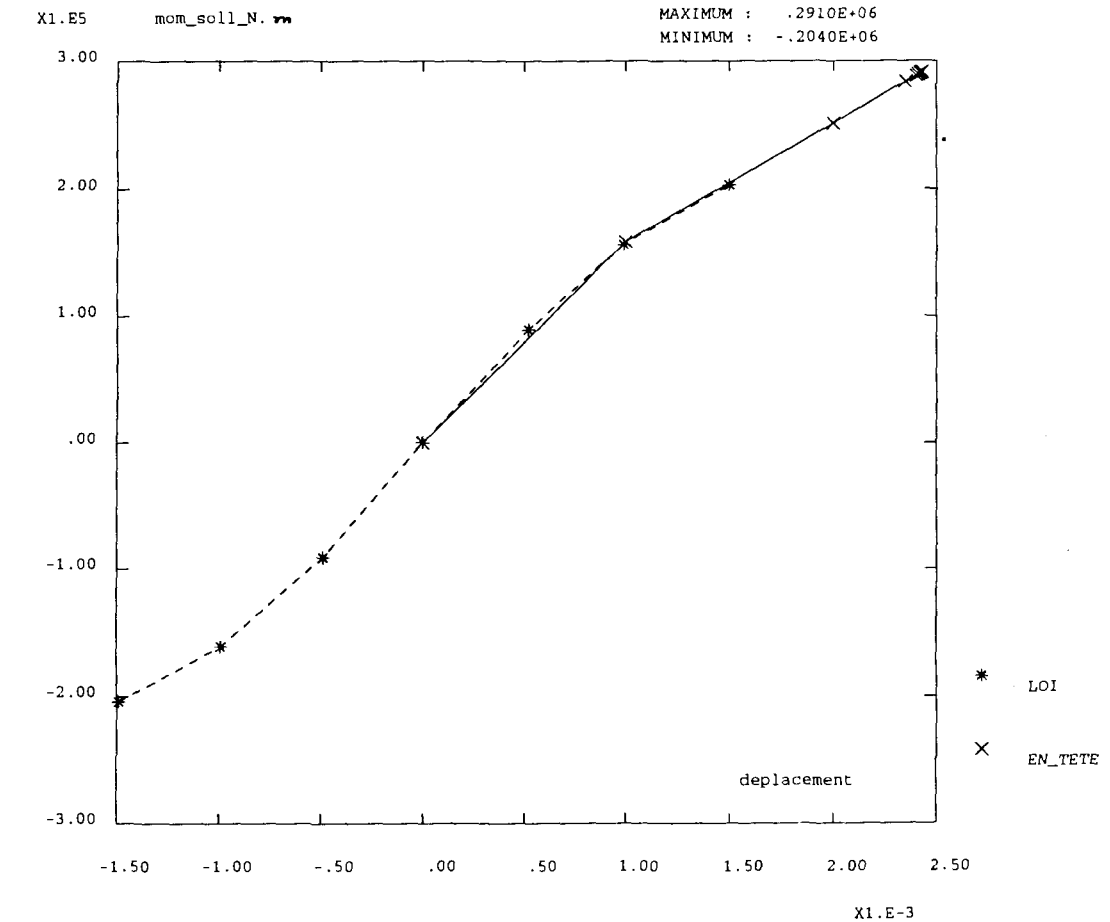
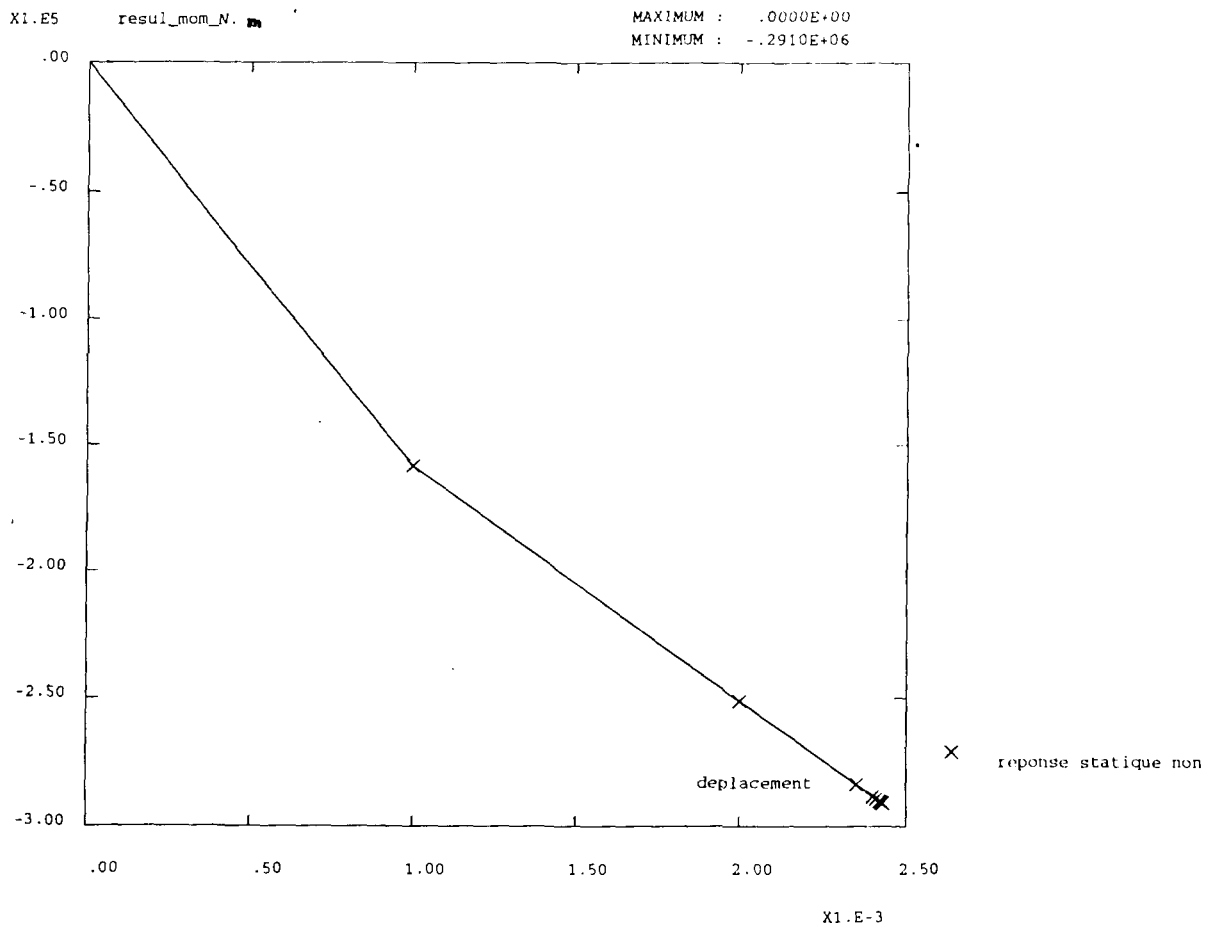


figure c - 1 - 11 : superposition de la loi idéalisée et de celle de l'élément global pour le 6ème étage pour un chargement positif



reponse statique non-lineaire - flexion - elements globaux

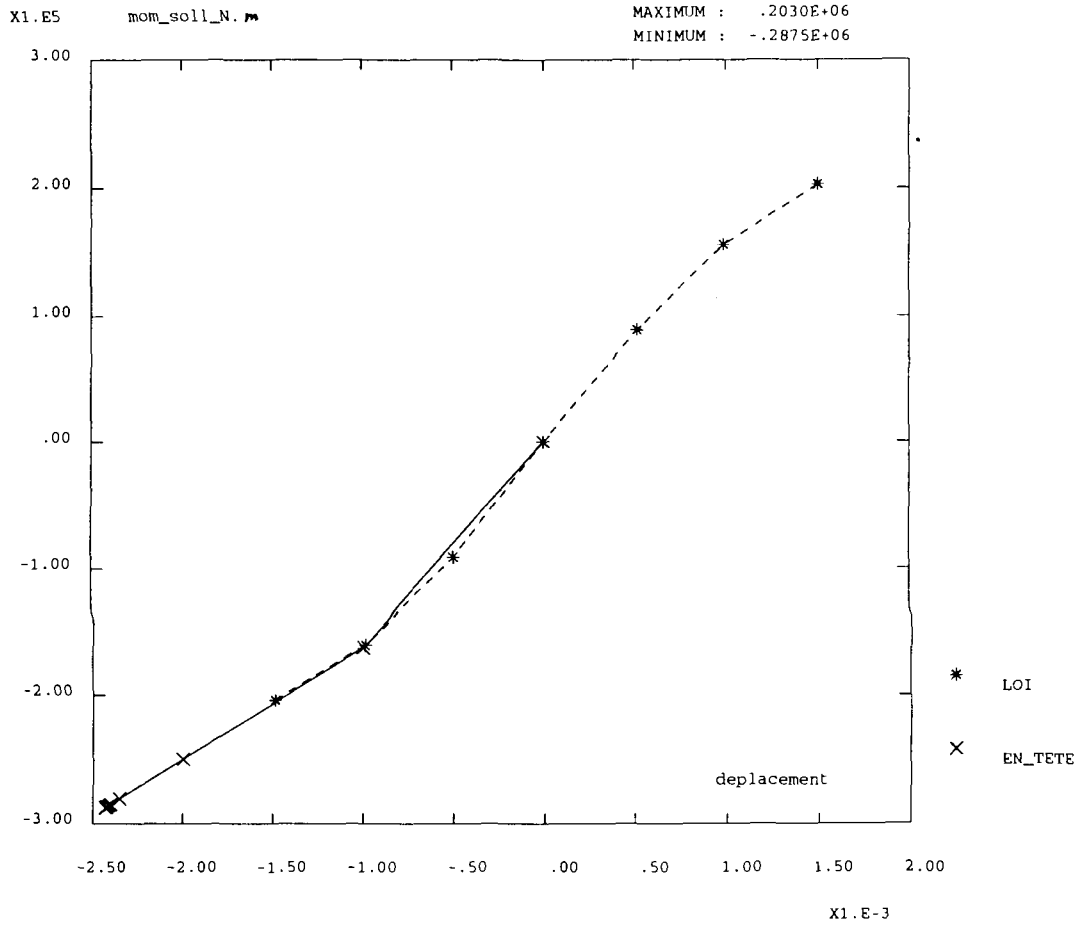
loi de comportement de l'élément global correspondante



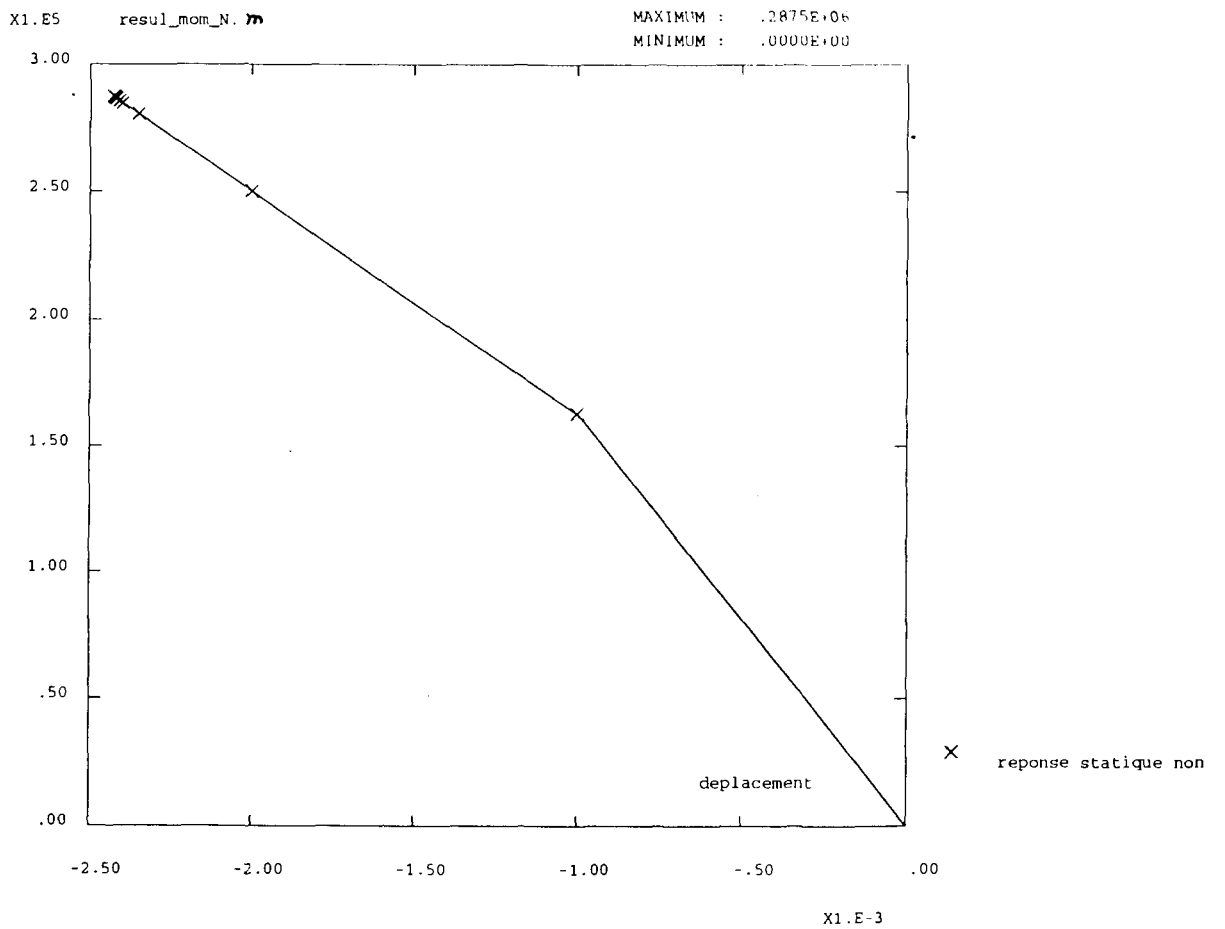
reponse statique non-lineaire - flexion - elements globaux

figure c - 1 - 12 : superposition de la loi idéalisee et de celle de l'element global pour le

6ème étage pour un chargement négatif



loi de comportement de l'élément global correspondante



ANNEXE D

NOTES SUR L'ELEMENT GLOBAL

SOMMAIRE

Présentation du concept d'élément global.

I- LES ELEMENTS GLOBAUX : OUTILS D'ANALYSE NON-LINEAIRE.....	page 3
I.1- Position du problème.....	page 3
I.2- Description des éléments globaux.....	page 6
I.3- Perspectives.....	page 8
II- DESCRIPTION DU MODELE PROPOSE.....	page 9
II.1- Cahier des charges.....	page 9
II.2- Principes de fonctionnement.....	page 9
II.3- Lois de fonctionnement introduites.....	page 10
II.4- Caractéristiques de rigidité.....	page 14

Présentation du concept d'élément global.

I- LES ELEMENTS GLOBAUX : OUTILS D'ANALYSE NON-LINEAIRE

Il s'agit dans cette partie de faire une présentation de l'élément global en tant qu'outil pour l'analyse du comportement non-linéaire des structures de génie civil, adapté aux chargements aussi bien statiques que dynamiques. Cette approche, reposant sur une formulation en termes de variables globales appliquées aux frontières de macro-éléments permet des dimensionnements ou des vérifications plus rapides que la méthode des éléments finis et plus précises que les méthodes de résistance des matériaux ([2]/[3]/[4]/[5]/[8]).

I.1- Position du problème :

Les structures de génie civil peuvent se décomposer en plusieurs parties : fondations, ossatures et voiles pour les bâtiments, fondations, piles, culées et tablier pour les ponts...Chacune de ces sous-structures possède une réponse particulière lors du chargement de la structure. En fait, leur dimensionnement ou leur vérification peuvent être réalisés avec des méthodes et des outils d'analyse différents suivant l'échelle d'approche du comportement.

I.1.a- L'approche de la résistance des matériaux :

La modélisation de la réponse globale de la structure fait généralement appel à des méthodes éprouvées depuis longtemps comme la R.D.M où, à partir de la description de la géométrie et du chargement extérieur, on détermine les différents éléments de réduction du tenseur des efforts généralisés (U, V, M) en tout point de la structure (fig. n°1). On peut alors vérifier si le niveau de chargement extérieur entraîne la ruine ou une dégradation des matériaux; les non-linéarités des matériaux (plasticité, endommagement...) étant prises en compte approximativement et globalement par les règles de dimensionnement.

Ces calculs sont simples, même sur des structures filaires à grand nombre de degrés de liberté pour des sollicitations quasi-statiques ou dynamiques (prise en compte des effets d'inertie et d'amortissement). Ils nécessitent seulement de petits calculateurs et sont rapides à effectuer.

Malheureusement, s'ils permettent de dimensionner une structure vis-à-vis des règlements en vigueur, ils apparaissent inutilisables pour une analyse locale des phénomènes ou pour évaluer la redistribution des efforts lors de son entrée en plasticité. Il n'est donc pas possible d'étudier avec ces méthodes classiques le comportement d'une structure à un stade avancé de dégradation. Cette approche ne nous permet pas d'évaluer les marges de sécurité réelles.

I.1.b- L'approche locale :

Pour des études plus locales (influence des particularités géométriques ou des non-linéarités dues aux matériaux) devant permettre des analyses plus fines en termes de contraintes et déformations, on préfère des méthodes de type éléments finis (fig. n°2). Malheureusement, ces méthodes supposent une discrétisation poussée des zones étudiées, et par conséquent des calculs longs et coûteux.

Cependant, il est alors possible d'obtenir des résultats précis qui permettent d'étudier le comportement ultime des structures. On peut aller jusqu'à distinguer la réponse des différents matériaux dans une section de béton armé ([6]/[7]/[8]). Mais ceci devient trop lourd dès qu'on désire étendre les observations à l'ensemble d'une structure comprenant beaucoup d'éléments constitutifs : on fait croître le nombre de degrés de liberté analysés donc le temps de calcul et on approche les limites des capacités numériques (convergence, stabilité...) des calculateurs. Ceci est encore plus pénalisant pour des analyses sismiques où on a recours à des calculs dynamiques avec un grand nombre de pas de temps.

fig. n°1 :

En conséquence, il faut envisager, soit de réduire la finesse de discrétisation (augmentation de la taille des éléments), soit d'abandonner l'approche de type mécanique des milieux continus pour des éléments de types poutres, coques...ce qui nous ramène à utiliser des grandeurs généralisées (effort normal, effort tranchant, moment de flexion...).

fig. n°2 :

Approche locale

I.1.c- L'approche multi-échelles :

Il s'agit donc d'utiliser une autre approche permettant une estimation convenable du comportement réel tout en conservant la souplesse de l'analyse de la résistance des matériaux. C'est la raison pour laquelle on développe aujourd'hui de nouveaux éléments, appelés éléments globaux, permettant à la fois un niveau intermédiaire de discrétisation et de représentation de phénomènes, les éléments dits globaux ou macro-éléments selon les auteurs.

Cette technique passe par la réalisation d'éléments utilisant la représentation locale des phénomènes géométriques et physiques plus ou moins complexes pour les traduire en une loi de fonctionnement de l'ensemble de la sous-structure représentée. Le travail local pour la constitution des lois de fonctionnement et celui global pour le comportement de la structure sont faits de manière complètement découplée dans le temps.

On peut envisager la constitution d'une "bibliothèque" d'éléments globaux et de leur loi de comportement associée qui serait réalisée par un expert de l'approche locale et qui comporterait des éléments comme des poutres , des éléments de jonction poutre-poteau, des

portiques...L'élaboration des éléments peut se faire par identification à partir de simulations numériques à l'échelle locale, ou encore à l'aide de résultats expérimentaux suffisamment documentés.

On peut aussi bien concevoir un élément global représentant une poutre armée, un portique qu'un étage complet de bâtiment ou encore une pile de pont.

En plus des résultats classiques, l'approche par élément global permet une meilleure compréhension du comportement physique et mécanique de la structure que l'approche RDM, grâce à la connaissance de la loi de fonctionnement (évaluation de l'endommagement dû à la fissuration, entrée en plastification...ex: poteau en comportement non-linéaire sous séisme [13]).

I.2- Description des éléments globaux :

Un élément global a pour but d'établir une relation entre les grandeurs locales, telles que les contraintes σ et les déformations ε , et les grandeurs globales de déplacements et d'efforts, de réaliser une homogénéisation du comportement de la structure représentée (voir fig. n°3). L'élément global se comporte comme une interface entre les échelles micro-méso ou méso-macro, suivant le problème considéré. Il constitue une échelle intermédiaire pour l'analyse des structures suffisamment proche du local pour permettre d'intégrer une information fine et du global pour permettre une mise en oeuvre simple et rapide.

fig. n°3 :

Approche par éléments globaux

I.2.a- Construction d'un élément global:

La construction d'un élément global comporte deux phases:

- une phase de préparation à l'échelle locale,
- une phase d'assemblage à l'échelle globale

- A l'échelle locale:

En premier lieu, il convient de choisir une description cinématique permettant de traduire les effets de géométrie et de condition aux limites. Pour des ossatures, il est simple d'utiliser celle de la R.D.M (hypothèse d'EULER-BERNOULLI). On peut y adjoindre des degrés de liberté complémentaires pour prendre en compte le gauchissement des sections.

Il faut aussi faire un choix en ce qui concerne les lois de comportement locales du matériau constituant la structure représentée par l'élément global. Les lois de comportement intégrées dans la réponse de l'élément global sont de type classique pour le béton armé: élastoplastique pour les aciers et élastique-plastique avec endommagement pour le béton (pour tenir compte de la fissuration).

Le dépouillement d'essais ou des simulations d'essais de chargement statique des sous-ensembles structuraux étudiés fournit la corrélation entre les grandeurs des efforts et celles des déplacements. Leur interprétation donne alors une ou des lois de fonctionnement de l'élément où apparaissent les différents stades de comportement de la structure (lois de type "moment-courbure" ou "effort tranchant- déplacement transversal").

- A l'échelle globale:

Une fois établies les lois de fonctionnement traduisant la réponse aux frontières de l'élément global en termes de relations explicites entre efforts généralisés et déplacements globaux, il convient de déterminer la matrice de rigidité de façon à être cohérent avec les lois de fonctionnement. C'est en effet la matrice de rigidité qui permet le calcul des efforts aux frontières de l'élément à partir du chargement de la structure.

Pour les chargements de type cyclique, l'élément est complété directement au niveau de sa loi de fonctionnement sans retour à l'échelle locale. On peut implémenter dans cette loi une gestion du comportement cyclique à partir de résultats expérimentaux ou de modèles de comportement simplifiés, adaptés au béton armé et qui ont fait leurs preuves (par exemple TAKEDA pour la flexion ou ROUFAIEL pour le cisaillement).

I.2.b- Utilisation d'un élément global:

La mise en oeuvre des éléments ne pose pas de difficultés pour les utilisateurs de codes de calcul aux éléments finis. On commence par discrétiser la structure initiale à l'aide d'éléments globaux déjà connus que l'on complète par des éléments issus d'une étude fine aux éléments finis.

On passe alors à l'analyse en réponse non-linéaire. A chaque étape du comportement, on effectue le processus suivant:

- 1- résolution des équations d'équilibre ,
- 2- calcul des sollicitations généralisées aux noeuds de chaque élément,
- 3- calcul des déplacements généralisés aux noeuds de chaque élément, grâce à la loi de fonctionnement,
- 4- calcul des déplacements globaux de la structure modélisée.

A l'issue des différents pas de chargement, l'utilisateur dispose d'informations globales, telles que les efforts et les déplacements généralisés, ainsi que d'informations locales sur l'élément global telles que la dégradation ou le stade de plastification. Il est intéressant d'observer le diagramme de la réponse temporelle des variables correspondant aux axes des lois de fonctionnement (ce diagramme peut être comparé aux lois de fonctionnement, ce qui fournit des indications intéressantes sur l'état de la structure à l'issue du chargement).

Le concept et son utilisation peuvent être appliqués aussi bien en tridimensionnel qu'en bidimensionnel.

I.3- Perspectives

Les études faites jusqu'à maintenant sur le développement des éléments globaux se sont avérées assez prometteuses en termes de précision atteinte, de souplesse d'emploi et de rapidité d'emploi ([3]). L'idéal serait de pouvoir développer des bibliothèques d'éléments courants pour simplifier et accélérer la modélisation des structures. En effet, il faut encore concevoir chaque élément pour les études actuelles.

Il semble aussi aujourd'hui que l'on puisse étendre avec succès les modélisations à l'aide d'éléments globaux à des sous-structures assez complexes comme des structures multi-étagées réalisées en voiles.

Cette approche peut paraître très intéressante pour les bureaux d'études pour contrôler leur dimensionnement de façon simple et systématique avec des coûts de calculs compatibles avec leurs impératifs. Elle offre aussi la possibilité d'effectuer des études paramétriques avec des coûts et des délais raisonnables.

Cependant l'intérêt des éléments globaux reste controversé. En effet, certains chercheurs estiment que cette approche a peu d'avenir vu le développement rapide de la puissance des calculateurs qui pourrait bientôt nous dispenser du passage à une échelle intermédiaire. Par ailleurs, un reproche courant fait à la méthode des éléments globaux est qu'elle exige un utilisateur très expérimenté pour obtenir une modélisation condensée convenable et les éléments globaux nécessaires. D'autres spécialistes tels MM FARDIS et SEIBLE ([3]) considèrent les éléments globaux comme des outils d'avenir, tout à faits adaptés aux besoins de l'analyse sismique.

II- DESCRIPTION DU MODELE PROPOSE :

Le modèle que nous développons ici reprend toutes les caractéristiques générales des éléments globaux décrits ci-dessus puisque nous cherchons à disposer d'un outil pratique de vérification. Néanmoins, il comporte certaines spécificités qu'il convient de présenter maintenant, ainsi que son principe de fonctionnement.

II.1- Cahier des charges:

Le modèle doit répondre aux exigences suivantes [9]:

- être suffisamment général,
- permettre une condensation suffisante afin de diminuer au maximum le nombre de noeuds,
- intégrer le comportement non-linéaire des matériaux.

Le domaine d'application particulier de ce modèle est l'analyse dynamique non-linéaire dans le domaine temporel de structures en béton armé soumises à de fortes sollicitations horizontales telles que les séismes. Le but ultime est de vérifier au séisme des installations nucléaires comme les bâtiments d'usines de retraitement.

Une des principales contraintes à respecter est la compatibilité de ce nouvel élément non seulement avec les autres types d'élément déjà existants dans le code de calcul CASTEM 2000, mais aussi avec les autres types d'analyse des structures (statique, modale, linéaire...).

Les sollicitations prises en compte dans cet élément sont l'effort normal (traction-compression), la flexion et le cisaillement. Il n'a pas été envisagé de considérer un comportement non-linéaire du matériau pour des éléments soumis à la torsion.

II.2- Principes de fonctionnement:

L'utilisation de notre modèle suppose que tous les éléments, ou les sous-structures représentées par des éléments globaux peuvent être considérés comme des liaisons entre deux noeuds de la structure (exemple: poteau = liaison entre deux planchers).

Pour réaliser notre modèle, nous avons choisi les principes suivants ([10]/[11]):

- les liaisons sont introduites entre deux points (noeuds) des éléments de construction,
- l'élément a pour support géométrique une ligne droite qui relie les deux noeuds extrêmes,
- l'élément fini est associé à une matrice de rigidité 12×12 correspondant aux 6 degrés de liberté de chaque noeud, comme pour une formulation de type poutre (POUTRE - correspondant à la formulation d'EULER BERNOULLI- ou TIMO -correspondant à la formulation de TIMOSHENKO- dans CASTEM 2000),
- les masses et les charges sont concentrées aux noeuds de l'élément,
- les différents types de sollicitation sont découplés suivant les directions principales (axiale, flexion et cisaillement selon deux directions orthogonales),
- le comportement selon une des lois non-linéaires pour un type et une direction de sollicitation est indépendant du stade de comportement atteint pour les autres lois prises.

Pour un élément soumis à une sollicitation composée (compression excentrée, effort tranchant + flexion), on considère cinq liaisons indépendantes entre les deux noeuds, chacune étant associée à une loi de fonctionnement (fig. n°4). Les sollicitations sont découplées, c'est-à-dire que qu'on ne tient pas compte des interactions entre les différentes lois comme celles de la flexion avec le cisaillement ou l'effort normal, pour ne citer que les interactions les plus souvent considérées. Ceci s'avère être une des limitations majeures de ce modèle. Cependant, le modèle présente déjà l'avantage de prendre en compte simultanément plusieurs types de sollicitations.

fig. n°4 :

Type des sollicitations prises en compte

II.3- Lois de fonctionnement introduites:

II.3.a- Capacité de l'élément global de CASTEM 2000:

Le modèle implementé dans CASTEM 2000 peut prendre en compte simultanément au plus 3 lois de comportement, les sollicitations considérées ne sont pas forcément comprises dans le même plan :

- Effort normal (traction - compression),
- Flexion dans un plan (M_y ou M_z),
- Cisaillement dans un plan (V_y ou V_z).

L'utilisateur choisit les sollicitations à prendre en compte suivant l'influence qu'elles risquent d'avoir sur la ruine de l'élément en fonction des chargements appliqués et des caractéristiques géométriques de l'élément. Par exemple, en fonction de l'éclatement d'un poteau, on considérera plutôt l'effet du cisaillement que celui de la flexion. Ce choix dépend surtout de la maîtrise du comportement mécanique des structures par l'utilisateur.

II.3.b- Obtention des lois de fonctionnement à introduire dans l'élément:

Comme cela a été exposé plus haut, l'obtention des lois de comportement est une étape cruciale dans la mise en oeuvre de l'élément global.

Les lois introduites dans la description des éléments se présentent sous la forme de diagrammes linéaires dont les points singuliers correspondent aux changements de type de comportement de l'élément lors d'un essai de chargement statique monotone. Ces diagrammes sont introduits par la donnée des coordonnées de ces points particuliers. Les lois sont pour une sollicitation axiale un diagramme "effort normal - allongement de l'élément", pour une sollicitation de flexion un diagramme "moment appliqué - déplacement différentiel entre les extrémités dans le plan de flexion" et pour une sollicitation de cisaillement un diagramme 'effort tranchant - déplacement différentiel entre les extrémités dans le plan de cisaillement'.

Ne disposant pas de bibliothèque d'éléments déjà constituée, nous obtenons les lois de comportement par dépouillement d'analyses fines à l'échelle locale. Nous procédons à des simulations de chargements et déchargements statiques en utilisant d'autres modélisations

disponibles dans CASTEM 2000 sur la sous-structure représentée par l'élément global. La connaissance des autres modèles nous permet de cerner les changements de comportement de la sous-structure et d'identifier les points nécessaires à l'obtention de notre loi de comportement. Nous donnerons des illustrations précises de ce processus d'identification au cours de la présentation de la phase de validation dans la troisième partie du rapport.

II.3.c- Les possibilités offertes sur les lois de fonctionnement:

Pour mieux répondre aux besoins de l'utilisateur en matière de précision ou de rapidité, on peut rentrer des lois de fonctionnement plus ou moins complexes.

- Les lois peuvent être introduites par 4 points pour les efforts axiaux ou 5 points pour les autres types de sollicitations, pour représenter un comportement élastoplastique simple.
- Les lois peuvent aussi être décrites en 6 ou 7 points si on veut prendre en compte la perte de rigidité due à la fissuration; dans ce cas les résultats sont plus précis, mais le calcul est plus long.

Nous testerons plus particulièrement l'option où l'effet de la fissuration est prise en compte.

II.3.d- Les lois de comportement cyclique utilisées:

Le pilotage sous sollicitations alternées de l'élément global se fait à partir de la loi introduite (qui ne représente que le comportement sous sollicitation simple et monotone) et d'un algorithme qui gère les chargements et les déchargements successifs. L'algorithme est différent d'un type de sollicitation à un autre. Nous avons adopté des algorithmes représentant des lois de comportement cyclique éprouvées expérimentalement pour le béton armé et aisées à mettre en oeuvre [3]. Ces lois supposent un comportement élastoplastique symétrique des aciers et un comportement du béton élastoplastique en compression et fragile en traction. On néglige en effet la résistance en traction du béton, ce qui correspond à des bétons d'usage courant pour la construction ($f_c = 25$ à 35 MPa).

- Pour les sollicitations axiales:
On considère un comportement du type TAKEDA pour les sollicitations en compression et linéaire en traction (fig. n°5).

fig. n°5 :

Loi de fonctionnement axial

- Pour les sollicitations de flexion:

On a retenu un modèle de comportement simplifié du type TAKEDA à partir d'un diagramme bilinéaire ou trilineaire (avec l'introduction d'une chute de rigidité due à l'ouverture des fissures) (fig. n°6).

fig. n°6 :

Loi de fonctionnement en flexion

- Pour les sollicitations en cisaillement:

On a adopté une loi de comportement cyclique simplifiée à partir des modèles simplifiés de ROUFAIEL et d'OHMORI (fig. n°7), mais qui intègre les changements de rigidité causés, par exemple, par la rupture et le détachement du béton de l'armature après intersection des fissures inclinées, ou par le glissement et l'arrachement des armatures du béton. Cette loi de comportement cyclique s'appuie sur un diagramme bilinéaire ou trinéaire. Cette loi de comportement simplifiée s'applique très bien aux poteaux peu élancés, nous l'appliquerons aussi pour les voiles, pour lesquels nous ferons des tests plus spécifiques ultérieurement.

fig. n°7 :

Loi de fonctionnement en cisaillement

II.4- Caractéristiques de rigidité:

Pour compléter l'élément, il faut lui adjoindre une matrice de rigidité pour permettre le calcul des sollicitations. Il s'agit en fait, soit de calculer les raideurs à partir des différentes lois de comportement, soit d'identifier les paramètres E' ,module d'YOUNG, S' section "équivalente", I_y et I_z inerties "équivalentes" de l'élément global pour former une matrice de rigidité qui soit cohérente avec les lois de comportement prise en compte.

Dans ce dernier cas, les termes de la matrice de raideur doivent impérativement être égaux aux raideurs des plages de comportement élastique linéaire des lois de fonctionnement introduites. Cette condition est indispensable pour avoir des résultats précis. Ces termes sont de la forme $E'S'/l$, $kE'I/l^2$ et $k'E'I/l^3$ respectivement pour les sollicitations axiales, de flexion et de cisaillement, k et k' dépendent des conditions aux limites et l étant la longueur de l'élément imposée par la géométrie. Ces termes sont en fait ceux que l'on trouve dans les matrices utilisées pour les poutres dans la méthode des déplacements.

Dans le cas de l'élément global, la matrice de rigidité peut être décrite dans CASTEM 2000 de deux façons:

- soit en utilisant la formulation POUTRE et l'opérateur RIGIDITE après avoir introduit E' , I' , S' calculés à partir des lois de fonctionnement et des caractéristiques de la sous-structure représentée par l'élément global. CASTEM 2000 crée alors la matrice de rigidité complète. On obtient les termes qui pilotent les lois prises en compte (raideurs de membrane, de flexion, de cisaillement), mais aussi tous les autres termes issus de la formulation poutre (raideur de torsion, termes non diagonaux);
- soit en calculant les rigidités de compression-traction, de flexion, de cisaillement pilotant le suivi des lois de fonctionnement introduites, qu'on rentre alors "à la main" grâce à l'option MANU RIGIDITE qui permet de créer une matrice de rigidité indépendamment de la formulation utilisée. On obtient une matrice plus petite, ne comprenant que les termes utiles pour les lois de fonctionnement utilisées.

On reviendra sur l'introduction de ces lois de comportement dans la prochaine partie du rapport, où nous aborderons les modifications que nous avons effectuées dans les procédures pour améliorer le fonctionnement de l'élément global.

Certaines autres particularités de l'élément global implanté dans CASTEM 2000 seront détaillées ultérieurement dans les deux prochaines parties.

BIBLIOGRAPHIE

références bibliographiques

- [1] -Calcul Dynamique des Structures en Zone Sismique.
A.Capra et V.E.Davidovici - Eyrolles 1984.
- [2] -Etude de la Tenue aux Séismes des Voiles en Béton Armé.
F.Wang - Thèse de Doctorat Paris VI - 1990
- [3] -Modèles Globaux de Comportement Non-Linéaire des Structures. Application aux Structures en Béton Armé.
Rapport DMT/SEMETS/LAMS/82.49 A.Millard, A.Hoffman, J.Gauvain et G.Nahas.
- [4] -Modèles Condensés pour l'Analyse du Comportement de Bâtiments en Béton Armé soumis à l'Action Sismique.
Rapport DMT/92.245 O.Olariu
- [5] -Modèle Condensé pour l'Analyse des Structures.
Rapport DMT/93.335 O.Olariu
- [6] -Quelques Applications du Modèle Global pour l'Analyse Sismique des Bâtiments.
Rapport DMT/93/477 O.Olariu
- [7] -CASTEM2000 - Guide du Développement 1991.
Rapport DMT/92.300 A.Millard
- [8] -Analyse du Comportement Non-Linéaire de Poteaux en Béton Armé sous Séisme.
Rapport DMT/90.039 F.Gantenbein & H.Ambrois

REMERCIEMENTS

Je remercie Mme Françoise GANTENBEIN pour m'avoir autorisée à faire mon stage de D.E.A. dans le laboratoire E.M.S.I.

Je tiens également à remercier Mr Sylvain LAVARENNE, mon responsable de stage, pour son attention tout au long de ces trois mois.

Je remercie aussi les autres membres du laboratoire E.M.S.I pour leur gentillesse, leur conseil et leur soutien.