



Auteur : Docteur TOUMI BELKACEM

Conception Assisté par Ordinateur
Logiciel SAP2000
(Cours & Exemples d'application)

Polycopie destiné aux étudiants de : Master 2 : Professionnelle

Année universitaire 2018-2019

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	7
1 CONCEPTION ASSISTEE PAR ORDINATEUR	8
2 VUE D'ENSEMBLE DU LOGICIEL SAP2000	8
3 ÉTUDE DE L'INTERFACE DU SAP2000	10
3.1 MENU « FILE »	10
3.1.1 MODEL « TEMPLATE »	10
3.1.1.1 ELEMENT « FRAME » - TYPE POTEAU ET POUTRE	10
3.1.1.2 ELEMENT « FRAME » - TYPE TREILLIS	11
3.1.1.3 ELEMENT « SHELLS »	11
3.1.1.4 IMPORTATION ET EXPORTATION DES FICHIERS	12
3.2 MENU « EDIT »	12
3.2.1 MOVE	12
3.2.2 REPLICATE	12
3.2.3 DEVIDE FRAME	13
3.2.4 MESH SHELLS	14
3.3 MENU « DEFINE »	14
3.3.1 MATERIALS	15
3.3.2 FRAMES SECTIONS	15
3.3.3 SHELLS SECTIONS	16
3.3.4 STATIC LOAD CASES	17
3.3.5 RESPONSE SPECTRUM FUNCTIONS	18
3.3.6 RESPONSE SPECTRUM CASES	19

3.3.7 LOAD COMBINATIONS	20
3.4 MENU « ASSING »	21
3.4.1 JOINTS	21
3.4.1.1 RESTRAINTS	21
3.4.1.2 SPRINGS	22
3.4.1.3 MASSES	22
3.4.2 FRAME	23
3.4.2.1 SECTIONS	23
3.4.2.2 PRESTRESS	23
3.4.2.3 RELEASE	24
3.4.3 SHELLS	24
3.4.3.1 SECTIONS	24
3.4.4 JOINT STATIC LOADS	25
3.4.5 FRAME STATIC LOADS	26
3.4.6 SHELL STATIC LOADS (CHARGES SURFACIQUE)	26
3.4.7 JOINT PATTERNS	27
3.5 MENU « ANALYZE »	27
3.5.1. ANALYSE STATIQUE LINEAIRE	27
3.5.2. ANALYSE P-DELTA	28
3.5.3. ANALYSE STATIQUE NONLINEAIRE	28
3.6 LES ETAPES DE CALCUL SONT LES SUIVANTS :	29
3.6.1. ANALYSE DYNAMIQUE	29
3.6.2. ANALYSE MODALE	29
3.6.3. ANALYSE SPECTRALE	29
3.6.4. ANALYSE DYNAMIQUE TEMPORELLE	30
3.6.5 OPTIONS DE L'ANALYSE DONNEES PAR SAP 2000	30
3.7 MENU « DISPLAY »	31
3.7.1 SHOW LOADS	31
3.7.2 SHOW INPUT TABLES	32

3.7.3 SHOW DEFORMED SHAPE	32
3.7.4 SHOW MODE SHAPE	32
3.7.5 SHOW ELEMENT FORCES / STRESSES	32
4. MODELISATION PAR SAP2000	33
5. EXEMPLES DE CALCUL	33
5.1. EXEMPLE DE PORTIQUE AUTOSTABLE EN B.A EN R+4	33
5.1.1. DESCRIPTION DU BATIMENT	33
5.1.1.1. DIMENSIONS EN PLAN DE LA STRUCTURE	34
5.1.1.2. DEFINITION DES CAS DE CHARGES	34
5.1.1.3. DEFINITION DES COMBINAISON DECHARGE	34
5.1.1.4. CALCUL DES MASSES POUR L'ANALYSE MODALE	34
5.1.1.5. CALCUL DES CHARGES STATIQUES EQUIVALENTES EX1,Y1 :	34
5.1.2. ETAPE N°1 : DEFINIR LA GEOMETRIE DU MODELE	35
5.1.2.1. CHOIX DES UNITES	35
5.1.2.2. GEOMETRIE DE BASE	35
5.1.2.3. MODIFICATION DE LA GEOMETRIE DE BASE	37
5.1.3. ETAPE N°2 : SPECIFICATION DES PROPRIETES DES ELEMENTS	38
5.1.3.1. DEFINITION DU MATERIAU	38
5.1.3.2.1. DEFINITION DES SECTIONS	39
5.1.3.2.2 AFFECTATION DES SECTIONS AUX ELEMENTS DE STRUCTURES	40
5.1.3.3. AFFICHAGE D'INFORMATION SUR LE MODELE	41
5.1.4. ETAPE N°3 : DEFINITION DES CAS DE CHARGES	41
5.1.4.1. CAS DE CHARGES STATIQUES	42
5.1.4.2. CAS DE CHARGES SISMIQUES	42
5.1.4.2.1. METHODE STATIQUE EQUIVALENTE	42
5.1.4.2.2. METHODE D'ANALYSE MODALE SPECTRALE	43
5.1.4.3. AFFECTATION DES CHARGES STATIQUES	43
5.1.4.4. AFFECTATION DES CHARGES SISMIQUES	44

5.1.4.4.1. METHODE STATIQUE EQUIVALENTE	44
5.1.4.4.2. METHODE D'ANALYSE MODALE SPECTRALE	45
5.1.4.5. COMBINAISONS D'ACTIONS	46
5.1.5. ETAPE N°4 : CONDITIONS AUX LIMITES	47
5.1.5.1. APPUIS (RESTRAINTS)	47
5.1.5.2. CREATION DU NŒUD MAITRE	48
5.1.5.3. CONSTRAINTS	49
5.1.6. ETAPE N°5 : DEMARRAGE DE L'EXECUTION	51
5.1.7. ETAPE N°6 : VISUALISATION ET EXPLOITATION DES RESULTATS	51
5.1.7.1. RESULTATS SUR FICHIERS	52
5.1.7.2. VISUALISATION DES RESULTATS A L'ECRAN	53
5.1.7.2.1. DEPLACEMENTS	53
5.1.7.2.2. REACTIONS	54
5.1.7.2.3. FORCES INTERNES	55
5.1.8. DEMARRAGE D'UNE AUTRE ANALYSE	55
5.2 EXEMPLE D'UNE STRUCTURE MIXTE EN B.A	57
5.2.1. ETAPE N°1 : DEFINITION DE LA GEOMETRIE DU MODELE	57
5.2.2. ETAPE N°2 : SPECIFICATION DES PROPRIETES DES ELEMENTS	57
5.2.3. ETAPE N°3 : DEFINITION DES CAS DE CHARGES	58
5.2.4 ETAPE N°4 : CONDITIONS AUX LIMITES	58
5.2.5. ETAPE N°5 : DEMARRAGE DE L'EXECUTION	58
5.2.6. VISUALISATION ET EXPLOITATION DES RESULTATS	60
5.2.6.1. DEPLACEMENTS	60
5.2.6.2. FORCES INTERNES	60
5.3. EXEMPLE D'UNE STRUCTURE EN VOILES	61
5.3.1. DESCRIPTION DE LA STRUCTURE	61
5.3.2. ETAPE N°1 : DEFINITION DE LA GEOMETRIE DU BATIMENT	61
5.3.3. ETAPE N°2 : SPECIFICATION DES PROPRIETES DES ELEMENTS	62
5.3.3.1. DEFINITION DU MATERIAU	62

5.3.3.2. DEFINITION DE LA SECTION	63
5.3.4. ETAPE N°3 : DEFINITION DE CAS DE CHARGES ET DES COMBO	63
5.3.4.1. AFFECTATION DES CAS DE CHARGES STATIQUES	63
5.3.4.2. AFFECTATION DES CAS DE CHARGES SISMIQUES	63
5.3.5. ETAPE N°4 : CONDITIONS D'APPUIS	64
5.3.6. ETAPE N°5 : DEMARRAGE DE L'EXECUTION	64
5.3.7. VISUALISATION ET EXPLOITATION DES RESULTATS	65
5.3.7.1. DEPLACEMENTS	65
5.3.7.2. FORCES I INTERNES	65

AVANT PROPOS

Le présent polycopié intitulé **conception assistée par ordinateur** est une matière de l'unité fondamentale du domaine sciences de la technologie. Il s'adresse aux étudiants du deuxième semestre master professionnel (M2 Pro-LMD). Le contenu de ce polycopié est rédigé sous forme de cours détaillés, avec des exemples d'application et d'entraînement sur la conception à l'aide d'un logiciel CAO qui est le SAP2000.

Ce contenu est structuré en deux parties. Le premiers partie traite le concept de la CAO et présente le fonctionnement du SAP2000 et de son interface intuitive, largement utiliser pour la conception assistée par ordinateur dans le domaine de Génie Civil. La deuxième partie de cette polycopie regroupe des exemples d'application ; chaque exemple fournit les étapes à suivre afin de réaliser la conception de l'ouvrage finie. L'objectif principal de ce chapitre est de se familiariser avec la conception assistée par ordinateur, en mettant en application les différentes fonctions et les outils fournis par le logiciel SAP2000.

- **Conception assistée par ordinateur**

La CAO décolle dans les années 75-90, lorsque le coût de mise en place d'un poste se rapprocha du coût annuel d'un dessinateur. La mise en place fut un peu pénible au début en raison d'une nécessité de reprendre les plans existants. On s'aperçut à cette occasion que statistiquement *près de 10 %* des cotations sur les plans existants étaient inexactes, que des références de plans existaient en double, qu'une référence unique pouvait correspondre à plusieurs plans légèrement différents, etc. Au bout du compte, le gain de fiabilité de l'information se révéla constituer un argument supplémentaire important décidant à généraliser la CAO.

La CAO offre une visibilité globale du comportement d'un objet avant qu'il n'existe, tant au niveau de son aspect que de sa structure et de son fonctionnement. Les objets peuvent être représentés en deux ou en trois dimensions (2D ou 3D).

Chaque corps de métier peut disposer d'un outil CAO. En mécanique, on peut concevoir une pièce où chaque forme répond à un besoin de fonctionnement ainsi qu'un mécanisme regroupant plusieurs pièces. En électronique, on peut assembler des composants (résistances, capacités, éléments de logique...) simulables :

- **Vue d'ensemble du logiciel Sap2000**

SAP2000 est un logiciel de calcul des efforts internes, édité par *Computers & Structures Inc.* Dans SAP2000, les trois premières lettres signifient *Structural Analysis Program* (programme d'analyse structurelle).

Ce logiciel, qui en est à sa vingtième édition, est fréquemment utilisé par les ingénieurs civils lors de la conception et l'analyse de ponts, d'édifices et de barrages, etc.

Le logiciel est utilisé pour les structures en béton armé, charpente métallique ou autres matériaux de construction et sous n'importe quelle forme de chargement : ponctuel, linéaire, surfacique.... Le logiciel traite plusieurs types de chargement statique (poids propre de la structure et charges d'exploitation) ou dynamique (séisme, explosion...). De plus, il dispose de plusieurs réglages pour les différentes vérifications : Eurocode, règlements américains et autres.

Le logiciel n'est pas disponible en français et il ne donne pas les schémas de

coffrage et ferraillage pour les éléments en béton armé.

Le nom SAP est synonyme de méthodes d'analyse à la pointe de la technologie depuis son introduction il y a plus de 30 ans. SAP2000 suit la même tradition et propose une interface utilisateur très sophistiquée, intuitive et polyvalente, dotée d'un moteur d'analyse et d'outils de conception inégalés pour les ingénieurs travaillant dans les domaines du transport, de l'industrie, des travaux publics, du sport et autres.

De son environnement de modélisation graphique basé sur des objets 3D à la grande variété d'options d'analyse et de conception complètement intégrées dans une interface utilisateur puissante, SAP2000 s'est révélé être le programme structurel polyvalent le plus intégré, le plus productif et le plus pratique actuellement sur le marché. Cette interface intuitive vous permet de créer des modèles structurels rapidement et intuitivement sans de longs délais d'apprentissage. Vous pouvez maintenant exploiter toute la puissance de SAP2000 pour toutes vos tâches d'analyse et de conception, y compris les petits problèmes quotidiens.

Les modèles complexes peuvent être générés et maillés avec de puissants modèles intégrés. Les fonctions de code de conception intégrées peuvent générer automatiquement des charges dues au vent, aux vagues, aux ponts et aux séismes grâce à des vérifications automatiques complètes des codes de conception en acier et en béton, conformes aux normes de conception américaines, canadiennes et internationales.

Des techniques analytiques avancées permettent une analyse étape par étape de grandes déformations, des analyses Eigen et Ritz basées sur la rigidité des cas non linéaires, une analyse du câble caténaire, une analyse non linéaire du matériau avec des charnières en fibre, un élément de coque non linéaire à plusieurs couches, une analyse de flambement, une analyse de collapsus progressif méthodes énergétiques pour le contrôle de la dérive, amortisseurs en fonction de la vitesse, isolateurs de base, plasticité du support et analyse de la construction segmentaire non linéaire. Les analyses non linéaires peuvent être des antécédents statiques et/ou chronologiques, avec des options d'analyse dynamique d'historique temporel non linéaire et d'intégration directe FNA.

D'une simple analyse de cadre statique 2D à une grande analyse dynamique 3D complexe non linéaire, SAP2000 est la solution la plus simple et la plus productive pour vos besoins en analyse structurelle et en conception.

- **ETUDE DE L'INTERFACE DU SAP2000**

3.1 MENU « FILE »

Le menu FILE permet d'importer (IMPORT), d'ouvrir un model existant (OPEN), d'enregistrer un model en cours (SAVE) d'imprimer des graphiques et tableaux (PRINT) ou de créer un nouveau model (NEW MODEL).

3.1.1 NEW MODEL

En cliquant sur NEW MODEL, un gabarit de modèle incluant un large éventail de structures typiques s'affiche. En choisissons l'un d'eux, un nouveau modèle sera initialisé et charger à partir de fichiers de modèles prédéfinis. Une fois qu'un modèle a été généré à l'aide de la commande NEW MODEL, on peut le modifier à l'aide des commandes des menus Edition, Dessin, Définir et Affecter.

3.1.1.1 ELEMENT « FRAME » TYPE POTEAU ET POUTRE

L'élément FRAME est un élément barre unidimensionnel qui a six degrés de libertés par nœud, 3 translations et 3 rotations permettant de reprendre les 3 efforts et les 3 moments. Ces éléments peuvent être insérés à partir des structures types ci-dessous ;

- 1 - Beam (Poutre);
- 2 - Portal frame (Portique) ;
- 3 - Braced frame (portique contreventé) ;
- 4 - Eccentric frame (portique excentré);
- 5 - Space frame (portique d'espace);
- 6 - Perimeter frame (portique périphérique)

Une fois le modèle de structure type a été choisi, on doit spécifier les caractéristiques structurelles suivantes ;

- Number of spans (Nombre de travées)
- Span length (Longueur de la travée)
- Number of stories (Nombre de niveaux)
- Number of bays (Nombre de portiques)
- Story height (Hauteur des étages)
- Bay width (Largeur du portique)
- Gap width (Distance entre les nœuds de contreventement)
- Number of bays along X (Y) (Nombre de portiques selon X (Y))
- Bay width along X (Y) (Largeur de portiques selon X (Y))

3.1.1.2 ELEMENT « FRAME » - TYPE TREILLIS

Les éléments barre de type treillis sont des éléments barres unidimensionnel articulés au nœuds donc ils ne peuvent subir et transmettre que les efforts axiaux.

Ces éléments peuvent être insérés à partir des structures types ci-dessous :

- 1 - Sloped truss (Ferme inclinée);
- 2 - Vertical truss (Ferme verticale);
- 3 - Space truss (Ferme spatiale).

Une fois le modèle de la ferme type a été choisi, on doit spécifier les caractéristiques structurelles suivantes ;

- Number of bays (Nombre des baies)
- Height of truss (Hauteur du ferme)
- Truss bay length (Longueur de la baie du treillis)
- Number of stories (Nombre des niveaux)
- Story height (Hauteur du niveau)
- Top width along X (Y) (Largeur supérieure selon X (Y))
- Bottom width along X (Y) (Largeur inférieure selon X (Y))

3.1.1.3 ELEMENT « SHELLS »

Les éléments SHELL (éléments coques) sont des éléments bidimensionnels utilisés pour la modélisation des voiles, dalles, plateformes, coupole, silos, etc.

Les éléments SHELL peuvent être insérés à partir des structures types ci-dessous :

- 1 - Shear wall (Voile)
- 2 - Barrel (Voute)
- 3 – Cylinder (Cylindres et silos)
- 4 – Dome (coupole)

Le nombre ainsi les dimensions des éléments doivent être spécifier selon le type de la structure à modéliser et les caractéristiques structurelles suivantes doivent être spécifiées ;

- Number of spaces along X (Z) (Nombre de mailles selon X (Z))
- Space width along X (Z) (Largeur de maille selon X (Z))
- Number of circumferential spaces (Nombre de mailles périphériques)
- Number of height spaces (Nombre d'espaces en hauteur)

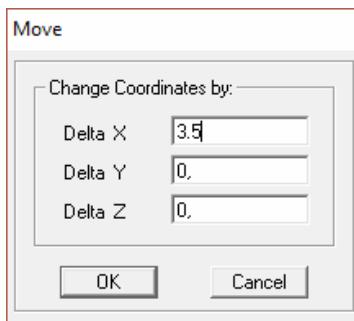
- Cylinder height (Hauteur du cylindre)
- Radius (Rayon)
- Number of span spaces (Nombre de mailles selon la travée)
- Span (Envergure)
- Roll down angle (Angle d'ouverture)
- Number of segments (Nombre de segments)

3.1.1.4 IMPORTATION ET EXPORTATION DES FICHIERS

Le logiciel SAP2000 peut importer et travailler avec des fichiers de structures (comme un nouveau modèle ou ajoutées à un modèle existant) créer avec d'autres logiciels comme le SAP90, STAAD-III, Microsoft Access, Autocad, CIS, NASTRAN, STRUCAD 3D etc. et peut également exporter les modèles vers plusieurs autres formats de fichiers (Autocad, CIS, IGES, IFC ...).

3.2 MENU « EDIT »

Le menu « EDIT » regroupe tous les commandes nécessaires pour apporter des modifications ou éditer le model en cours. Parmi les commandes intéressantes contenues dans ce menu on a les commandes *MOVE*, *REPLICATE*, *DIVIDE FRAME* et *MESH SHELL*.



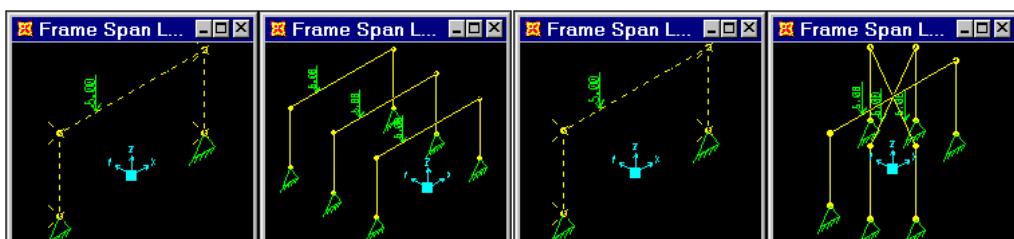
3.2.1 MOVE (Déplacer)

Cette commande permet le déplacement linéaire des nœuds, des éléments d'une partie de structure dans les directions X, Y et Z, après avoir entrer les valeurs de mouvement relatif dans les zones d'édition Delta X, Y et Z.

3.2.2 REPLICATE (générer)

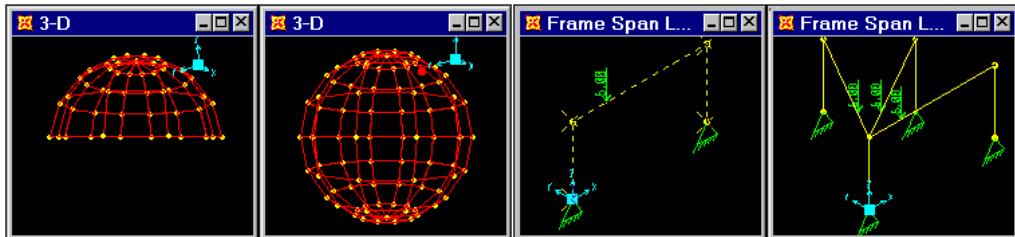
Le duplicita est un moyen puissant qui permet de générer un grand modèle à partir d'un petit modèle lorsque les objets et / ou les nœuds forment un model linéaire ou radial ou sont symétriques par rapport à un plan. Lorsque des articulations ou des objets sont répliqués, les affectations de ces articulations et de ces objets le sont également. Cela est un avantage majeur de l'utilisation de Répliquer plutôt que des commandes Couper, Copier et Coller.

Pour la génération linéaire on doit spécifier le nombre et la distance les éléments selon les 3 axes quadratiques X, Y et Z. Cependant, l'angle et l'axe de rotation ainsi le nombre d'éléments à générer, doivent être spécifiées dans le cas d'une génération radiale.



(1) Replicate linaire

(2) Replicate radial



(3) Replicate radial autour d'un point (4) Replicate miroir

3.2.3 DEVIDE FRAME (Subdiviser les éléments FRAME)

La commande Edit Lines > Divide Frames permet de subdiviser un ou plusieurs élément FRAME sélectionnes en plusieurs tronçons identiques ou différents. Cependant, l'élément FRAME peut être subdiviser par l'intersection avec le quadrillage choisi automatiquement au début ou obtenu par l'instruction EDIT GRID du menu DRAW.

3.2.4 MESH SHELLS (Subdiviser les éléments SHELLS)

SAP2000 permet aux éléments de surface présentent dans le modèle d'être divisés en éléments plus petits ayant les mêmes caractéristiques mécaniques et même chargement que l'élément initial puis ajouter dans le modèle de calcul.. La division de l'objet est effectuée à l'aide de la commande Menu Edition> Diviser les zones. Le maillage d'un objet de zone est réalisé à l'aide de la commande Menu assigner> Zone> Maillage de zone automatique.

Dans un même modèle on peut utiliser des tailles différentes suivant la sensibilité de chaque région.

Une autre caractéristique relative aux dimensions de l'élément est le rapport de la plus grande dimension sur la plus petite dimension de l'élément. Un rapport proche de l'unité généralement offre des résultats meilleurs.

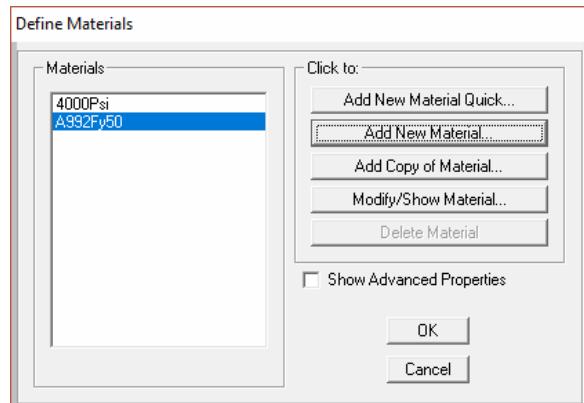
3.3 MENU « DEFINE »

Ce menu regroupe tous les commandes qui permettent la saisie graphique des caractéristiques géométriques et mécaniques ainsi la définition des charges statiques et dynamiques.

3.3.1 MATERIALS (Propriétés des matériaux)

Cette instruction permet d'introduire les propriétés mécaniques et élastiques d'un matériau.

Le logiciel offre par défaut deux matériaux, le béton et l'acier dont les caractéristiques peuvent être changées selon les besoins ainsi qu'un matériau qui peut être personnalisé en introduisant les propriétés mécaniques dans le menu réservé à cette option.



Caractéristiques mécaniques pour calcul des sollicitations

- Mass per unit volume (Masse volumique)
- Weight per unit volume (Poids volumique)
- Modulus of elasticity (Module d'élasticité)
- Poisson's ratio (Coefficient De Poisson)
- Coeff of thermal expansion (Gradient de dilatation thermique)

Propriétés mécaniques attribuées pour le calcul de béton armé

- Reinforcing yield stress, fy (Contrainte élastique des aciers)
- Concrete strength, fc (Résistance caractéristique du béton)
- Shear steel yield stress, fs (Contrainte de calcul des aciers)
- Concrete shear strength, fcs (Résistance au cisaillement du béton).

Propriété mécaniques attribuées pour le calcul de la charpente métallique

- Steel yield stress, fy.. (Contrainte élastique des profilés métalliques)

3.3.2 FRAMES SECTIONS (Section des éléments FRAME)

Les caractéristiques géométriques des éléments doivent être spécifiées pour chaque groupe d'éléments de mêmes dimensions et de même nature.

Ces propriétés peuvent être introduites directement en terme de caractéristiques prismatiques :

- Aire de section droite de la barre,
- Moments d'inertie par rapport aux axes locaux 2 et 3,
- Constante de torsion,
- Hauteurs utiles de la barre selon les axes locaux 2 et 3 pour prise en compte de déformations dues à l'effort tranchant.

Le SAP 2000 présente aussi des possibilités de définition des caractéristiques géométriques à partir des bibliothèques des profilés métalliques standard. Ces types de profilés peuvent être importés à partir des fichiers suivant : Aisc.pro, Cisc.pro et Sections.pro, ainsi que Eoro.pro.

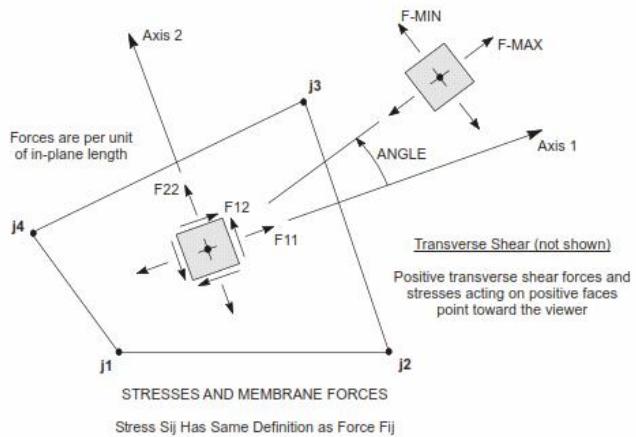
3.3.3 SHELLS SECTIONS (Section des éléments SHELLS)

La section des éléments SHELLS est définie par l'épaisseur. On distingue plusieurs types des éléments plaques qui sont :

ELEMENT MEMBRANE

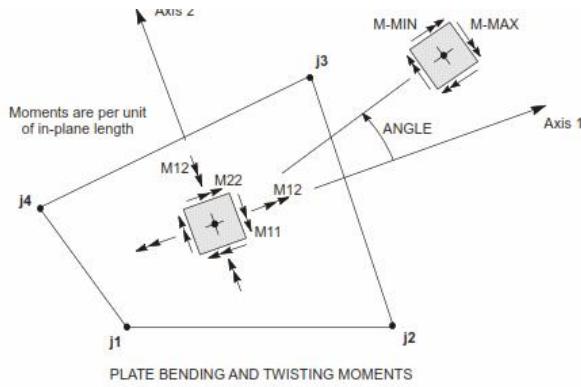
L'élément membrane n'équilibre que les forces tangentes à sa surface, et ne peut donc transmettre des moments fléchissant.

En pratique, ce type est utilisé pour les plaques minces.



ELEMENT DALLE et PLAQUES

Ils sont utilisés pour la modélisation des voiles, dalles et coques. Ce type d'élément n'équilibre que les moments d'axes tangents à leur surface et des forces perpendiculaires au plan tangent. Trois degrés de liberté sont pris en compte au niveau de chaque nœud, deux rotations dans le plan tangent, une translation perpendiculaire au plan auxquels sont associés deux moments et une force.



ELEMENT COQUE

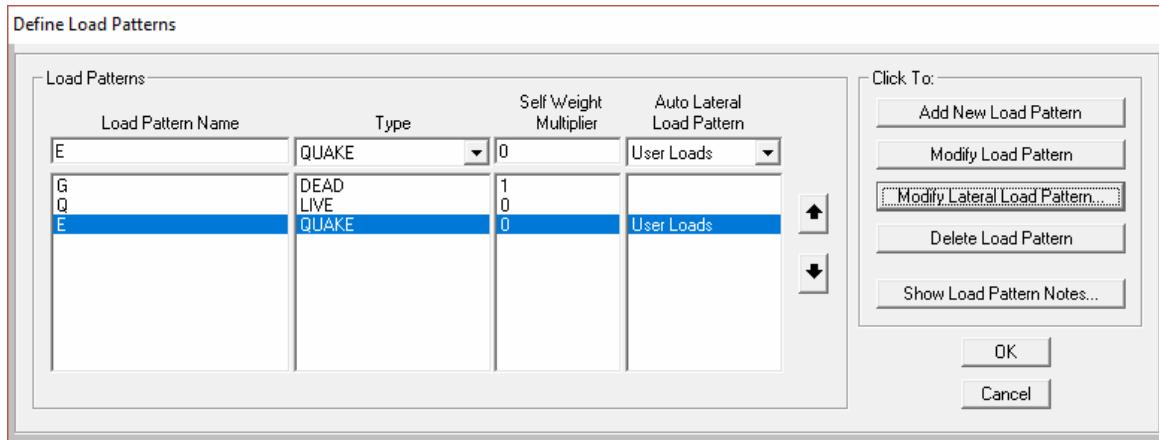
C'est un assemblage d'un l'élément de plaque et d'un l'élément de membrane.

3.3.4 STATIC LOAD CASES (Définition des cas de charges)

Cette option permettre de définir les cas de charges et leurs types ;

- Permanentes (DEAD),
- Exploitations (LIVE),
- Sismiques (QUAKE),
- Vent (WIND), de la
- Neige (SNOW) et d'autres.

Le poids propre de la structure est pris en compte dans les cas de charges par le coefficient 0 ou 1. Ce coefficient peut être changer selon le cas par exemple le poids propre est négligé dans le cas de charge d'exploitation pour cela on prend « 0 » comme valeur du coefficient multiplicateur.



3.3.5 RESPONSE SPECTRUM FUNCTIONS (Fonction du spectre de réponse)

La base de données du logiciel SAP 2000 contient les spectres de réponse UBC94S1, UBC94S2 et UBC94S33 définis dans le code parasismique américain (Uniform Building Code).

Pour Algérie le spectre de réponse est défini par le code parasismique RPA99.

La fonction du spectre de calcul est donnée par le système d'équations suivant :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta (1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta (1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta (1.25A) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R} \right) & T > 3.0s \end{cases}$$

Avec :

$T_1 = 0.15s$ & $T_2 = 0.3s - 0.7s$.

A : Coefficient d'accélération de zone.

R : Coefficient de comportement global de la structure.

Q : Facteur de qualité

3.3.6 RESPONSE SPECTRUM CASES (Charge dynamique spectrale)

Ce cas de charges permet de prendre en compte de la réponse modale de la structure sous un spectre de réponse appliqué à la base. Elle est basée sur la méthode de superposition modale qui est décrite par les étapes suivantes :

Formulation des équations de mouvement couplées par le calcul de la matrice de masse, de rigidité et d'amortissement.

$$[M]\ddot{\{X\}} + [C]\dot{\{X\}} + [K]\{X\} = \{p(t)\}$$

Calcul des fréquences propres et modes propres.

$$([M] - \omega^2 [K]) [A] = 0.$$

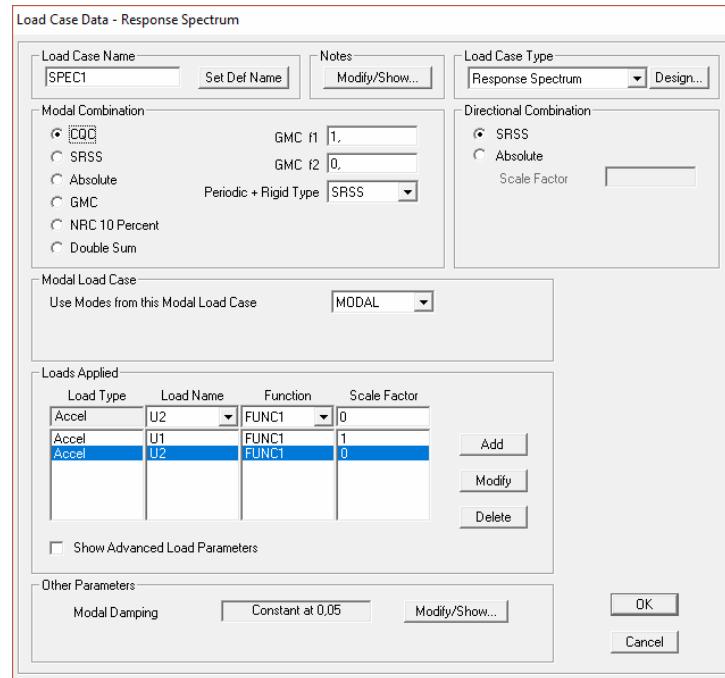
Calcul de la matrice de masse et de chargement généralisé.

Détermination des équations de mouvement découplés.

$$\bar{y}_r = 2\xi_r \omega_r \dot{y}_r + \omega_r^2 y_r = \frac{p_r}{m_r}$$

Calcul de la réponse modale.

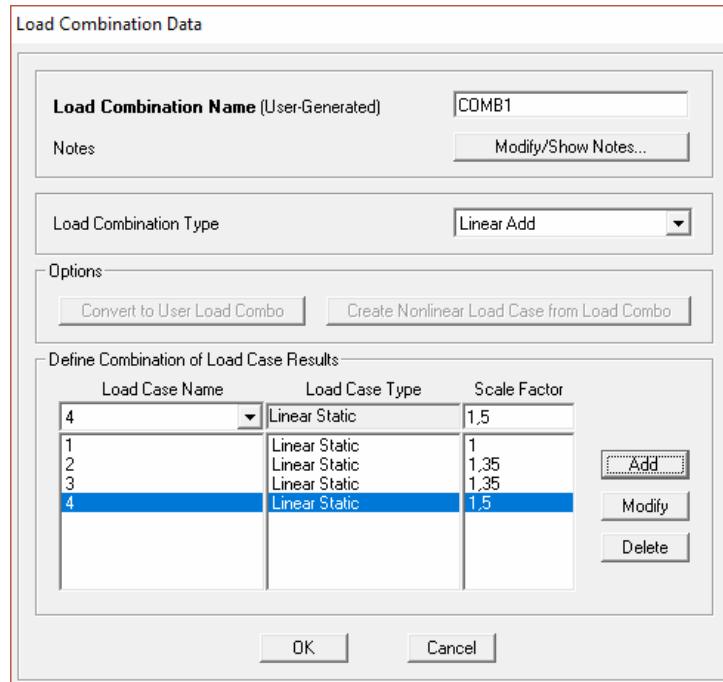
$$[x] = \sum_{i=1}^N [\phi_i] y_i$$



3.3.7 LOAD COMBINATIONS (Combinaisons des charges)

Cette instruction permette d'introduire les combinaisons de charges en multipliant chaque cas de charge par leur coefficient de majoration choisie par l'opérateur conformément aux règlements de calcul.

Ces combinaisons peuvent être spécifier pour le calcul de conception du béton armé et charpente métallique selon les codes prédéfini et sélectionnés en activant l'option *USE FOR CONCRETE (STEEL) DESIGN*



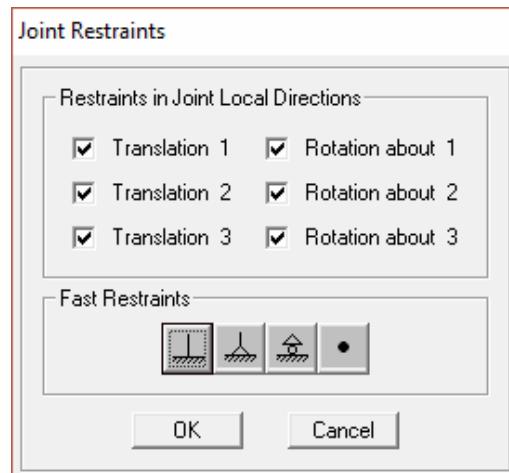
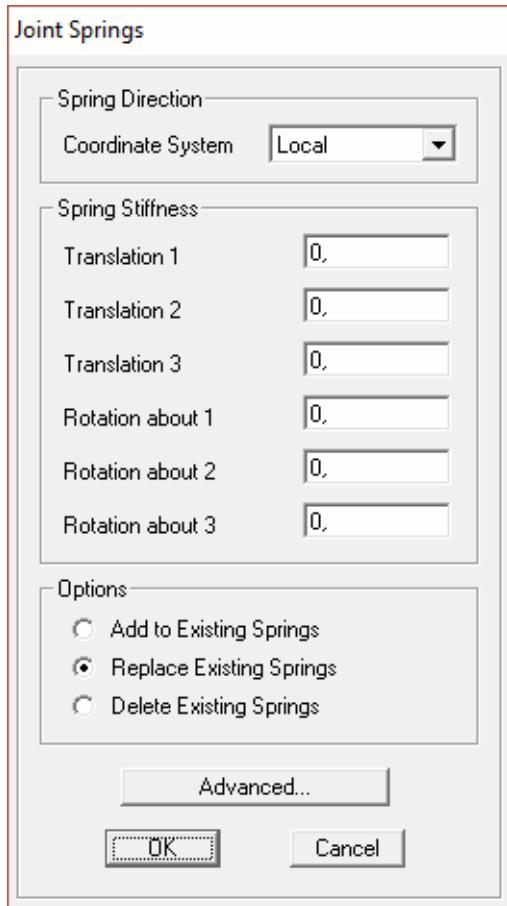
3.4 MENU « ASSING »

Les instructions de ce menu permettent de d'associer les conditions d'appuis (conditions aux limites), les valeurs de chaque cas de charge, les sections etc.

3.4.1 JOINTS (Nœuds)

3.4.1.1 RESTRAINTS (Conditions aux appuis)

Les appuis peuvent être spécifiés comme articulés, encastrés, ou comme encastrés avec certaines relaxations. Le support articulé est considéré être libéré en rotation, et bloqué en translation. Le SAP2000 permet aussi de spécifier des constantes de ressort, en translation ou en rotation, ce qui permet la définition des appuis élastiques.



3.4.1.2 SPRINGS (Appuis élastiques)

Les ressorts sont des connexions flexibles à la terre et sont toujours linéaires élastiques. Cette option nous permettre la modélisation des appuis élastiques en spécifiant la rigidité 'K' des ressorts liés a ce nœud. Ces nœuds sont considérés appuyés sur des ressorts de rigidité dans le sens de translation et de rotation.

L'affectation d'un ressort à un joint n'a de sens que si des objets structurels sont connectés au joint. Sinon, le ressort soutiendra l'air, c'est-à-dire que cela ne supportera rien. Les ressorts sont très utiles pour modéliser les appuis élastiques par exemple, la modélisation de sol, le Néoprène, etc.

3.4.1.3 MASSES (Masse)

Les masses utilisées dans le calcul dynamique de structure sont calculées par la formule $(G+\beta Q) / 9.81$ et répartissent sur les nœuds du plancher ou bien dans le centre de masse.

Dans une analyse dynamique, la masse de la structure est utilisée pour calculer les forces d'inertie.

Normalement, la masse est obtenue à partir des éléments en utilisant la masse volumique du matériau et le volume de

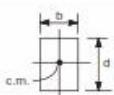
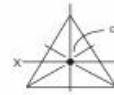
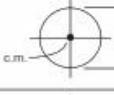
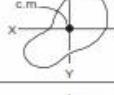
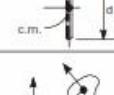
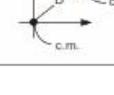
L'élément.

Cela produit automatiquement des masses concentrées au niveau des nœuds.

Les valeurs de masse d'élément sont égales pour chacun des trois directions.

Aucun moment d'inertie de masse n'est produit pour les degrés de liberté libre en rotation.

Cette approche est adéquate pour la plupart des analyses. Il est souvent nécessaire de placer d'autres masses concentrées et / ou moments d'inertie massique au niveau des articulations. Ceux-ci peuvent être appliqués à n'importe lequel des six degrés de liberté et à n'importe laquelle des articulations de la structure.

Shape in plan	Mass Moment of Inertia about vertical axis (normal to paper) through center of mass	Formula
	Rectangular diaphragm: Uniformly distributed mass per unit area Total mass of diaphragm = M (or wg)	$MMI_{cm} = M(b^2+d^2)/12$
	Triangular diaphragm: Uniformly distributed mass per unit area Total mass of diaphragm = M (or wg)	Use general diaphragm formula
	Circular diaphragm: Uniformly distributed mass per unit area Total mass of diaphragm = M (or wg)	$MMI_{cm} = \frac{Md^2}{8}$
	General diaphragm: Uniformly distributed mass per unit area Total mass of diaphragm = M (or wg) Area of diaphragm = A Moment of inertia of area about $X-X = i_x$ Moment of inertia of area about $Y-Y = i_y$	$MMI_{cm} = \frac{M(i_x+i_y)}{A}$
	Line mass: Uniformly distributed mass per unit length Total mass of line = M (or wg)	$MMI_{cm} = \frac{Md^2}{12}$
	Axis transformation for a mass: If mass is a point mass, $MMI_{lo} = 0$	$MMI_{cm} = MMI_{lo} + MD^2$

Joint Masses

Specify Joint Mass

As Mass

As Weight

As Volume and Material Property

Material

Mass Direction

Coordinate System

Mass

Local 1 Axis Direction

Local 2 Axis Direction

Local 3 Axis Direction

Mass Moment of Inertia

Rotation About Local 1 Axis

Rotation About Local 2 Axis

Rotation About Local 3 Axis

Options

Add to Existing Masses

Replace Existing Masses

Delete Existing Masses

Units

Formules pour le calcul des moments d'inerties massiques

3.4.2 FRAME

3.4.2.1 SECTIONS

Après la définition des types des sections, cette instruction consiste à spécifier le type de section pour chaque élément de la structure. Par exemple, les poteaux sont de type FSEC1, les poutres sont de type FSEC2, etc.

3.4.2.2 PRESTRESS

Les barres d'une structure peuvent être soumises à une charge de précontrainte, ce qui peut modifier la répartition des charges dans la structure. La charge de la précontrainte peut être centrée ou excentrée par rapport à l'axe moyen de la

barre. Les positions du câble sont spécifiées aux extrémités de la barre et à mi-travée. Les effets de la contrainte peuvent être transmis aux barres voisines (réactions) ou supposés que la précontrainte est déjà réalisée et n'entraîne donc pas de réactions dans la structure.

3.4.2.3 RELEASE (Libération des extrémités des éléments)

Cette instruction permettre de libérer quelque degré de liberté des nœuds pour éliminer les efforts dans un sens donné.

Par exemple, une barre du système en treillis ne permettre que l'effort normal et l'effort tranchant, donc en doit libérer la rotation des nœuds pour éliminer les moments.

3.4.3 AREA

3.4.3.1 SECTIONS

Cette commande est utilisée pour affecter les sections de plaque précédemment définies aux éléments de plaque sélectionnés. On peut ajouter, modifier ou supprimer une définition de section avant de sélectionner une section à affecter.

Une fois le choix est fait, on clique sur le bouton OK.

Les affectations seront affichées sur les membres sélectionnés sur l'écran principal. Utilisez la commande du Menu *ASSIGN > CLEAR OF ASSIGNS* pour supprimer l'affichage des affectations du modèle.

3.4.4 JOINT STATIC LOADS (Forces ou déplacements appliqués aux nœuds)

La spécification des charges consiste à traduire la nature des charges permanentes, de service ou accidentelles en un ensemble de forces, moments, déplacements ou accélérations appliqués aux nœuds des éléments. Le programme contient des outils de génération des charges qui permettent de définir sans calculs au préalable des charges telles que les différents cas de charges linéaires et surfaciques réparties, poids propre, les charges thermiques, de précontrainte, et doté aussi de générateurs de charges mobiles, du vent et sismiques.

Les charges peuvent être deux types : charges ponctuelle ou charges réparties. Les charges ponctuelles ou charges nodales sont les charges que l'utilisateur introduit explicitement sur certains nœuds du maillage, ces dernières peuvent être appliquées sous forme des forces nodales, des déplacements ou rotations des nœuds

Les charges, forces ou moments, peuvent être appliquées à n'importe quel nœud de la structure. Ces charges agissent dans les directions du système global de cordonnées. Plusieurs charges peuvent être appliquées à chaque nœud, auquel cas les charges sont additionnées à ce point.

3.4.5 FRAME STATIC LOADS (Charges appliquées sur les éléments FRAME)

Les charges appliquées sur les éléments FRAME peuvent être sous plusieurs formes dont on site :

- Charges uniformément réparties.
- Charges trapézoïdales.
- Charges ponctuelles.
- Charges de température.

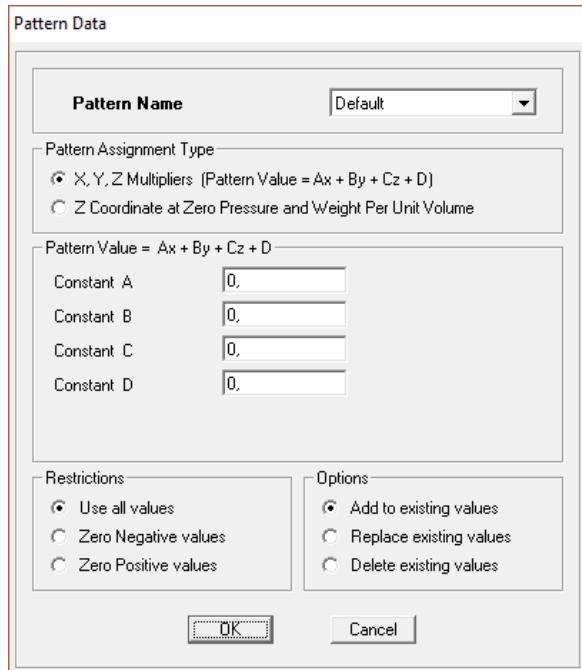
Les charges (forces ou moments) sont orientées selon les axes globaux de la structure ou aux axes locaux des éléments. Ces dernières sont spécifiées par leurs directions du chargement, points d'application pour les charges ponctuelles et trapézoïdales et ses valeurs.

Le programme calcule la contrainte axiale (allongement ou raccourcissement) due à la différence de température, en introduisant la différence de température ($T^{\circ}\text{max}$ et $T^{\circ}\text{min}$).

3.4.6 SHELL STATIC LOADS (Charges surfacique)

SAP 2000 permet de spécifier les charges surfaciques sur les éléments bidimensionnels. Le programme fourni pour cette charge d'être uniformément répartie par m^2 selon les axes locaux ou globaux.

La charge thermique peut être spécifier comme un gradient de températures entre les conditions de montage et les conditions de service, ce qui entraîne un allongement ou un raccourcissement de la barre.



3.4.7 JOINT PATTERNS (Distribution des charges quelconques aux nœuds)

Cette option permettre la transmission linéaire automatique de la résultante des charges surfaciques aux nœuds.

Ces charges sont définies par l'équation suivante :

$$P = Ax + By + Cz + D$$

3.5 MENU « ANALYZE »

La menue analyse regroupe tous les commandes de choix des options de l'analyse, le choix des cas de charges a prendre en compte et bien sûr de lancer l'analyse proprement dit.

Le SAP2000 offre plusieurs possibilités de d'analyse à savoir :

- Analyse statique linéaire
- Analyse p-delta

- Analyse statique nonlinéaire
- Analyse dynamique
- Analyse spectrale
- Analyse modale
- Analyse spectrale
- Analyse dynamique temporelle

3.5.1. ANALYSE STATIQUE LINÉAIRE

Un calcul statique linéaire permet de déterminer le champ de déplacement, les récréations aux appuis, les efforts internes aux nœuds et le champ de contraintes qui existent dans une structure soumise à divers chargements statiques plusieurs hypothèses sont faites implicitement :

- Comportement élastique linéaire des matériaux.
- Petites déformations.
- Petites rotations.

L'analyse statique linéaire est basée sur la méthode des déplacements qui consiste à satisfaire les forces d'équilibre et les comptabilités des déplacements de chaque nœud du modèle de la structure. Afin de réaliser l'analyse complète de la structure, la matrice de rigidité est obtenue par la superposition des contributions des différentes rigidités des barres et des éléments constituant la structure. Le vecteur force et composé des charges externes réparties aux nœuds de la structure. Le système d'équation à plusieurs inconnues (déplacement) ainsi obtenu est résolu en utilisant la méthode de décomposition de Cholesky qui est bien adapté pour ce type de problèmes.

3.5.2. ANALYSE P-DELTA

L'analyse P-Delta, également connue sous le nom d'analyse au second ordre, permet de prendre en compte les effets des chargements axiaux sur le comportement en flexion des éléments. SAP 2000 utilise un algorithme de calcul simple et efficace basé sur la réformation du vecteur force en fonction des déformations subies par la structure en gardant la matrice de rigidité constante. Les étapes de calcul se résument en ce qui suit :

- Calcul des déformations sous le cas de charge initial.
- Calcul des charges secondaires dus aux déplacements des nœuds associés aux efforts normaux. Ces niveaux vecteurs de charges sont ajoutés aux vecteurs de charges initiales.
- Calcul des déformations et des efforts avec la même matrice de rigidité sous l'effet du vecteur force corrigé.

Cette méthode est particulièrement utile pour la considération des effets de la gravité sur la rigidité latérale des structures, comme exigé, par certains codes.

3.5.3. ANALYSE STATIQUE NONLINEAIRE

SAP 2000 offre aussi la possibilité d'un calcul non-linéaire en tenant compte de la non linéarité géométrique. L'algorithme de cette analyse est basé sur la correction géométrique de la matrice de rigidité et du vecteur des charges en même temps.

Ce type d'analyse est généralement adapté aux structures susceptibles de se déformer d'une manière appréciable sous l'effet des charges qui leur sont appliquées.

3.6 LES ETAPES DE CALCUL :

- Les déplacements dus aux charges appliquées sont calculés.
- Des corrections basées sur la géométrie déformée sont alors apportées aux matrices de rigidité des éléments et une nouvelle matrice globale est reconstruite.
- Les vecteurs de charges sont révisés pour inclure les effets secondaires de ces déplacements.
- Le nouveau système d'équation est résolu pour donner de nouveaux déplacements.
- Les efforts sur les éléments et les réactions d'appuis sont alors calculées à partir de ces nouveaux déplacements.
- L'algorithme étant itératif, l'utilisateur peut spécifier le nombre d'itérations requis sachant que le temps d'exécution augmente avec le nombre d'itérations.

3.6.1. ANALYSE DYNAMIQUE

L'analyse dynamique disponible dans SAP 2000 comporte l'analyse modale, l'analyse spectrale et l'analyse temporelle.

3.6.2. ANALYSE MODALE

L'analyse modale permet de déterminer les modes et fréquences propres des structures.

Puisqu'il n'existe aucune force extérieure, les fréquences naturelles et les modes propres sont directement fonction de la rigidité et de la distribution des masses de la structure. Par conséquent, le résultat du calcul des fréquences et des modes propres peut varier considérablement en fonction de la modélisation des masses.

3.6.3. ANALYSE SPECTRALE

L'analyse spectrale permet de calculer la réponse sismique d'une structure en utilisant un spectre de réponse. Les réponses modales sont combinées en utilisant la méthode de la combinaison quadratique complète CQC (Complete Quadratic Combination) ou SRSS. Les résultats de l'analyse spectrale peuvent être combinés avec les résultats de l'analyse statique pour le dimensionnement de la structure. Pour prendre en compte la réversibilité des charges sismiques, les combinaisons de charges peuvent être créées en incluant les contributions du calcul sismique avec le signe -/+.

3.6.4. ANALYSE DYNAMIQUE TEMPORELLE

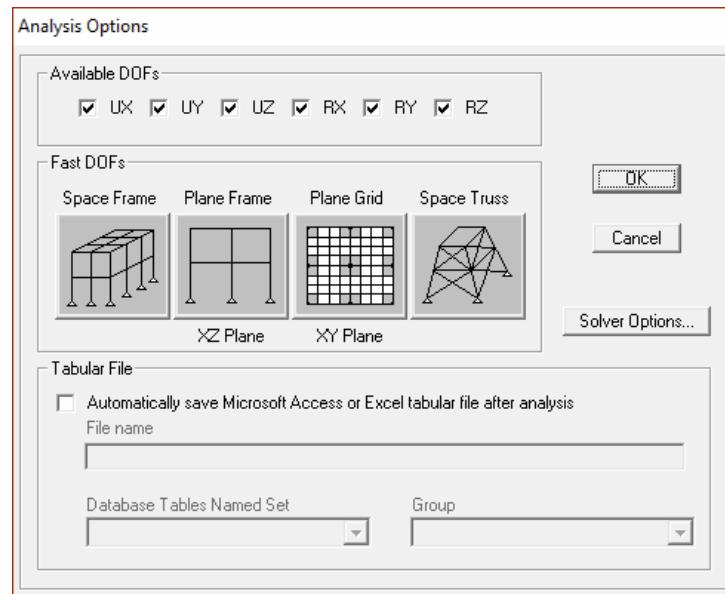
Pour des cas d'analyse où une étude dynamique temporelle déterministe est exigée, SAP 2000 offre la possibilité de calcul de la réponse d'une structure sous l'effet d'un chargement dynamique quelconque appliqué au noeud ou d'un mouvement du sol (à la base).

Le calcul est basé sur la méthode de la superposition modale, qui donne la réponse de la structure. La procédure consiste d'abord à calculer les modes et fréquences propres du système pour calculer la matrice de masse généralisée et le vecteur de chargement généralisé qui serviront par la suite pour le découplage des équations différentielles du mouvement. La réponse modale au chargement imposé est calculée par la méthode d'intégration numérique en utilisant l'algorithme de Wilson-θ avec un pas de temps constant choisi par l'utilisateur de l'ordre de $0.1T$ (T étant la période du mode le plus élevé à inclure dans la réponse).

Enfin la réponse est exprimée en fonction des coordonnées géométriques, des efforts dans les éléments et des réactions d'appuis.

3.6.5 OPTIONS DE L'ANALYSE DONNEES PAR SAP 2000

Pour l'analyse dynamique, on doit spécifier le nombre de mode à utiliser dans le calcul d'une manière on doit avoir une participation massique supérieure à 90%. Ce qui concerne l'analyse P-DELTA, on doit spécifier le nombre d'itérations et la tolérance effectuée dans le calcul des efforts et déplacements.



3.7 MENU « DISPLAY »

Le SAP 2000 facilite considérablement l'interprétation des résultats, en offrant notamment la possibilité de visualisation graphique. L'ensembles des commandes facilitant la visualisation sont grouper sous le menu *DISPLAY*.

3.7.1 SHOW LOADS

Cette instruction permette la visualisation graphique des charges et de leurs valeurs.

3.7.2 SHOW TABLES (Visualisation numérique des tableau)

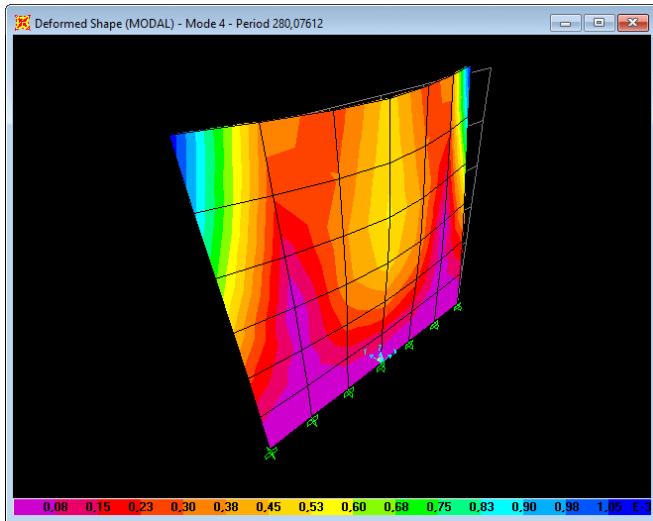
L'instruction **SHOW TABLES**, permette la visualisation numérique des valeurs introduites pour les charges et les coordonnées géométriques des différents éléments de la structure, les conditions d'appuis ainsi que tous les résultats obtenus sous formes de tableaux.

Joint Reactions												
File View Format-Filter-Sort Select Options												
Units: As Noted												
	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	StepType Text	StepNum Unitless	F1 Kip	F2 Kip	F3 Kip	M1 Kip-in	M2 Kip-in	▲	▼
	1	MODAL	LinModal	Mode	2	000000006965	162,317	-0.0000000632	-6986,961	0,00000003102		
	1	MODAL	LinModal	Mode	3	0,00005565	-305,613	0,0002293	15492,872	0,0006404		
	1	MODAL	LinModal	Mode	4	0,00002499	-365,632	0,00002027	5734,724	0,0006404		
	1	MODAL	LinModal	Mode	5	-0,0001337	691,26	-0,0001853	-25001,651	-0,000433		
	1	MODAL	LinModal	Mode	6	0,001078	1550,584	0,002211	-35045,213	0,002741		
	1	MODAL	LinModal	Mode	7	3829,404	0,0005709	13670,52	-0,013	10493,391		
	1	MODAL	LinModal	Mode	8	-0,001809	235,434	-0,003823	2563,027	-0,007386		
	1	MODAL	LinModal	Mode	9	-0,0004323	-925,791	-0,0008419	35813,332	-0,004563		
	1	MODAL	LinModal	Mode	10	0,001695	2245,711	0,002683	-60609,271	0,008389		
	1	MODAL	LinModal	Mode	11	-0,004894	1603,003	-0,001327	-18277,558	-0,028		
	1	MODAL	LinModal	Mode	12	-0,001616	2906,046	-0,001849	-59031,449	-0,004397		
▶	2	DEAD	LinStatic			1,037	0	14,168	0	3,583		
	2	MODAL	LinModal	Mode	1	-0,0000001864	33,592	0,0000004812	-4499,424	-0,0000007693		
	2	MODAL	LinModal	Mode	2	0,0000000179	125,654	-0,0000001664	-9954,572	0,00000006502		

Record:   14  of 91

3.7.3 SHOW DEFORMED SHAPE (Visualisation de la déformée du model)

Les déformations sous n'importe quel cas de charge peuvent être tracer et les valeurs des déformations aux niveaux des nœuds peuvent être affichées ou imprimées.



3.7.4 SHOW MODE SHAPE

Les déformées des modes propres peuvent être illustrées et animées pour une meilleure appréciation et contrôle des modes des structures en espace.

De nombreuses fonctions permettent la mise à l'échelle de l'image, fragmentation, zoom, l'indexation numérique, etc.

3.7.5 SHOW ELEMENT FORCES / STRESSES

Pour les éléments barres et les éléments de coques, les diagrammes des efforts tranchants, des efforts normaux ou des moments fléchissant peuvent être tracés pour la structure entière ou par élément. Pour les éléments planes ou volumiques cette commande affiche les champs ou contours des contraintes

4. MODELISATION PAR SAP2000

La modélisation sur SAP2000 consiste en les étapes suivantes :

- Entrer la géométrie du modèle à partir d'un modèle type ou on le construisant sur une page vierge (coordonnées des nœuds, connectivité des éléments ...).
- Introduisez les propriétés des éléments et les assigner aux éléments.
- Introduisez les cas de charges (statique et dynamique) et assigner ces charges aux nœuds et aux éléments.
- Introduisez les conditions aux limites (appuis, diaphragmes, ...etc).
- Lancer l'exécution du problème, apporter des corrections au modèle s'il y a lieu.
- Visualiser les résultats (à l'écran, consulter les fichiers, etc...).

5. EXEMPLES DE CALCUL

5.1. EXEMPLE DE PORTIQUE AUTOSTABLE EN B.A EN R+4

5.1.1. Description du Bâtiment

La structure étudiée est un bâtiment en béton armé à usage d'habitation implanté en zone 2.

5.1.1.1. Dimensions en Plan de la Structure

Longueur (X)	18.30 m
Largeur (Y)	08.80 m
Hauteur (Z).....	16.00 m

Charges permanentes G : Plancher terrasse G = 5.50 KN/m²

Plancher courant G = 5.00 KN/m²

Surcharges d'exploitations Q : Plancher terrasse Q = 1.00 KN/m²

Plancher courant Q = 1.50 KN/m²

5.1.1.2. Définition des Cas de Charges

G : charge permanente.

Q : charge d'exploitation.

Ex(y) : charge dynamique spectrale selon X(Y)

5.1.1.3. Définition des Combinaison de Charge

$G + Q$

$1.35 G + 1.5 Q$

$G + Q \pm E$

$G + Q \pm 1.2 E$

$0.8 G \pm E$

5.1.1.4. Calcul des Masses pour l'Analyse Modale

Les masses des planchers sont calculées comme suit : W

$= W_p + \beta W_q W_p$: poids propre $\beta = 0.2$

$Q =$ Surcharge

d'exploitation. $W = 700$ t

5.1.1.5. Calcul des Charges Statiques Équivalentes Ex1,y1 :

Les charges statiques équivalentes sont calculées selon la méthode donnée par le

RPA99 :

$$V = A D R Q W$$

où : $A = 0.15$; $D = 2.2$; $Q = 1.20$; $R = 3.5$ d'où : $V = 79.2$ t

- Distribution des Charges Statiques :

$$F_i = nV \quad F_t \quad W_i \quad H_i \quad \hat{U} \quad W_j \quad H_j \quad j =$$

$$F_1 = 208.00 \text{ KN}$$

$$F_2 = 146.85 \text{ KN}$$

$$F_3 = 144.66 \text{ KN}$$

$$F_4 = 145.02 \text{ KN}$$

$$F_5 = 147.41 \text{ KN}$$

5.1.2. Etape N°1 : Définir la Géométrie du Modèle

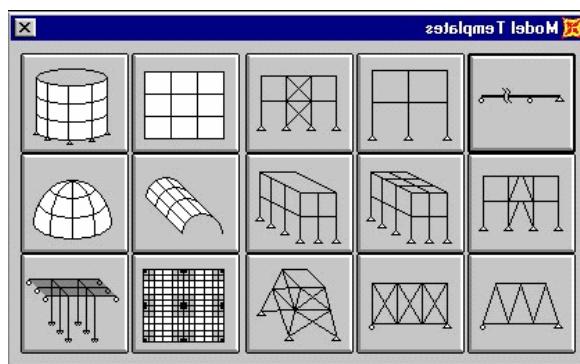
La première étape consiste à définir la géométrie de la structure à modéliser.

5.1.2.1. Choix des Unités

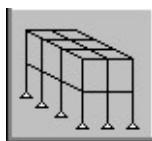
Contrairement au SAP90, vous devez choisir un système d'unités pour la saisie des données dans SAP2000. Au bas de l'écran, sélectionnez par exemple l'unité (KN.m) comme unités de base pour les forces et déplacements.

5.2.2. Géométrie de Base

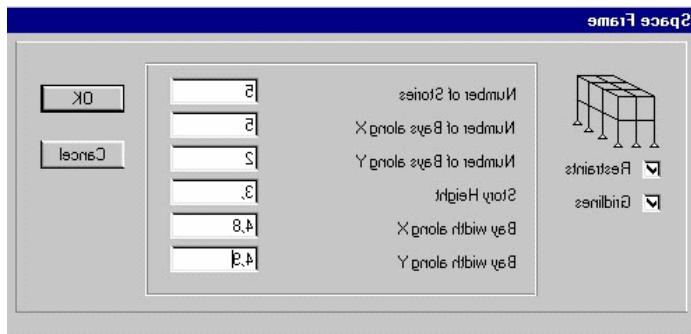
Sélectionnez **New model from template** dans le menu **File**. Cette option permet de créer rapidement un modèle "régulier", en utilisant des **templates prédéfinis**.



Comme il s'agit d'une structure tridimensionnelle, sélectionnez l'icône suivante :



Vous devez spécifier le nombre d'étages, le nombre de travées suivant X et Y, hauteur de l'étage et la largeur des travées suivant X et Y. Entrez les données précédentes, même si le bâtiment est irrégulier (les changements seront effectués plus tard). La fenêtre suivante présente les données de notre exemple.



Deux vues du modèle sont affichées (3D et 2D). Si vous maximiser une fenêtre et que le modèle n'est plus centré, cliquez sur l'icône **Restore full view** , le modèle défini ressemble à ceci :

 Sauvegarder votre modèle à l'aide du menu **File** et **Save**. Vous devez spécifier le dossier de sauvegarde et le nom du fichier. Les fichiers de données de SAP2000 ont des extensions "**SDB** ou **S2K**". Vous pouvez également cliquer sur l'icône .

5.1.2.3. Modification de la Géométrie de Base

Comme la géométrie du bâtiment n'est pas tout à fait régulière, il faut la modifier. La longueur des travées est différente. Sélectionner **Draw** et **Edit Grid**, sur la fenêtre qui apparaît sur écran, choisissez l'axe **X** et remplacer la ligne de coordonnée $X=-12$ par $X=-9.15$ en cliquant sur **Move Grid Line**. Assurez-vous que l'option **Glue Joints to Grid Lines** soit sélectionnée.

Répéter cette opération pour remplacer les autres lignes de coordonnées $-7.2, -2.4, 2.4, 7.2$ et 12 par $-6.15, -1.35, 1.35, 6.15$ et 9.15 respectivement.

Sélectionnez **OK** et reprendre cette opération pour les directions **Y** et **Z** comme suit :

Direction Y remplacer la ligne $Y=4.9$ par 3.9 , Sélectionnez **OK**.

Z ajouter $+1$ aux côtes $Z=3, 6, 9, 12$ et 15 , Sélectionnez **OK**.

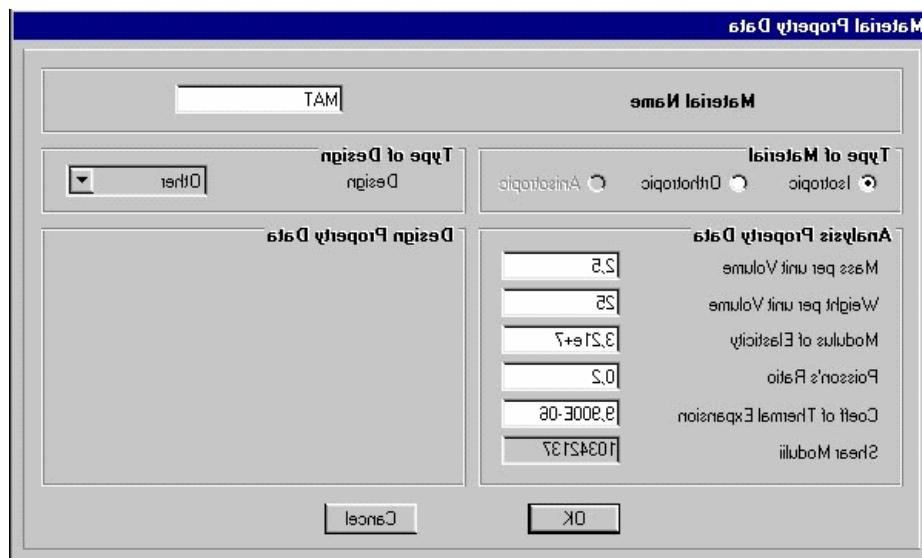
Votre modèle devrait maintenant ressembler à ceci :

5.1.3. Etape N° 2 : Spécification des Propriétés des Eléments

La deuxième étape consiste à spécifier les propriétés des éléments.

5.1.3.1. Définition du Matériaux

Selectionnez **Define** et **Materials** puis **Modify/Show Material** pour visualiser ou modifier les caractéristiques d'un matériau déjà existant dans la bibliothèque du SAP2000 ou **Define** et **Materials** puis **Add New Material** pour ajouter un nouveau matériau, dans les deux cas, la fenêtre suivante apparaît ou vous devez préciser pour le matériau le nom dans **Material Type**, le type dans **Type of Material**, la masse volumique, le poids volumique, le module d'élasticité, le coefficient de poisson et le coefficient de dilatation thermique dans **Analysis Property Data**.



Cliquez "OK" et reprendre cette opération pour définir d'autres matériaux.

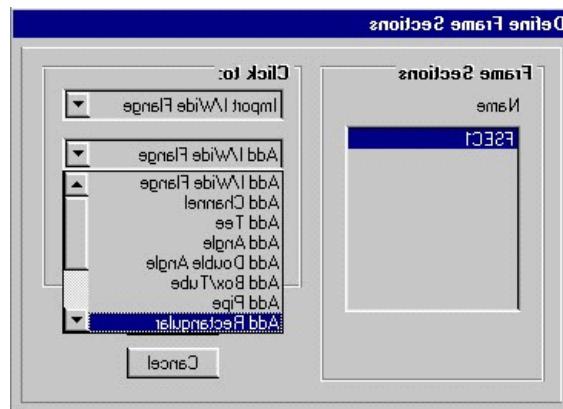
5.1.3.2. Choix des Sections

Il existe une multitude de sections prédéfinies dans SAP2000. Il est possible, par exemple, de choisir parmi une longue liste de profilés en acier contenant toutes les informations pour une section donnée (E, A, I, etc...). Pour l'exemple considéré ici, comme les sections ne sont pas standard, il faut d'abord définir les nouvelles sections pour les poutres et poteaux. Il faut ensuite les affecter aux éléments correspondants.

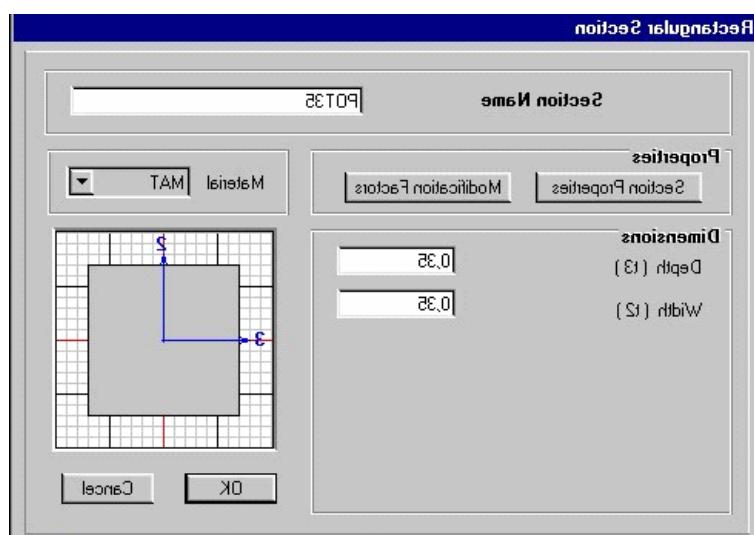
5.1.3.2.1. Définition des Sections

Selectionnez **Define** et **Frames Sections** puis **Import/Wide Flange** pour importer une section prédéfinie dans la bibliothèque du SAP2000 ou **Define** et **Frames Sections** puis **Add Rectangular** pour définir une section rectangulaire.

La fenêtre suivante apparaît, vous devez préciser pour chaque section le nom dans **Section Name**, le type du matériau dans **Material** et les dimensions (largeur et hauteur) dans **Dimensions**. Ainsi, choisissez **POT35** comme nom de section des poteaux de RDC et de 1^{er} étage de dimensions 35x35 et inscrivez les dimensions, en mètres, des deux côtés (0.35x0.35m). Sélectionnez le matériau **MAT** pour le béton.



Cliquez "OK" et répéter cette opération en choisissant comme nom de section: **POT30** pour définir la section des poteaux de dimensions 30x30, **P30** pour définir la section des poutres de dimensions 30x30, **P40X30** pour définir la section des poutres de dimensions 40x30.



Note : Cliquez sur le bouton **Section Properties** pour voir visualiser l'aire, les moments d'inerties, l'aire de cisaillement et autres propriétés calculées par SAP2000.

5.1.3.2.2 Affectation des Sections aux Eléments de Structures

Les sections POT35, POT30, P30 et P40X30 ont été définies et le matériau MAT correspond aux propriétés du béton du bâtiment considéré. Il faut maintenant affecter ces propriétés aux éléments appropriés.

Pour affecter la section POT35 aux poteaux du RDC et 1^{er} étage par exemple, présentez la structure du bâtiment dans le plan XZ ou XY sur l'une des vues du modèle affichées (3D et 2D) sur écran. Cliquez sur l'icône **Clear** dans la barre d'outils flottante pour éliminer toute sélection.

Note : Cette icône n'est active que s'il y a déjà une sélection effectuée.

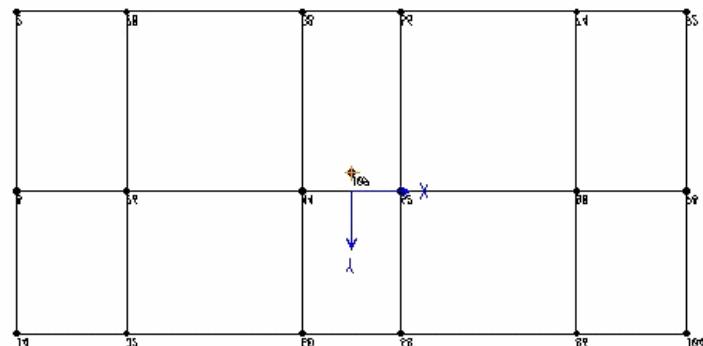
Selectionnez dans le plan choisi les poteaux concernés (poteaux 1^{er} et 2^{ème} étage) à l'aide de l'icône  dans la barre d'outils flottante. Ceci permet de tracer une ligne avec la souris et de sélectionner tous les éléments croisés par la ligne. Répéter cette opération pour les poteaux appartenant aux plans parallèles au plan choisi à l'aide des icônes   . On attribue les sections avec le menu **Assign**, puis **Frame** et **Sections**. Choisissez dans ce cas la section POT35 qui convient aux poteaux sélectionnés. En cliquant sur "OK" le nom de la section apparaîtra sur la fenêtre active. Reprendre l'opération pour tous les poteaux de la structure en choisissant les sections adéquates.

Cette opération est aussi utilisée pour attribuer les sections déjà définies aux poutres, néanmoins, pour sélectionner les poutres, on doit, cette fois-ci, représenter la structure du bâtiment dans le plan XY.

5.1.3.3. Affichage d'Information sur le Modèle

Il est possible d'afficher différentes informations (numéros de nœuds, d'éléments,...etc) sur le modèle. Cliquez sur l'icône **Set elements** choisissez les options d'affichage suivantes :

Si nous choisissons le plancher du 1^{er} étage sur l'une des deux fenêtres, le plancher affiché est comme suit :



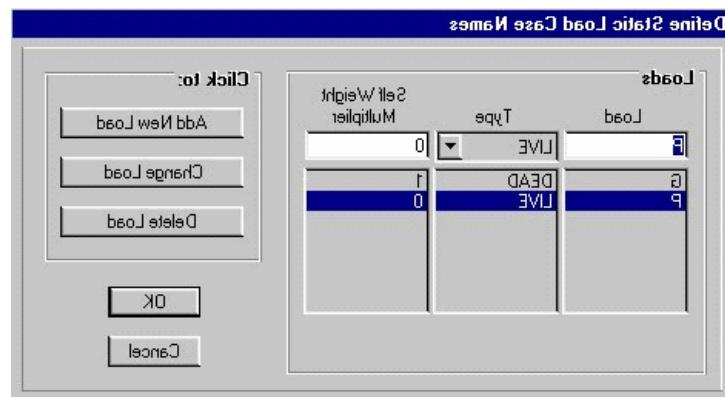
5.1.4. Etape N° 3 : Définition des Cas de Charges

Pour SAP2000, chaque cas de chargement doit être défini de façon générale. Les charges sont ensuite appliquées sur les nœuds et les éléments appropriés et associés à un cas de chargement existant. L'exemple traité ici comporte les cas de chargement suivants :

- La charge permanente **G**,
 - La surcharge d'exploitation **P**,
 - Les charges sismiques **Ex** et **Ey** dans les cas de la méthode statique équivalente,
 - Les fonctions de spectres de réponse **SPCX** et **SPCY** dans le cas de la méthode spectrale.

5.1.4.1. Cas de Charges Statiques (Permanent et d'Exploitation)

Sélectionnez **Static Load Cases** dans le menu **Define**. Cette option permet de créer les cas de chargement statique désiré.

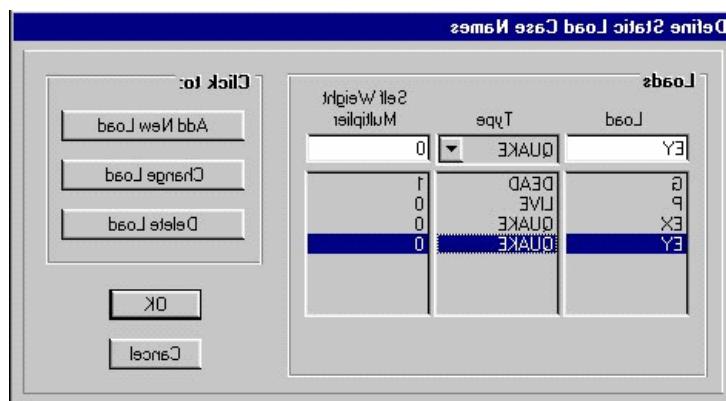


Dans le cas du chargement permanent **G** et si **Self Weight Multiplier** est pris égal à 1, le poids propre des éléments de structure sera considéré automatiquement par le logiciel dans le calcul. Dans le cas contraire, le logiciel néglige le poids propre des éléments de structures.

5.1.4.2. Cas de Charges Sismiques

5.1.4.2.1. Méthode Statique Équivalente

Si la structure répond aux spécifications de l'application de la méthode statique équivalente présentées dans le RPA99, le chargement sismique sera considéré comme une force statique appliquée aux nœuds maîtres des planchers. Ainsi, pour introduire cette force : Sélectionnez **Static Load Cases** dans le menu **Define**. Cette option permet de créer les cas de chargement statique **EX** et **EY**.

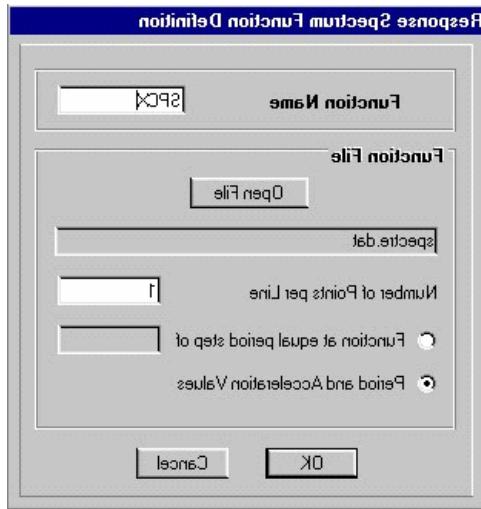


5.1.4.2.2. Méthode d'Analyse Modale Spectrale (Spectre de Réponse)

Pour charger le fichier de la fonction de spectre de réponse déjà créé et sauvegardé dans votre répertoire sous le nom de "**spectre.dat**" par exemple, en deux colonnes, une colonne des périodes et une colonne des accélérations, cliquez dans le menu **Define** puis **Response Spectrum Functions** et **Add Function from File**.

La fenêtre ci-dessous apparaît sur écran, vous devez entrez selon la direction X par exemple :

"**SPCX**" Nom de la fonction de spectre de réponse dans **Function Name**,
 "**Spectre.dat**" nom du fichier dans **Open File**,
 Sélectionnez la boîte **Period and Acceleration value**.



Cliquez "OK" et répéter les étapes de l'opération précédente pour introduire les données relatives à la direction d'excitation Y. Voir l'introduction des données sur les fenêtres suivantes :

Note : Si vous sélectionnez la boîte **Function at equal period step of**, il est nécessaire d'introduire le pas des périodes et le nombre de point par ligne dans la boîte **Number of points per line** (ces points représentent les valeurs d'accélérations par ligne dans le fichier choisi).

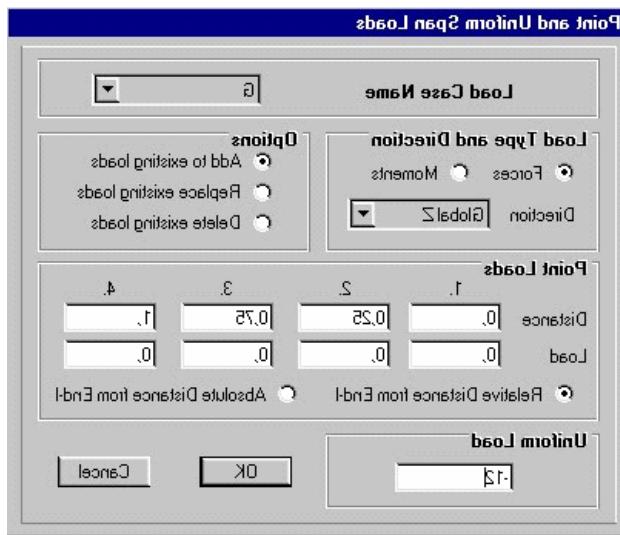
5.1.4.3. Affectation des Charges Statiques

Pour affecter les charges statiques verticales définies aux poutres, on doit d'abord présenter la structure du bâtiment dans le plan XY, le premier étage par exemple, sur l'une des vues affichées du modèle (3D et 2D) sur écran. Cliquez sur l'icône **Clear** dans la barre d'outils flottante pour éliminer toute sélection.

Sélectionnez dans le plan choisi les poutres à charger à l'aide de l'icône dans la barre d'outils flottante. Répéter cette opération pour les poutres ayant un chargement égal et appartenant aux plans supérieurs à l'aide de l'icône .

On attribue le chargement avec le menu **Assign**, puis **Frame Static Loads** et **Point and Uniform** ou **Trapezoidal** pour un chargement uniforme et concentré ou trapézoïdal respectivement.

En cliquant sur **Point and Uniform**, la fenêtre suivante apparaît, vous devez préciser le nom de cas de charge à attribuer (charge permanente **G** par exemple), le type de la charge (forces ou moments), le sens d'application de la charge et la valeur de la charge dans **Uniform Loads**.

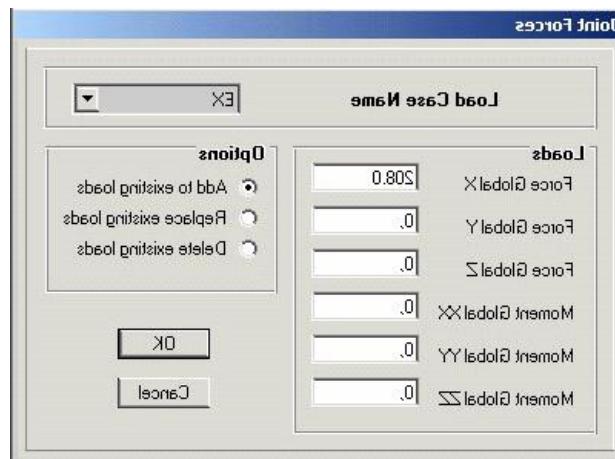


Note : Pour un chargement concentré (permanent ou d'exploitation), on doit préciser la position et la valeur de ce dernier dans **Point Loads**.

5.1.4.4. Affectation des Charges Sismiques

5.1.4.4.1. Méthode Statique Équivalente

On attribue les charges sismiques statiques équivalentes en sélectionnant le nœud maître concerné pour chaque plancher, avec le menu **Assign**, puis **Joint Static Loads** et **Forces**. Sur la fenêtre qui apparaît sur écran vous devez préciser selon la direction d'excitation **X** ou **Y** la valeur du chargement sismique.



5.1.4.4.2. Méthode d'Analyse Modale Spectrale (Spectre de Réponse)

On attribue les charges sismiques par spectre de réponse avec le menu **Define**, puis **Response Spectrum Cases** et **Add New Spectra**.

Sur la fenêtre qui apparaît sur écran, vous devez préciser selon la direction d'excitation **X** :

- "**EX**" Nom du cas de chargement par spectre de réponse dans **Spectrum Cases Name**,
- "**0**" Angle d'excitation dans **Excitation Angle**,
- "**0.07**" Amortissement dans **Damping**,
- "**SPCX**" Nom de la fonction de spectre de réponse défini précédemment et
- "**9.81**" le facteur d'échelle dans **Input Response Spectra**.

Cliquez "**OK**" et répéter les étapes de l'opération précédente pour introduire les données relatives à la direction d'excitation **Y**. Voir l'introduction des données sur les fenêtres ci-dessous.

5.1.4.5. Combinaisons d'Actions

On introduit les combinaisons d'action dans le menu **Define**, puis **Loads combinaison** et **Add New Comb**. Sur la fenêtre qui apparaît sur écran vous devez préciser pour la combinaison de l'état limite ultime par exemple ce qui suit :

- "**ELU**" Nom de la combinaison d'action dans **Load Combination Name**,
- "**ADD**" Type de la combinaison d'actions dans **Load Combination Load**,
- "**ELU**" Intitulé de la combinaison dans **Title**,
- "**1.35 et 1.5**" facteurs de pondération des cas de chargement "**G** et **P**" dans **Define Combinaison**.

Lorsque vous tapez "**OK**" le nom de la combinaison introduite apparaît dans la fenêtre **Define Load Combinations**.

Reprendre les étapes de l'opération précédente pour introduire les autres combinaisons d'actions.

Les deux fenêtres suivantes présentent l'introduction des données relatives aux combinaisons **1.35G+1.5P** et **G+P±Ey**

Note : L'instruction "**ADD**" représente la somme algébrique des actions à combiner.

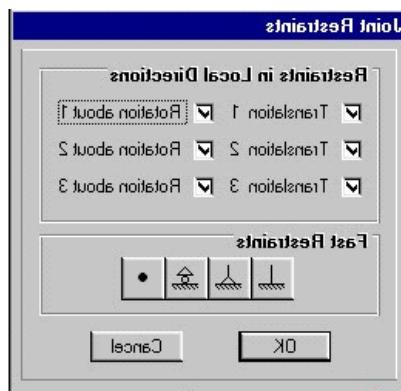
5.1.5. Etape N04 : Conditions aux Limites

Cette étape consiste à spécifier les conditions aux limites (appuis, etc...) pour la structure à modéliser.

5.1.5.1. Appuis (Restraints)

Le template utilisé a déjà placé des appuis doubles au bas de chaque poteau. Puisque dans le cas présent il s'agit d'encastrements, il faut les modifier.

Selectionnez les nœuds de la base en dessinant une fenêtre qui les englobent à l'aide de la souris dans le plan X-Y pour Z=0. On attribue des appuis (restraints) avec le menu **Assign**, puis **Joint** (nœuds) et **Restraints**. Cliquez sur l'icône qui représente un encastrement.



Ce menu peut être utilisé pour attribuer n'importe quelle combinaison de degrés de libertés à un nœud quelconque. Sauvegarder votre modèle à l'aide du menu **File** et **Save**.

5.1.5.2. Création du Nœud Maître

Dans le SAP2000, le nœud maître peut être créé avec le menu **Draw** et **Add Special Joint**. Cette opération vous permet de déplacer la souris vers la position désirée dont les coordonnées sont affichées au fur et à mesure au bas de la fenêtre représentant le plan X-Y du premier étage par exemple, une fois la position recherchée atteinte, appuyez sur le bouton gauche de la souris. Pour modifier les coordonnées de ce nœud ou d'un nœud quelconque. Il suffit de sélectionner le nœud et d'appuyer sur le bouton de droite de la souris. Une fenêtre apparaît sur votre écran et permet de modifier les coordonnées X, Y et Z, ainsi que le numéro du nœud. Répéter cette opération pour les autres étages.

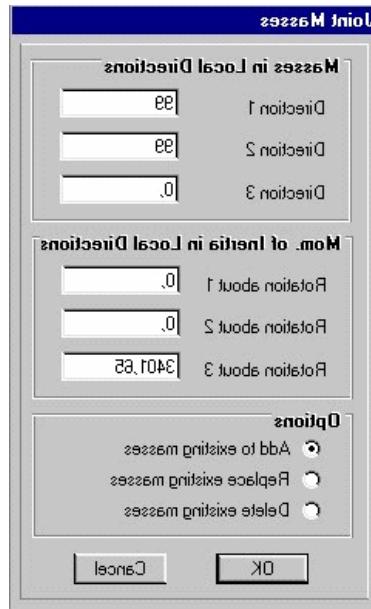
Note : La position du nœud maître représente le centre de gravité des masses plus ou moins 0.05L (L étant la dimension du plancher perpendiculaire à la direction de l'action sismique) comme stipule l'Article 4.3.7 du RPA99.

Comme il s'agit d'un plancher rigide on doit attribuer aux nœud maître de chaque plancher :

- Trois degrés de libertés : deux translations (suivant X et Y) et une rotation autour de Z. Pour cela, sélectionnez les nœuds maîtres créés en cliquant sur eux à l'aide de la souris. On attribue les *restraints* avec le menu **Assign**, puis **Joint** (nœuds) et **Restraints**. Sur la fenêtre **Joint Restraint** qui apparaît sur écran, sélectionnez la combinaison de degré de liberté suivante :



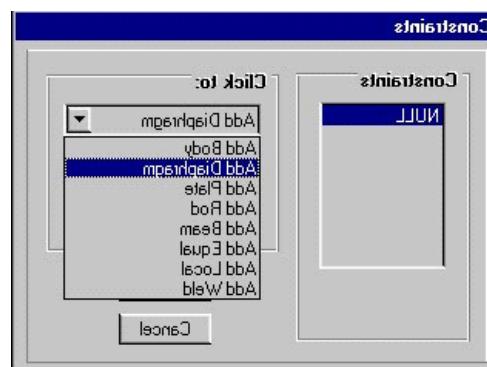
- La masse du plancher pour les degrés de translation et l'inertie massique du plancher pour le degré de rotation. Pour cela, sélectionnez les nœuds maîtres ayant les valeurs des masses et d'inertie massique en cliquant sur eux à l'aide de la souris. On attribue les *masses* avec le menu **Assign**, puis **Joint** (nœuds) et **Masses**. Sur la fenêtre **Joint Masses** qui apparaît sur votre écran, affectez les valeurs de la masse du plancher suivant les deux directions X et Y et la valeur d'inertie massique autour de l'axe Z.



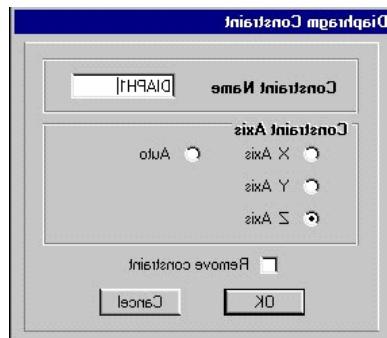
5.1.5.3. Constraints

Comme pour le SAP90, les constraints permettent de relier des degrés de libertés (DDL) d'un ou plusieurs nœuds aux degrés de liberté d'un seul nœud. Ceci a pour effet de réduire le nombre d'équations à résoudre.

Cliquez sur l'icône **Clear** dans la barre d'outils flottante pour éliminer toute sélection. Sélectionnez les nœuds du premier étage en dessinant une fenêtre qui englobe ces nœuds à l'aide de la souris. Dans SAP2000, on attribue des constraints avec le menu **Assign**, puis **Joints** et **Constraints**, sur la fenêtre **constraints** qui apparaît sur votre écran, sélectionnez **Add Diaphragm**.



Il faut attribuer un nom pour le **Add Diaphragm** assigné au premier étage et spécifier que le degré de liberté sera commun à tous les nœuds de cet étage. Choisissez **DIAPH1** comme nom et sélectionnez le DDL selon l'axe des **Z**, sur la fenêtre **diaphragm constraint** .



Cliquez sur "OK" et répétez l'opération pour tous les étages en sélectionnant un nom différent (DIAPH2, DIAPH3, DIAPH4 et DIAPH5) et toujours l'axe des **Z**.

Avant de lancer l'exécution de l'exemple de calcul, il faut spécifier que l'analyse sera effectuée en trois dimensions. Sélectionnez **Space Frame** dans le menu **Analyze**, puis **Set Analysis Options**.

Sur la même fenêtre et avant de cliquer "OK", sélectionnez **Dynamic Analysis** puis **Set Dynamic Parameters** pour fixer le nombre de mode de vibration à retenir dans **Number of modes**. Sélectionnez ensuite l'option **Generate Output** pour créer un fichier de résultats qui pourra être imprimer. Appuyer sur **Select Output Options** pour spécifier les résultats à sauvegarder sur fichiers :

Sélectionner toutes les options possibles et, dans chaque cas, appuyer sur **Select>Show Loads** pour choisir le cas de chargement ou la combinaison d'action.

5.1.6. Etape N°5 : Démarrage de l'Exécution

 L'exécution du problème peut être démarrée en sélectionnant **Analyze** et **Run Analysis**. Elle peut également être démarrée en appuyant sur

ur F5 ou bien sur l'icône . S'il y a des erreurs, vous pouvez retourner dans le module graphique et apporter les corrections nécessaires.

La prochaine étape consiste à visualiser les résultats de l'analyse.

5.1.7. Etape N°6 : Visualisation et Exploitation des Résultats

Après exécution du modèle, le SAP2000 construit trois fichiers d'extension (.OUT, .EKO et .LOG). Le fichier d'extension (**.out**) permet d'obtenir :

- La somme de la masse effective modale (> 90%) pour revoir, le cas échéant, le nombre de modes à retenir.
- L'effort tranchant sismique à la base dans le cas de la méthode modale spectrale,

Dans notre exemple :

La masse effective modale dépasse 96% de l'énergie pour cinq modes :

MODAL PARTICIPATING MASS RATIOS

MODE	PERIOD	INDIVIDUAL MODE (PERCENT)			CUMULATIVE SUM (PERCENT)		
		UX	UY	UZ	UX	UY	UZ
1	0.946236	0.0000	86.0998	0.0000	0.0000	86.0998	0.0000
2	0.762738	73.7407	0.0000	0.0000	73.7407	86.0998	0.0000
3	0.715778	13.6977	0.0000	0.0000	87.4385	86.0998	0.0000
4	0.313598	0.0000	10.3374	0.0000	87.4385	96.4372	0.000
5	0.262696	9.3352	0.0000	0.0000	<u>96.7737</u>	<u>96.4372</u>	0.0001

Ainsi, la condition du RPA99 est vérifiée pour 05 modes.

Effort tranchant sismique à la base dans le cas de la méthode modale spectrale

RESPONSE SPECTRUM BASE REACTIONS

IN RESPONSE-SPECTRUM LOCAL COORDINATES

SPEC EX -----

FOR EACH MODE, DUE TO SPECTRAL ACCELERATION IN DIRECTION U1:

MODE	F1	F2	F3	M1	M2	M3
1.	5.62E-13	1.76E-05	2.88E-09	-0.000204	5.19E-12	-7.44E-12
2.	545.154501	6.71E-06	-1.51E-06	4.10E-05	6276.546	-289.924046
3.	105.721253	1.43E-06	-2.84E-07	3.49E-06	1216.489	626.302963
4.	6.17E-10	0.000250	-2.84E-07	0.000393	-1.17E-08	-7.82E-09
5.	91.823680	-0.002457	0.000603	-0.001014	-185.593785	-28.186564
						COMBINED FOR ALL MODES

AND ALL DIRECTIONS OF SPECTRAL ACCELERATION:

F1 F2 F3 M1 M2 M3 SPEC

562.851669 0.002470 0.000603 0.001107 6396.040 690.728483

SPEC EY -----

FOR EACH MODE, DUE TO SPECTRAL ACCELERATION IN DIRECTION U2:

MODE	F1	F2	F3	M1	M2	M3
------	----	----	----	----	----	----

1.	<u>1.76E-05</u>	<u>550.940664</u>	<u>0.090182</u>	<u>-6392.060</u>	<u>0.000163</u>	<u>-0.000233</u>
2.	<u>6.71E-06</u>	<u>8.25E-14</u>	<u>-1.86E-14</u>	<u>5.04E-13</u>	<u>7.72E-05</u>	<u>-3.57E-06</u>
3.	<u>1.43E-06</u>	<u>1.94E-14</u>	<u>-3.84E-15</u>	<u>4.72E-14</u>	<u>1.65E-05</u>	<u>8.48E-06</u>
4.	<u>0.000250</u>	<u>101.680894</u>	<u>-0.115235</u>	<u>159.614135</u>	<u>-0.004747</u>	<u>-0.003173</u>
5.	<u>-0.002457</u>	<u>6.58E-08</u>	<u>-1.61E-08</u>	<u>2.71E-08</u>	<u>0.004967</u>	<u>0.000754</u>

COMBINED FOR ALL MODES AND ALL DIRECTIONS OF SPECTRAL ACCELERATION:

F1	F2	F3	M1	M2	M3	SPEC
----	----	----	----	----	----	------

<u>0.002470</u>	<u>560.245142</u>	<u>0.146328</u>	<u>6394.053</u>	<u>0.006873</u>	<u>0.003270</u>	
-----------------	-------------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	--

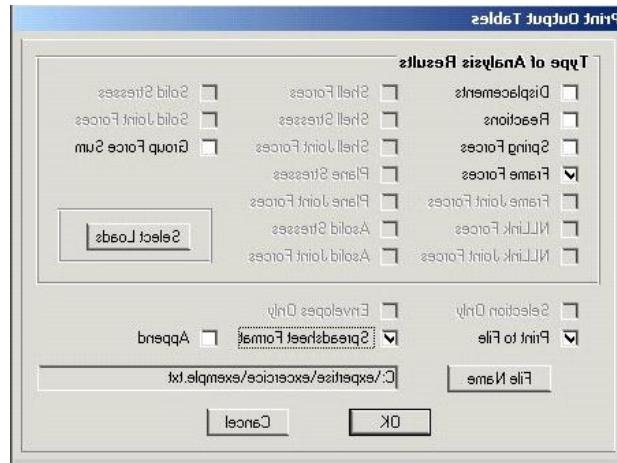
Note : En comparant l'effort tranchant à la base **Vt** obtenu par la méthode spectrale avec l'effort tranchant **Vs** déduit par la méthode statique équivalente on voit clairement que **0.8Vs** est largement supérieur à **Vt**. Ainsi, on doit majorer **Vt** par un coefficient égal à **0.8Vs/Vt** conformément à l'article 4.3.6 du RPA99.

5.1.7.1. Résultats sur Fichiers

Le menu **File**, puis **Print output tables** permet d'imprimer ou d'exporter les résultats désirés (Déplacement, Réaction, Forces internes,...) pour chaque cas de chargement et pour chaque élément sélectionné de la structure dans un fichier. Ces fichiers peuvent être exploités en les exportant vers **Excel** pour déterminer par exemple :

- Les efforts max pour le ferraillage des éléments de structures,
- Le déplacement max pour le calcul du déplacement inter-étage et le dimensionnement du joint sismique.

Par exemple pour déterminer les efforts max revenant aux poteaux de dimensions 40x40. Sélectionnez d'abord ces éléments, choisissez pour les combinaisons désirées, les résultats à imprimer sur fichier dans la boîte **Print Output Tables dans File**.

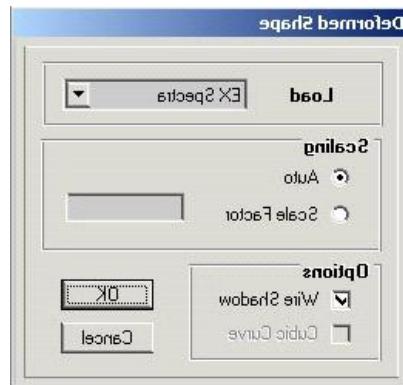


5.1.7.2. Visualisation des Résultats à l'Ecran

L'interface graphique de SAP2000 permet de visualiser les résultats sous différentes formes.

5.1.7.2.1. Déplacements

Avec le menu **Display**, il est possible de choisir **Show Deformed Shape** (ou tout simplement appuyer sur F6) pour visualiser les déplacements. Le sous-menu **Show Deformed Shape** conduit à la fenêtre ci-dessous :



Il faut spécifier le cas de chargement. L'option **Scaling** permet de spécifier un facteur de multiplication pour le déplacement ou de laisser SAP2000 en choisir un (**Auto**). L'option **Wire Shadow** permet de superposer la géométrie non déformée (en gris pâle) à la géométrie déformée.

L'option **Cubic Curve** permet d'illustrer la déformée avec une interpolation cubique tenant compte non seulement des translations mais également des rotations et donc représentative de la flexion dans les éléments. Il est possible

d'animer les déplacements. Cliquez sur **Start Animation** au bas de l'écran pour voir la structure vibrer. Pour le cas de chargement par spectres de réponse **EX** et **EY**, les formes affichées seront comme suit :

Suivant **EX**

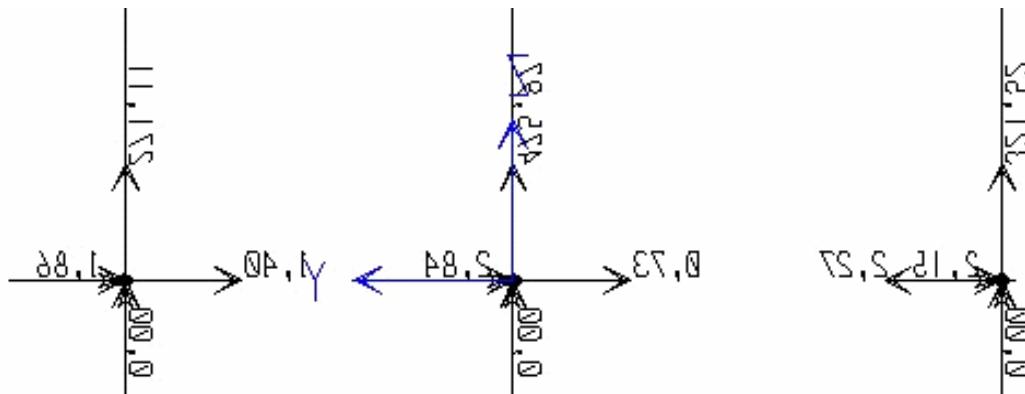
Suivant **EY**

Cette configuration nous permet de déterminer le déplacement de la structure au sommet et le déplacement inter-étages conformément au RPA99.

Les déformées modales peuvent être visualiser en sélectionnant, cette fois, la section **Show Mode Shape** dans le menu **Display**.

5.1.7.2.2. Réactions

Le menu **Display** permet d'afficher les réactions avec l'option **Show Element Forces/Stresses** et **Joints**. Sélectionnez **Reactions** et le cas de charges désiré. Les réactions seront affichées sur les appuis. Vous pouvez imprimer cette vue avec le menu **File** et **Print Graphics**.



5.1.7.2.3. Forces Internes

Le menu **Display** permet d'afficher les forces internes avec **Show Element Forces /Stresses** et **Frames**. Sélectionner sur la fenêtre qui apparaît sur votre écran la combinaison de charge et l'effort désiré dans **Load** et **component** respectivement.



L'option **Axial Force** permet d'afficher le diagramme des efforts normaux. L'option **Shear 2-2** et **3-3** permet d'afficher le diagramme des efforts tranchants dans les directions **2-2** et **3-3**. L'option **Moment 3-3** et **2-2** affiche le diagramme des moments fléchissants dans les directions **3-3** et **2-2**.

Les figures suivantes montrent la distribution de l'effort normal pour la combinaison **G+P**.

5.1.8. Démarrage d'une Autre Analyse

Lorsque l'analyse est effectuée, SAP2000 "verrouille" le modèle. Ainsi, pendant toute l'étape de visualisation des résultats, il est impossible de modifier le modèle (géométrie, connectivité, matériaux, appuis, charges, etc...). L'icône de verrouillage, dans la barre d'outils en haut de l'écran,



est enfoncée. Pour apporter des modifications au modèle, il faut le déverrouiller en cliquant sur cette icône. Dans ce cas, tous les résultats d'analyse seront détruits. Une fois déverrouillé, le modèle peut être édité et une autre analyse peut être effectuée.

5.2 EXEMPLE D'UNE STRUCTURE MIXTE EN B.A

On garde la structure de l'exemple N°1, en insérant des voiles en "L" de 1.50 m de longueur au niveau des angles du bâtiment.

5.2.1. Etape N°1 : Définition de la Géométrie du Modèle (Insertion des Voiles)

Pour insérer les voiles, on doit d'abord créer de nouveaux *Grid Lines* aux limites extérieures des voiles. Dans notre cas, les coordonnées de ces Grids sont :

Direction X : -7.65m et 7.65m

Direction Y : -3.40m et 2.40m

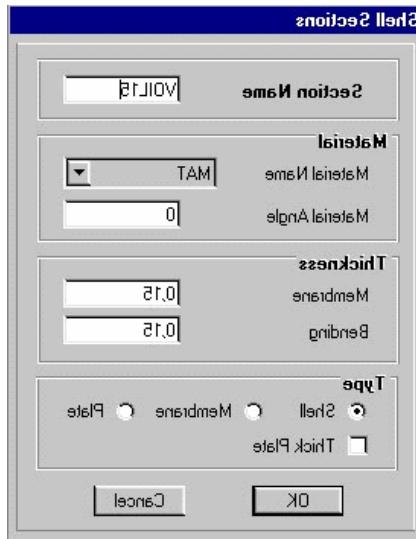
 Pour le SAP2000, l'insertion des éléments Shell peut être effectuée avec le menu **Draw**, puis **Quick Draw Rectangular Shell Element** ou en sélectionnant l'icône dans la barre d'outils flottante. Déplacez la souris vers la position désirée, une fois cette dernière est atteinte, cliquez sur le bouton gauche de la souris pour réaliser l'insertion. Répéter cette opération pour introduire les autres éléments de voiles.

Les voiles peuvent être subdivisés en sous-éléments en sélectionnant d'abords ces éléments puis dans le menu **Edit** et **Mesh Shells**, choisissez le nombre de sous-éléments désirés dans la fenêtre affichée sur votre écran.

2.2.2. Etape N°2 : Spécification des Propriétés des Eléments

Sélectionnez **Define** et **Shell Sections** puis **Add New Section**, sur la fenêtre qui apparaît sur votre écran, vous devez préciser pour chaque section le nom dans **Section Name**, le type du matériau dans **Material**, l'épaisseur dans **Membrane** et **Bending** et le type de l'élément voile dans **type**. Ainsi, choisissez **VOIL15** comme nom de section des voiles et inscrivez l'épaisseur, en mètres, 0.15 m sélectionnez **shell** dans Type et le matériau **MAT** pour le béton.

On attribue la section **VOIL15** avec le menu **Assign** puis **Shell** et **Sections** en sélectionnant tous les éléments Shell.



5.2.3. Etape N°3 : Définition des Cas de Charges

On garde les mêmes cas de charges que l'exemple précédent N°1.

5.2.4 Etape N°4 : Conditions aux Limites (Justification de l'Interaction Voiles-Portiques)

Conformément au RPA99 et afin d'assurer la compatibilité entre le portique et le voile, on doit assurer l'interaction en subdivisant les éléments frames de façon que leurs nœuds coïncident avec ceux des sous éléments de voiles créés précédemment.

Selectionnez toute la structure à l'aide de l'icône  dans la barre d'outils flottante puis avec le menu **Edit** et **Divide Frame** sélectionnez la section **Break at intersections With Selected frames and joints**.

Avant de lancer l'exécution du problème, on doit redéfinir les diaphragmes pour chaque plancher afin d'attribuer aux nouveaux nœuds découlant de l'opération de discréétisation du maillage des voiles les degrés de liberté adéquats.

5.2.5. Etape N°5 : Démarrage de l'Exécution

Après exécution du problème en appuyant sur F5 ou en sélectionnant **Analyze** et **Run Analysis**, le SAP2000 construit trois fichiers d'extension (.OUT, .EKO et .LOG). Le fichier d'extension (**.out**) permet d'obtenir.

La somme de la masse effective modale.

MODAL PARTICIPATING MASS RATIOS

MODE	PERIOD	INDIVIDUAL MODE (PERCENT)			CUMULATIVE SUM (PERCENT)		
		UX	UY	UZ	UX	UY	UZ
•	0.539353	0.0000	75.6280	0.0000	0.0000	75.6280	0.0000
•	0.443642	76.9194	0.0000	0.0000	76.9194	75.6280	0.0000
•	0.332626	0.0369	0.0000	0.0000	76.9562	75.6280	0.0000
•	0.136459	0.0000	16.9027	0.0001	76.9562	92.5307	0.0002
•	0.122132	16.4355	0.0000	0.0000	93.3917	92.5307	0.0002

La condition du RPA99 est vérifiée pour 05 modes.

Effort tranchant sismique à la base dans le cas de la méthode modale spectrale,

RESPONSE SPECTRUM BASE REACTIONS

IN RESPONSE-SPECTRUM LOCAL COORDINATES

SPEC EX -----

FOR EACH MODE, DUE TO SPECTRAL ACCELERATION IN DIRECTION U1:

MODE	F1	F2	F3	M1	M2	M3
•	6.58E-15	1.89E-06	5.99E-10	-2.30E-05	1.96E-14	-9.43E-16
•	578.827449	1.03E-05	1.61E-05	-2.79E-05	7009.463	239.975560
•	0.277385	-2.65E-07	-1.32E-07	4.44E-07	3.286352	38.874622
•	1.58E-10	0.000147	-2.53E-07	-0.000323	1.99E-10	1.77E-10
•	144.567944	-0.000527	4.77E-05	0.000809	282.439000	68.128229
						COMBINED FOR ALL MODES

AND ALL DIRECTIONS OF SPECTRAL ACCELERATION:

F1 F2 F3 M1 M2 M3 SPEC 597.832133 0.000452 5.03E-05 0.000663
7018.132 260.014146

SPEC EY -----

FOR EACH MODE, DUE TO SPECTRAL ACCELERATION IN DIRECTION U2:

MODE	F1	F2	F3	M1	M2	M3
•	1.89E-06	540.738547	0.171666	-6606.762	5.63E-06	-2.70E-07
•	1.03E-05	1.83E-13	2.86E-13	-4.97E-13	0.000125	4.27E-06
•	-2.65E-07	2.54E-13	1.27E-13	-4.24E-13	-3.14E-06	-3.72E-05
•	0.000147	137.633211	-0.235985	-301.732616	0.000185	0.000165
•	-0.000527	1.92E-09	-1.74E-10	-2.95E-09	-0.001029	-0.000248
						COMBINED FOR

ALL MODES AND ALL DIRECTIONS OF SPECTRAL ACCELERATION:

F1 F2 F3 M1 M2 M3 SPEC

0.000452 558.921944 0.290835 6615.780 0.000935 0.000200

5.2.6. Visualisation et Exploitation des Résultats

5.2.6.1. Déplacements

Les déplacements peuvent être visualisés en exécutant les opérations définies précédemment. Pour le cas de chargement par spectre de réponse dans le sens **X**, on obtient ce qui suit :

La configuration précédente nous permet de déterminer le déplacement inter-étages conformément au RPA99.

NB : Les déformées modales et les réactions peuvent être visualisées en exécutant les opérations définies précédemment.

5.2.6.2. Forces Internes

Pour déterminer les efforts revenant aux voiles et aux portiques séparément, il suffit de :

- Sélectionner les nœuds de base et les éléments voiles connectés à ces nœuds,
- Affecter un nom de groupe aux éléments sélectionnés en cliquant sur **Assign** puis **Groupe Name**,
- Visualiser les résultats en cliquant sur **Display** puis **Show Groupe Joint Force Sums**.

En exécutant ces étapes pour les voiles, on obtient, pour les cas de charges définies précédemment, la réduction des efforts suivante au centre de gravité de la section du groupe :

GROUP JOINT FORCE SUMMARY						
X-M	Y-M	X-M	Z-T	Y-T	Z-X	GROUP LOAD
0,000	0,000	0,000	-213,331	2032,482	1,158	A (Sum of X=1,04414E-16 Y=-0,41111E-16 Z=0)
0,000	0,000	0,000	-37,431	180,425	0,492E-02	B
92,982	493,401	493,401	3181,034	3,202E-03	0,173E-04	C
1,253E-03	480,008	480,008	3,100E-03	5,100E-03	1,12E-10	D
5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	E
5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	F
5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	G
5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	H
5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	I
5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	EX
5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	5,100E-03	EY

Ces efforts peuvent être imprimer sur fichier en sélectionnant dans la boite **Print Output Tables** dans **File**, les noms de groupes et les combinaisons d'actions.

5.3. EXEMPLE D'UNE STRUCTURE EN VOILES

5.3.1. Description de la Structure

5.3.2. Etape N°1 : Définition de la Géométrie du Bâtiment

Pour introduire la géométrie du bâtiment, on doit définir la boîte **Modify Grid Line** du menu **Edit Grid** et **Draw** les lignes représentant les axes des voiles et les limites des ouvertures dans les trois directions X,Y et Z.

Dans cette exemple, on a :

X	0.00	2.25	3.25	3.50	3.75	4.50	4.75	6.00	7.00	9.70	11.95	12.95	13.2	13.45	14.45	16.70
Y	0.00	3.50	3.75	4.75	5.00	9.50										
Z	0.00	2.20	3.00	5.2	6.00	8.20	9.00	11.2	12.00	14.20	15.00					



L'insertion des éléments Shell peut être effectuée avec le menu **Draw**, puis **Quick Draw Rectangular Shell Element** ou en sélectionnant l'icône dans la barre d'outils flottante. Déplacez la souris vers la position désirée, une fois cette dernière atteinte, cliquez sur le bouton gauche de la souris pour l'insertion. Répéter cette opération pour introduire les autres éléments (voiles et dalles).

5.3.3. Etape N°2 : Spécification des Propriétés des Eléments

5.3.3.1. Définition du Matériaux

Comme il s'agit d'une dalle pleine en BA, deux méthodes peuvent être utilisées pour définir les caractéristiques du matériau des éléments SHELL :

1^{ère} Méthode : Elle consiste à introduire les caractéristiques relatives au matériau béton déjà définies dans les paragraphes précédents. La masse des cloisons de séparation et des revêtements sera répartie sur les nœuds du plancher en fonction de la surface qui leur revient. Le poids des cloisons de séparation et des revêtements est considéré comme une charge répartie sur la surface des éléments dalles.

Ainsi, pour un plancher courant de 500 kg/m² et une dalle pleine en BA de 16 cm d'épaisseur, la masse à répartir sur les nœuds est égale à $500-0.16 \times 2500=100$ kg/m².

2^{ème} Méthode : Pour tenir compte de la masse des éléments de séparation et des revêtements un nouveau matériau sera défini avec une masse et un poids volumique équivalent.

Ainsi, pour un plancher courant de 500 Kg/m², on obtient pour les éléments shell (ep=16 cm) du plancher une masse volumique de 3.3125 Kg/m² et un poids de 33.125 KN/m².

5.3.3.2. Définition de la Section

Choisissons **VOIL15** et **DALLE** pour définir la section des voiles et des dalles respectivement.

5.3.4. Etape N°3 : Définition de Cas de Charges et des Combinaisons

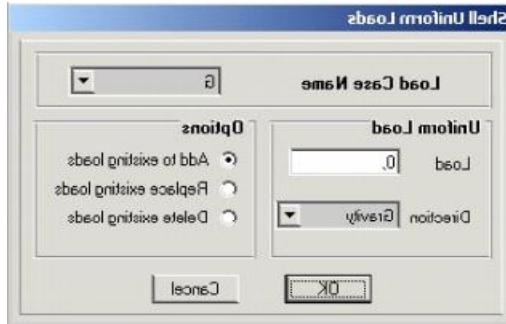
Reprendre les étapes des phases N°3 et N°4 de l'exemple N°1 pour la définition des cas de charges et des combinaisons d'actions à considérer.

Note : La combinaison G+P±1.2E est remplacée par la combinaison G+P±E conformément au RPA99.

5.3.4.1. Affectation des Cas de Charges Statiques

Dans le cas où vous utilisez la première méthode pour la définition du matériau, on doit affecter dans ce paragraphe le poids des revêtements et des cloisons de séparation comme une charge uniforme. Pour cela, on doit sélectionner dans le plan choisi XY les éléments shell à charger à l'aide de l'icône  dans la barre d'outils flottante. Répéter cette opération pour les autres éléments ayant un chargement égal.

On attribue le chargement avec le menu **Assign**, puis **Shell Static Loads** et **Uniform** pour un chargement uniforme. En cliquant sur **Uniform**, la fenêtre suivante apparaît où vous devez préciser le nom de cas de charge à attribuer dans la case **Load Case Name**, la valeur de la charge et la direction d'application de la charge dans **Uniform Load**.



Dans le cas où vous utilisez la deuxième méthode pour la définition du matériau, il suffit dans ce paragraphe d'attribuer les surcharges d'exploitation aux éléments Shell de votre plancher comme une charge uniformément répartie.

5.3.4.2. Affectation des cas de charges sismiques

Dans le cas de la méthode modale spectrale, l'affectation des charges sismiques se fait de la même manière que l'exemple N°1.

5.3.5. Etape N°4 : Conditions d'Appuis

Selectionnez les nœuds de la base en dessinant une fenêtre qui les englobe à l'aide de la souris dans le plan X-Y pour Z=0. On attribue des appuis (restraints) avec le menu **Assign**, puis **Joint** (nœuds) et **Restraints**. Dans la boîte qui apparaît cliquez sur l'icône qui représente un encastrement. Comme la masse des voiles est relativement comparable à la masse des dalles, on néglige dans cet exemple l'utilisation de **diaphragm**

5.3.6. Etape N°5 : Démarrage de l'Exécution

Avant de lancer l'exécution de l'exemple de calcul, il faut spécifier que l'analyse sera effectuée en trois dimensions. Sélectionnez **Space Frame** dans le menu **Analyze**, puis **Set Analysis Options**. Sur la même fenêtre et avant de taper "OK" sélectionnez **Dynamic Analysis** puis **Set Dynamic Parameters** pour fixer le nombre de mode de vibration à retenir dans **Number of modes**. Sélectionnez ensuite l'option **Generate Output** pour créer un fichier de résultats qui pourra être imprimer. Appuyer sur **Select Output Options** pour spécifier les résultats à sauvegarder sur fichiers.

L'exécution du problème peut être démarrée en sélectionnant **Analyze** et **Run Analysis**. Après exécution, le SAP2000 construit trois fichiers d'extension (.OUT, .EKO et .LOG). Le fichier d'extension (**.out**) permet d'obtenir :

La somme de la masse effective modale.

MODAL PARTICIPATING MASS RATIOS

MODE	PERIOD	INDIVIDUAL MODE (PERCENT)			CUMULATIVE SUM (PERCENT)		
		UX	UY	UZ	UX	UY	UZ
•	0.118868	73.0613	0.0005	0.0000	73.0613	0.0005	0.0000
•	0.110972	0.0008	67.9290	0.0242	73.0621	67.9295	0.0242
•	0.098271	6.0117	0.0001	0.0000	79.0739	67.9296	0.0242
•	0.071551	0.0000	0.0000	0.0001	79.0739	67.9296	0.0243
•	0.059253	0.0000	0.0002	0.0006	79.0739	67.9298	0.0249
•	0.058595	0.0000	0.3159	1.1897	79.0739	68.2457	1.2146
•	0.057311	0.0000	0.0000	0.0002	79.0739	68.2457	1.2148

Avec ce nombre de modes la condition 4.3.4.b du RPA99 est vérifiée.

L'effort tranchant sismique à la base dans le cas de la méthode modale spectrale,

RESPONSE SPECTRUM BASE REACTIONS

IN RESPONSE-SPECTRUM LOCAL COORDINATES

SPEC SPECX -----

FOR EACH MODE, DUE TO SPECTRAL ACCELERATION IN DIRECTION U1:

MODE	F1	F2	F3	M1	M2	M3
•	709.981764	1.810409	-0.039636	-23.255324	7765.963	-4419.216
•	0.008187	-2.340048	0.044142	28.014889	-0.281777	-19.561331
•	60.622081	0.228187	0.005883	-2.987732	666.755651	911.826414
•	0.000196	0.000289	0.000529	0.001643	-0.073200	0.050442
•	1.28E-05	0.000160	0.000294	0.001190	-0.006084	0.004320
•	1.23E-05	-0.006654	-0.012914	-0.054555	0.107826	-0.055478
•	3.80E-06	3.58E-05	8.55E-05	0.000312	0.007516	-0.003028

COMBINED FOR ALL MODES AND ALL DIRECTIONS OF SPECTRAL ACCELERATION:

F1 F2 F3 M1 M2 M3 SPEC 743.420969 0.941177 0.025958 10.974431
8133.508 4035.444

SPEC SPECY -----

FOR EACH MODE, DUE TO SPECTRAL ACCELERATION IN DIRECTION U2:

MODE	F1	F2	F3	M1	M2	M3
•	1.810409	0.004616	-0.000101	-0.059300	19.802721	-11.268725
•	-2.340048	668.879982	-12.617540	-8007.783	80.543309	5591.416
•	0.228187	0.000859	2.21E-05	-0.011246	2.509731	3.432201

- 0.000289 0.000426 0.000780 0.002421 -0.107885 0.074344
- 0.000160 0.001998 0.003674 0.014867 -0.075993 0.053953
- -0.006654 3.604251 6.994801 29.548698 -58.401972 30.048616
- 3.58E-05 0.000337 0.000805 0.002938 0.070769 -0.028513

COMBINED FOR ALL MODES AND ALL DIRECTIONS OF SPECTRAL ACCELERATION:

F1 F2 F3 M1 M2 M3 SPEC

0.941177 669.191522 13.915737 8005.463 111.943094 5586.420

5.3.7. Visualisation et Exploitation des Résultats

5.3.7.1. Déplacements

Les déplacements peuvent être visualisés en exécutant les opérations définies précédemment.

5.3.7.2. Forces Internes

Pour déterminer les efforts internes revenant aux voiles, il suffit de définir pour chaque voile un nom de groupe en cliquant sur **Assign** puis **Groupe Name**, après avoir sélectionner les nœuds de base et les éléments connectés à ces nœuds. Les résultats peuvent être visualisés en cliquant sur **Display** puis **Show Groupe Joint Force Sums** ou **imprimer** sur fichier en sélectionnant, dans la boîte **Print Output Tables** dans **File**, les noms de groupes et les combinaisons d'actions.

On peut aussi visualiser les efforts internes par mètre linéaire en cliquant sur **Shells** dans **Show Element/Forces stresses** dans le menu **Display**. Dans le cas de notre exemple, on représente sur la figure ci-dessous la distribution de l'effort interne F11 par mètre linéaire affichée par SAP2000.