

Structure

Manuel du logiciel Structure

Programme de calcul de structures de Génie Civil

Logiciel **STRUCTURE** version 2.0

1.	Objet et présentation du logiciel.....	4
1.1.	Présentation	4
1.2.	Objet.....	4
1.3.	Implantation	4
2.	Limites du logiciel	5
3.	Hypothèses de calcul	5
4.	Quelques rappels de modélisations	5
4.1.	Définitions d'ossatures	5
4.2.	Référentiel	5
4.2.1.	Repère global	6
4.2.2.	Repère local.....	6
4.2.3.	Repère utilisateur.....	8
4.3.	Nœuds	8
4.4.	Eléments.....	8
4.5.	Appuis	8
5.	Structure générale d'un fichier de données	10
5.1.	Fichier de données.....	10
6.	5-2 – Données relatives à la géométrie et aux conditions cinématiques aux limites de la structure.....	13
	5-2-1 Caractéristiques des matériaux (Obligatoire)	13
	5-2-1-1 Caractéristiques physiques des matériaux	14
	5-2-1-1 Caractéristiques géométriques des sections.....	15
	5-2 – Chargements	17
	5-2-1 Déclaration de charges réparties (pression)	17
V	Génération automatique de structures	18
	5-1 – Généralités	19
	5-2 – Modélisation de charges de vent	19
	5-2 – Génération automatique de portiques métalliques	19
V	Calcul	21
	5-1 – Méthodes de calcul	21
	5-1-1 Calcul statique linéaire	21
	5-1-2 Calcul statique non linéaire	21
	5-1-2-1 Analyse statique non linéaire de portiques en béton armé	21
	5-1-2-2 Analyse statique non linéaire incrémentale	24
	5-1-3 Calcul dynamique linéaire	25
	5-3 – Déroulement du calcul d'analyse de structure	25
	5-4 – Vérification de portiques métalliques suivant l'Eurocode 3	25
VI	Organisation du logiciel.....	26
	6-1 – Organisation générale	26
	6-2 – Modules	27
	6-3 – Feuilles.....	28
VII	Générations automatiques.....	28
	7-1 – Générations automatiques de portiques métalliques	28
VIII	Exemples d'utilisation du logiciel	28
	8-1 – Exemples ICAB SSL	28
	7-2 – Exemples tirés de la littérature.....	28
	7-2-1 – Passerelle Hermes.....	28
	7-2-2 – Tour Hermes	29
	7-2-3 – Exemple TANGO	29

7-2-4 – Exemple de calcul de treillis plan.....	29
7-2-5 – Exemple de calcul d'une poutre continue.....	29
7-2-6 – Exemple de calcul d'un portique en analyse non linéaire suivant la méthode de Coin	29
7-2-7 – Exemple de calcul d'un treillis spatial.....	29
VIII – ANNEXES	29
8-1 Glossaire des variables.....	29
8-1-1 Classement par feuilles de données	29
Variables publiques à l'ensemble du logiciel.....	30
Caractéristiques générales des matériaux (acier, béton, bois, etc.)	30
Caractéristiques mécaniques des éléments et des nœuds de la structure	30
Charges et combinaison :	31
Affichage des résultats du calcul statique	32
Variables générales pour le calcul dynamique :	33
Variables générales pour le calcul non linéaire :	34
Feuille Lecture	34
Feuille Génération automatique de portique métallique.....	35
Neige :	36
Vent :	37
Module convertisseur	38
Feuille Eurocode	38
8-1-2 Classement par ordre alphabétique	38

1. Objet et présentation du logiciel

1.1. Présentation

Le logiciel Structure® permet le calcul de structures à barres et poutres en espace plan (2D) ou tridimensionnel (3D) suivant la méthode des matrices de rigidité. Les ossatures calculées représentent des :

- Treillis plans ou spatiaux
- Portiques plans ou spatiaux y compris les grillages de poutres

Le but de ce logiciel est pédagogique et toute utilisation à titre professionnel ne saurait engager la responsabilité de l'auteur. Aucune garantie ne peut être donnée sur les performances de ce logiciel. Il appartient à l'utilisateur de le tester et de valider les résultats obtenus.

1.2. Objet

Structure® traite les ossatures modélisées par un ensemble de nœuds reliés entre eux par des éléments barres ou poutres. Suivant les termes usuellement adoptés dans la méthode de calcul aux éléments fins, une barre est un élément linéaire soumis uniquement à des efforts axiaux (compression ou traction) alors que les poutres sont soumises aux efforts normaux, tranchants et de moments.

Les nœuds et éléments peuvent être de divers types :

- Encastrés
- Articulés
- Relâchés en rotation et/ou en translation
- Appuis élastiques

La structure modélisée peut être étudiée sous plusieurs types de chargement. Outre la génération automatique du poids propre, le logiciel peut prendre en compte :

Des forces et couples sur les nœuds

Des charges ponctuelles, réparties, trapézoïdales ou projetées sur les éléments

Les charges indiquées ci-avant constitue les cas de charges élémentaires. Ils peuvent faire l'objet de combinaisons suivant les desiderata de l'utilisateur.

Les éléments de structure peuvent être de n'importe quel type (rond, carré, I, Té, etc. ...) sous réserve que soit renseignés les caractéristiques géométriques de la section.

Pour les profilés métalliques, le logiciel s'appuie sur la base de profil ARBED 2006. Le fichier Excel® est fourni avec le programme.

Le logiciel assure l'analyse linéaire statique ou dynamique de la structure. Il détermine :

- les efforts dans chaque barre ou poutre au niveau des nœuds
- les déplacements des nœuds
- les réactions d'appuis

Enfin, le logiciel comporte un générateur de structures paramétrées. Ce module permet de rentrer simplement et plus rapidement une structure type comme des portiques métalliques par exemple. Il permet aussi la vérification automatique de la structure suivant le code de calcul réglementaire. Ainsi, la version 2 du logiciel Structure® assure la vérification des profilés de portiques métalliques suivant l'Eurocode 3 avec prise en compte de l'EN1990 pour la détermination des combinaisons et de l'EN 1991 pour la détermination des charges (neige et vent).

1.3. Implantation

Ce logiciel est écrit sous Visual Basic 2005®. Son code est éditable sous Visual Studio 2005 quelque soit la version (Express ou autre) et sur les versions suivantes.

Le programme fonctionne sous système d'exploitation Windows XP® quelque soit le service pack. Pensez toutefois, que VS 2005 ne tourne que sous XP SP2.

Le logiciel n'a pas été testé sous Windows vista ou Windows 7.

2. Limites du logiciel

Il serait trop long et fastidieux d'énumérer ici toutes les limitations du logiciel.

Sachez que ce logiciel ne permet pas :

- le calcul de structures autres que celles indiquées au chapitre I
- le calcul avec prise en compte de la plasticité., écrouissage, etc. ...

Ce logiciel est compatible avec les fichiers de données Robot® version 3.0 avec certaines limitations (voir chapitre **Structure générale d'un fichier de données**)

Le nombre de charges linéaires sur l'élément I pour le cas J est limité à 10. Si vous avez plus de 10 charges linéaires appliquées sur le même élément et pour le même cas de charges, il vous faudra créer un autre cas de charge. Par le biais des combinaisons, il vous faudra additionner ces 2 cas de charges pour obtenir votre modélisation correspondante. Cette méthode permet de s'affranchir des limites imposées au logiciel. Une autre méthode consiste à redécouper l'élément en plusieurs parties. Maintenant, entre-nous, je serais curieux de voir une modélisation imposant plus 10 charges linéaires sur un même élément et pour un même cas de charge. A titre personnel, cela ne m'est jamais arrivé.

3. Hypothèses de calcul

- Matériaux linéaires et isotropes.
- Calcul en élasticité uniquement.
- Petites déformations - Petits déplacements.
- Eléments poutre de type Navier - Bernouilli.
- Eléments linéaires droits ou avec grand rayon de courbure afin que les effets de torsion restent négligeables.

La structure doit être convenablement appuyée sinon il va se produire une erreur de calcul (apparition d'un zéro sur un pivot de la matrice de rigidité) ou le cumul des réactions d'appui sera supérieur de 5% au cumul des actions sur la structure. Ce point doit toujours être vérifié pour valider le calcul.

4. Quelques rappels de modélisations

4.1. Définitions d'ossatures

Les treillis plans : il s'agit de structures constituées de réseaux plans de barres articulées, chargées dans leur plan. Les barres ne peuvent être soumises qu'à des efforts normaux et ne peuvent, en aucun cas, être soumises à des moments de flexion ou de torsion. Exemple de structure: fermettes de toiture.

Les portiques plans : il s'agit de structures constituées de réseaux plans de poutres chargées dans leur plan. Exemple de structure : portique plan de hangar agricole.

Les treillis spatiaux : il s'agit de structures constituées de réseaux spatiaux de barres articulées. Les barres ne peuvent être soumises qu'à des efforts normaux et ne peuvent, en aucun cas, être soumises à des moments de flexion ou de torsion. Exemple de structure: pylône électrique

Les portiques spatiaux : il s'agit de structures constituées de réseaux spatiaux de poutres. Les portiques spatiaux comprennent les grillages de poutres (plancher caisson par exemple). Exemple de structure :

4.2. Référentiel

4.2.1. Repère global

En espace plan ou 2D, le référentiel global ou général est le repère galiléen orthonormé direct OXY avec OY vecteur vertical positif dans le sens opposé à la gravitation. Une force de gravité comme le poids sera donc toujours indiqué négativement dans le repère global de la structure.

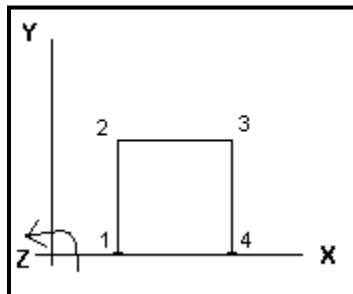


Figure 4.2.1-1 – Repère global

Structure plane dans plan XOY, axe Z perpendiculaire au plan.
Y sens vertical positif, force de gravité suivant Y négatif

En espace 3D, le référentiel est le repère galiléen orthonormé direct OXYZ avec OZ vecteur vertical positif dans le sens opposé à la gravitation. Une force de gravité comme le poids sera donc toujours indiqué négativement dans le repère global de la structure.

Cette convention s'applique aussi pour les grillages de poutres. Ainsi, la structure se situe dans le plan XOY. L'axe Z, selon lequel sont appliqués les chargements, est alors vertical et perpendiculaire au plan de grillage. Par conséquent, les nœuds sont repérés par les coordonnées X et Y.

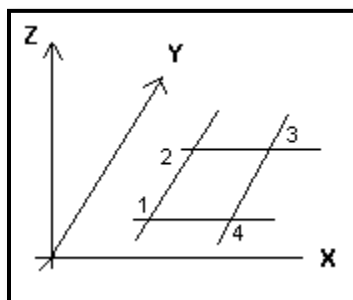


Figure 4.2.1-2 - Repère global sur grillage de poutre

Grillage de poutres dans plan XOY
Axe Z vertical

Le portique spatial applique la même convention, voir Figure 4.2.2-3 Repère local et structure spatiale dans la suite du document.

4.2.2. Repère local

Quelque soit l'option de calcul choisie (treillis, portique, etc. ...), le repère local est propre à l'élément. Il y aura donc un repère local par élément. C'est dans ce repère que le logiciel applique les caractéristiques géométriques et les chargements.

Axe **x** local : est toujours l'axe longitudinal de l'élément orienté du nœud origine (qui est aussi l'origine du repère local) vers le nœud extrémité.

Exemple : si dans le fichier descriptif de la structure est écrit

Element
3 6 7

Cela signifie que le repère local de l'élément 3 va du nœud origine 6 vers le nœud extrémité 7, le nœud 6 est l'origine du repère local. L'axe **y** se déduit automatiquement car il forme un repère orthonormé direct avec l'axe **x**.

Axe **y** local : forme toujours un repère orthonormé direct avec le **x** local, c.a.d on passe de **x** à **y** dans le sens inverse des aiguilles d'une montre ou dans le sens positif trigonométrique.

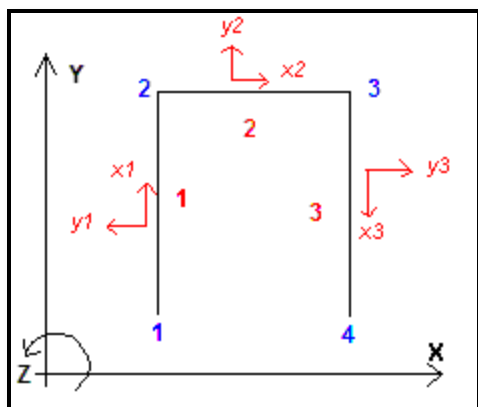


Figure 4.2.2-1 Repère local structure plane

Représentation des repères locaux pour l'élément 1 = **x1y1**, repère local élément 2 = **x2y2** et repère local élément 3 = **x3y3**

Repère global : **XYZ**

Axe Z global : perpendiculaire au plan de la structure. Le chargement étant dans le plan XOY, Z est l'axe de flexion.

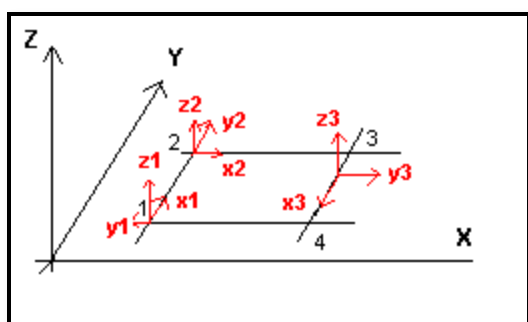


Figure 4.2.2-2 Repère local grillage de poutre

Représentation des repères locaux pour l'élément 1 = **x1y1z1**, repère local élément 2 = **x2y2z2** et repère local élément 3 = **x3y3z3**

Repère global : **XYZ**

Axe Z global : perpendiculaire au plan de la structure. Le chargement est dans le plan XOZ. Le trièdre OXYZ est direct.

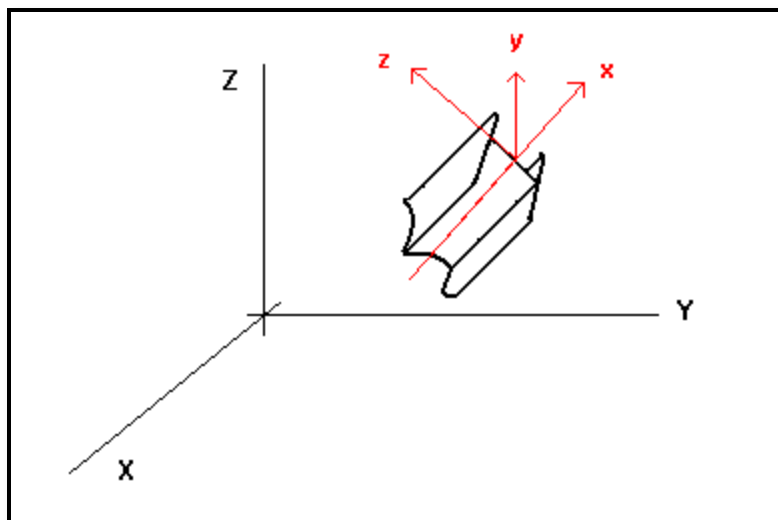


Figure 4.2.2-3 Repère local et structure spatiale

Repère global : **OXYZ**

Repère local : **oxyz**

Le repère local est toujours lié à l'élément avec l'axe x concourant au sens de parcours de l'élément.

Le logiciel Structure impose que :
Les axes du repère local y et z soient les axes principaux d'inertie du profilé.
La position de ces axes doit être définie par un angle Gamma (3ième angle d'Euler), qui représente la rotation de l'élément autour de l'axe local x.

Attention : il est important de remarquer que les axes Y et Z n'ont pas les mêmes implantations selon qu'il s'agit de structures planes, spatiales ou de grillage de poutre.

Pour les treillis plans ou spatiaux, chargés nodalement, l'orientation des axes Y et Z n'a pas d'importance. En effet, seuls les efforts axiaux sont pris en considération.

Lorsque vous faites appel à la bibliothèque de profilés ARBED, le logiciel positionne automatiquement les profilés comme suit :

- Portique plan : l'axe local **z** constitue l'axe d'inertie principale la plus grande. De cette façon, le profilé travaille toujours selon son plus grand moment d'inertie. Pour positionner un profilé « à plat », il faut déclarer $\gamma=90$ dans la partie des caractéristiques mécaniques.
- Grillage de poutre : l'axe local **y** constitue l'axe d'inertie principale la plus grande. De cette façon, le profilé travaille toujours selon son plus grand moment d'inertie. Pour positionner un profilé « à plat », il faut déclarer $\gamma=90$ dans la partie des caractéristiques mécaniques.
- Portique spatial : l'axe local **y** constitue l'axe d'inertie principale la plus grande (voir Figure 4.2.2-3 Repère local et structure spatiale) De cette façon, le profilé travaille toujours selon son plus grand moment d'inertie. Pour positionner un profilé « à plat », il faut déclarer $\gamma=90$ dans la partie des caractéristiques mécaniques

4.2.3. Repère utilisateur

Cette version ne permet l'utilisation d'un repère utilisateur.

4.3. Nœuds

Les coordonnées des nœuds sont cartésiennes. Ainsi, le nœud n1 est défini :

- en espace plan : par ses coordonnées x et y
- en espace spatial (3D) : par ses coordonnées x, y et z.

Les coordonnées des nœuds sont toujours définis par rapport au repère global.

4.4. Eléments

L'élément de base de la structure est la barre ou la poutre. Il faut donc que votre structure soit décomposable en ce type d'élément. Les éléments de type coques, plaques ou membrane ne sont pas pris en charge.

Les structures de type treillis plan ou treillis spatial sont décomposées en éléments barres. Ces éléments ne fonctionnent qu'en compression ou en traction (effort normal exclusivement), les extrémités des barres sont des rotules, l'élément barre n'est soumis à aucune flexion et les charges pour ce type de structures s'appliquent exclusivement aux nœuds.

Les structures de type portique plan ou spatial sont décomposées en éléments poutre. Cet élément prend en charge les efforts normaux, tranchants, torsionnel (en 3D) et de flexions. Pour des raisons de facilités de codage, l'élément poutre est considéré encasté à ses deux extrémités si l'utilisateur n'indique aucune spécification particulière. Les relaxations aux extrémités de l'élément Poutre doivent être explicitement renseignées. Cette version logicielle ne prend en compte que 4 types d'éléments poutre : bi-encasté, encasté-articulé, articulé-encasté et articulé-articulé. Le logiciel ne prend pas en compte les semi-encastrement ou les articulations semi-rigides (comme maintenant autorisé par l'Eurocode3).

Si un appui est déclaré articulé et qu'un seul élément aboutisse sur cet appui, le logiciel modélisera automatiquement l'élément comme articulé sur cet appui sans nécessité de déclaration explicite de la part de l'utilisateur. Par contre, si plusieurs éléments aboutissent sur ce même nœud, l'utilisateur doit alors spécifier si l'élément est articulé sinon il sera considéré encasté vis à vis des autres éléments, c'est le principe de la poutre continue sur plusieurs appuis par exemple.

4.5. Appuis

Les appuis de la structure peuvent être modélisées libres, articulés, encasté ou appuyés élastiquement.

Un appui est toujours un nœud.

Sans spécification particulière, l'appui est considéré par le logiciel comme encasté. Pour autoriser le déplacement de l'appui suivant une direction, il faut alors libérer le degré de liberté (ddl) correspondant et l'indiquer dans la déclaration de l'appui.

Exemple en 2D d'un appui libre de se déplacer suivant X, appuyé élastiquement suivant Y et encastré en Z:
appui

$U_x k_y = 20000$

Ce qui signifie :

Déclaration de la procédure appui par le mot clé appui
est le numéro du nœud appui

U_x signifie que l'appui est libre de se déplacer suivant X

K_y signifie que l'appui est appuyé élastiquement suivant Y avec une valeur du module de raideur de l'appui égale à 20000 daN/M suivant la direction Y. Attention que cette valeur soit homogène aux valeurs numériques déclarées précédemment. Dans notre exemple, les coordonnées ont été renseignées en mètre et les forces appliquées en daN, le module de raideur sera donc renseigné en daN/m.

Vérifiez toujours qu'1 ddl suivant X et 1 ddl suivant Y soient bloqués au niveau de vos appuis en espace 2D (et 1ddl suivant Z en espace 3D) sinon votre structure va se transformer en mécanisme et une erreur va se produire au moment du calcul de la matrice de rigidité. Vos résultats ne seront pas exacts.

4.6. Efforts

Les efforts sont déterminés par le logiciel aux nœuds origine et extrémité de l'élément tels qu'ils ont été définis dans le fichier descriptif de la structure. Ces efforts sont appelés par convention, efforts nodaux et sont toujours définis dans le repère local de l'élément.

La convention suivante s'applique :

- Efforts tranchants T_y et T_z et effort normal N_x :
 - Positifs s'ils sont dirigés dans le sens positif des axes correspondants,
 - Et négatifs dans le sens contraire.
- Moments fléchissants M_y et M_z et de torsion M_x :
 - Positifs s'ils agissent dans le sens des aiguilles d'une montre, pour un observateur qui regarde dans le sens positif des axes, ou d'une autre manière, par application de la règle du tire-bouchon (main droite).
 - Et négatifs dans le sens contraire.

Il convient de remarquer que la convention de signe sur les efforts axiaux engendre la propriété suivante :

- $F_x > 0$ sur nœud origine et $F_x < 0$ sur extrémité : barre en compression
- $F_x < 0$ sur nœud origine et $F_x > 0$ sur extrémité : barre en traction

Cette propriété s'applique à tous les types de structure.

A titre d'illustration, les efforts nodaux positifs sont illustrés sur les figures ci après () pour les portiques plans et spatiaux. Pour les treillis, le problème ne se pose pas car ces derniers ne sont soumis qu'à des efforts axiaux.

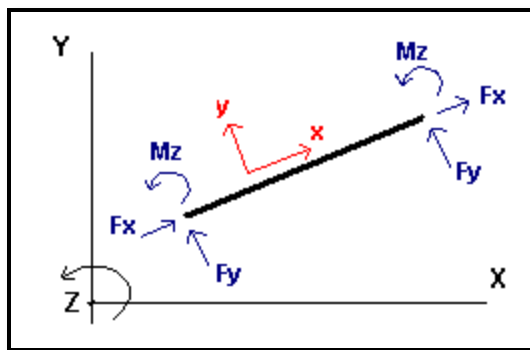


Figure 4.2.3-1- Sens positifs des efforts nodaux – Portique plan

La figure ci-contre illustre la propriété évoqué ci-avant, barre en compression si $F_x > 0$ sur nœud origine et $F_x < 0$ sur extrémité, ou en traction si inversement.

Autre propriété intéressante pour les portiques plans :

- Si $M_z < 0$ au nœud origine et $M_z > 0$ au nœud, la fibre comprimée se trouve en partie haute de la poutre et la fibre tendue en partie basse.
- Et inversement, ...

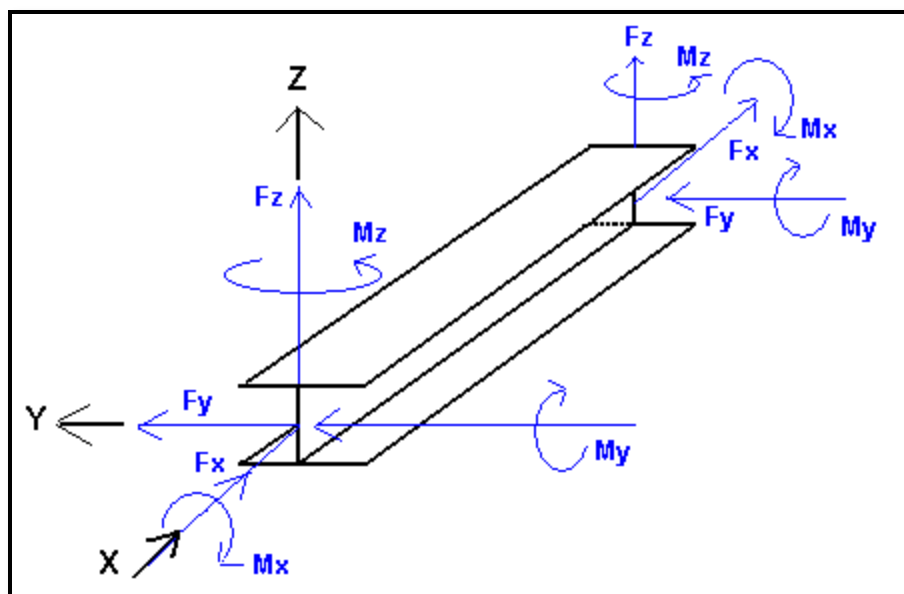


Figure 4.2.3-2 - Sens positifs des efforts nodaux – Portique

5. Structure générale d'un fichier de données

5.1. Rappel des limitations du fichier de données

Les fichiers de données décrivant la structure à calculer, les charges qui lui sont appliquées ainsi que le mode d'analyse demandée doivent être compatibles avec la version 3.0 de Robot®. Toutefois, certaines fonctionnalités ne sont pas prises en compte :

- Coordonnées des nœuds en repère cartésien uniquement
- Pas de génération ni de translation
- Une charge répartie et une charge ponctuelle par nœud et par élément
- Pas de prise en compte des angles Alpha et Beta, seul l'angle Gamma est pris en compte.
- Les couples ne sont pas pris en compte
- Pas de prise en compte des effets de la température
- Profils limités à ceux disponibles dans le fichier Excel
- Inertie variable uniquement sur les profils en I et limité à la variation de hauteur
- Les matériaux autres que l'acier et le béton devront être renseignés dans le fichier.
- Les mots-clés Coordonnées et Référentiel ne sont pas pris en charge
- Coordonnées des nœuds en repère global uniquement
- Les rotations élastiques ne sont pas prises en charges

Si vous voulez que ce logiciel soit compatible avec d'autre fichier de données (par exemple Tango ou Cosmos du CACT), merci de m'en adresser les spécifications. Vous trouverez mon adresse email sur la page d'accueil de mon site.

5.2. Convention générale d'écriture du fichier de données

Les caractères reconnus par le logiciel sont :

- Les lettres de l'alphabet, de A à Z, indifféremment majuscule ou minuscule, les accents sont admis.
- Les chiffres de 0 à 9.
- Le signe (-) pour les nombres négatifs.
- La virgule (,) pour les nombres décimaux est reconnu, le point (.) n'est pas reconnu.

- L'apostrophe (') est reconnu pour spécifier les commentaires. Tout ce qui est écrit après l'apostrophe est ignoré par le logiciel.
- Le caractère Espace () est interprété comme séparateur

Remarque :

Le signe (+) est le signe par défaut.

Le signe (=) n'est pas nécessaire car les valeurs numériques sont implicitement affectées aux grandeurs les précédant.

Le fichier peut être écrit avec n'importe quel éditeur de texte sous réserve qu'il soit sauvegardé sous la norme .txt. Le logiciel NotePad fourni avec Windows convient très bien.

Label d'affectation :

Les labels d'affectation sont des macro-instructions dont le logiciel reconnaît généralement les 3 premiers caractères. Ils constituent des mots-clés prédéfinis.

Exemple avec l'affectation des efforts sur la structure, il s'agit du mot-clé **cha** (signifiant que les chargements vont être décrits) qui peut s'écrire :

Cha
CHA
chA
chargement
chawwwjt

Ces 5 écritures sont strictement identiques pour le logiciel car ce dernier ne se préoccupe que des 3 premiers caractères, en majuscule ou en minuscule, indifféremment.

Dans la suite du manuel, il sera surligné et mis en gras les caractères du mot-clé reconnus par le logiciel.

5.3. Indicateur de début de fichier

Tout fichier de données doit commencer impérativement par le mot-clé **structure** et peut être suivi, facultativement, par le titre du problème.

Il doit toujours être placé sur la première ligne du fichier sinon le logiciel arrête sa lecture en vous indiquant qu'il n'est pas compatible avec le logiciel.

Syntaxe : structure (titre du problème)

Exemple :

Structure portique courant Etse CDRB
..... reste du corps du fichier

5.4. Données relatives au genre de problème traité

Cette partie comprend :

- Obligatoirement, Le type de structure étudié.
- Obligatoirement, la taille de la structure par l'indication du nombre de nœuds et d'éléments.
- Facultativement, les unités utilisées pour les longueurs et forces.

5.4.1. Type de structure

Le type de structure doit être choisi parmi les 4 options indiquées ci-après :

- **Portique** plan
- **Treillis** plan
- **Treillis** **spatial**
- **Portique** **spatial**

Exemple :

Structure portique courant Etse CDRB	'énoncé de la structure
Portique plan	'type de structure
.....	'reste du corps du fichier

Cette syntaxe est aussi correcte :

Structure portique courant Etse CDRB	'énoncé de la structure
Portique	'type de structure
.....	'reste du corps du fichier

Mais elle est moins explicite que la précédente. Pour des raisons de clarté, il est préférable de renseigner en entier le type de structure.

5.4.2. Taille de la structure

Il est obligatoire de déclarer le nombre de nœuds et le nombre d'éléments que comporte la structure.

Syntaxe :

Nœuds <nombre de nœuds> **e**lements <nombre d'éléments>

Exemple :

Nœuds 12 elements 14 ou noe 12 ele 14

Ou en reprenant l'exemple précédent :

Structure portique courant Etse CDRB	'énoncé de la structure
Portique plan	'type de structure
Noe 12 ele 14	'taille de la structure
.....	'reste du corps du fichier

5.4.3. Unités utilisées

Les unités à utiliser pour les longueurs et les forces, doivent être spécifiées si elles sont différentes du mètre pour la longueur et daN pour la force.

Les unités comprises par le logiciel sont :

- Pour les longueurs :
 - **M** pour le mètre **Unité par défaut**
 - **Cm** pour le centimètre
 - **Mm** pour le millimètre
- Pour les forces :
 - **N** pour le Newton
 - **daN** pour le décaNewton, **Unité par défaut**
 - **kg** pour le kilogramme
 - **tonne** pour la tonne
 - **kdaN** pour le Kilodécanewton
 - **kN** pour le kiloNewton

La déclaration des unités impose 2 lignes :

- 1^{ière} ligne : le mot-clé **unité** (ou uni en abrégé)
- 2^{ième} ligne : les mots-clés longueur (ou en abrégé) et son unité choisie et force (ou) et son unité choisie.

Syntaxe :

unite
longueur <unité longueur soit cm, mm ou m> **force** <unité force soit n, dan ... >

Exemple :

Unité		ou		uni
longueur cm force kn				l cm f kn

en reprenant l'exemple précédent :

Structure portique courant Etse CDRB	'énoncé de la structure
Portique plan	'type de structure
Noe 12 ele 14	'taille de la structure
Unite	'déclaration d'unités
Longueur cm force kg	'
.....	'reste du corps du fichier

Important :

Cette déclaration s'applique à toutes les valeurs numériques de forces et de longueur figurant dans le fichier descriptif de la structure. C'est la raison pour laquelle il doit se trouver dans la première partie du fichier.

Par conséquent, si l'unité de longueur est le cm, les coordonnées des nœuds seront en cm, les moments en force par cm, les inerties en cm⁴, etc. ... L'ensemble des données comportant une unité de longueur devra être rendu homogène au cm. Le choix de l'unité est donc important, notamment en charpente métallique où l'habitude est de considérer les longueurs en mm ce qui oblige de formuler les moments en mm.

L'unité force produit le même effet que l'unité longueur.

5.5. Données relatives à la géométrie et aux conditions cinématiques aux limites de la structure

Ces données concernent 5 rubriques dont :

- Obligatoirement, les caractéristiques mécaniques des matériaux
- Obligatoirement, les positions des nœuds dans l'espace ou dans le plan
- Obligatoirement, la position des éléments par rapport aux nœuds
- Obligatoirement, les conditions d'appuis
- Et, facultativement, les relaxations de déplacements

Il est conseillé de procéder par blocs, pour des raisons de clarté évidentes.

5.5.1. Caractéristiques des matériaux

Dans ce champ doivent être définies obligatoirement, toutes les caractéristiques mécaniques des éléments de la structure nécessaire au calcul, en fonction de l'option choisie.

Les caractéristiques mécaniques regroupent à la fois les caractéristiques physiques des matériaux utilisés et les caractéristiques géométriques des sections d'éléments de la structure.

La description est réalisée sur plusieurs lignes et la première ligne comporte uniquement le mot-clé **car**actéristique (ou **car** en abrégé) suivi, éventuellement d'un commentaire. La macro-instruction **car** indique au logiciel que les lignes suivantes vont décrire les caractéristiques mécaniques des éléments composant la structure : matériau, inertie, aire, ...

Syntaxe :

CARactéristique

<E=e> (profil) (matériau)

Ou

Liste <E=e> (profil) (matériau)

Avec :

E	= Label d'affectation à choisir dans le tableau 5.1
e	= valeurs de ces labels
profil	= type de profil (ex : IPEA 200)
matériau	= type de matériau (ex : ACIER)

La syntaxe précédente signifie que les constantes (e) sont affectées par défaut à tous les éléments qui peuvent être concernés par la suite ou à ceux spécifiés par la liste. Elles ne le seront plus sur des éléments (ou sur une liste d'éléments) dès lors qu'une ultérieure affectation est spécifiée pour ces derniers.

Exemple :

```
.....
CARACTERISTIQUE
ACIER
1 A 3 IPN 120
4 A 8 SX=5 IZ=7
BETON
9 A 14 .....
.....
```

Cela signifie que les éléments 1 à 8 sont en acier et que les éléments 9 à 14 sont en béton.

5.5.1.1. Caractéristiques physiques des matériaux

L'utilisateur peut définir un matériau par :

- Ses caractéristiques physiques: module d'Young ou module d'élasticité longitudinal, module d'élasticité transversal, coefficient de poisson, poids volumique, coefficient de dilatation thermique. Pour rappel, les mots-clés peuvent indifféremment en minuscule ou majuscule. Les valeurs numériques sont fonction des unités adoptés dans le fichier descriptif de la structure. Si l'unité force est indiqué en KN et l'unité de longueur en mm, la valeur de E sera donc en KN/mm², et suivant le même principe pour les autres valeurs.

Tableau 5.5.1-1 : Mots-clés pour les caractéristiques physiques des matériaux.

Mot-clé	Caractéristiques physiques
E	module d'élasticité longitudinal ou module d'Young
G	module d'élasticité transversal
NU	coefficient de Poisson – coefficient sans dimension
RO	poids volumique du matériau
LX	coefficient de dilatation thermique - coefficient sans dimension

- Le nom d'un matériau existant. Dans cette version logicielle, **seuls existent les matériaux béton et acier**. Les caractéristiques physiques sont stockés dans le fichier cfg_Structure.ini. Ces valeurs sont éditables depuis le formulaire « Valeurs par défaut » qui est appellable par le menu en cliquant sur Outils>>Valeurs par défaut – Préférences .
- Les mots-clés pour la déclaration des matériaux acier et béton sont :
 - Béton : **beton** (le mot en entier)
 - Acier : **acier** (le mot en entier)

Les valeurs par défaut pour l'acier sont :

- module d'élasticité longitudinal E = 210 000.0 MPa
- densité = 7 700.85 daN/m³ soit 7 850 kg/m³
- Coefficient de Poisson = 0.3
- module d'élasticité transversal G = 80 800 MPa
- coefficient de dilatation thermique = 0.000012
- limite élastique $f_y = 235$ MPa soit un acier de type S235 (ou E24)

Les valeurs par défaut pour le béton sont :

- module d'élasticité longitudinal E = 20 000.0 MPa
- densité = 2452,5 daN/m³ = 2500kg/m³
- la valeur du module transversal est déterminé par la relation : $G_b = E_{yb} / (2 * (1 + 0.1))$
- Les valeurs pour le coefficient de Poisson, la dilatation thermique et la limite élastique ne sont pas renseignées car le logiciel n'en a pas l'utilité dans cette version.

Formulaire « Valeur par défaut » :

Valeurs par défaut

Constante de Gravité : 9.80665

Caractéristiques de l'acier

Module d'élasticité longitudinale (MPa) : 210000 (Module de YOUNG)

Densité volumique (Kg/m3) : 7701

Limite élastique (MPa) : 235 (Acier E24)

Coefficient de Poisson : 0.3

Module d'élasticité transversale (MPa) : 80800

Coefficient de dilatation : 0.000012

Caractéristiques du béton :

Module d'élasticité longitudinale (MPa) : 20000 (Module de YOUNG)

Densité volumique (Kg/m3) : 2500.00

OK Rétablir les valeurs par défaut Annuler

Image 5.5.1.1-1 : Formulaire Valeurs par défaut

Si les caractéristiques physiques ne sont pas déclarées, le programme prendra en compte, par défaut, les caractéristiques du matériau figurant dans le fichier de configuration « cfg_Structure.ini ». Ce fichier peut être ouvert avec un traitement de texte basique comme NotePad®. Ce fichier doit toujours se trouver dans le même répertoire que le fichier exécutable du logiciel structure (Structure.exe).

Le matériau par défaut est l'acier.

5.5.1.2. Caractéristiques géométriques des sections

L'utilisateur peut définir la section d'un élément par :

- Ses caractéristiques géométriques (ex. SX, Iz, Vz, ...)
- Un type de profilé existant dans le catalogue de profilé « Catalogue général des profilés ARBED 2006.xls ». Attention, le logiciel ne lit pour le moment dans ce catalogue que les profilés IPN, IPE, HEA, HEB. Toutefois, vous pouvez par ajout de lignes de code lire les autres profilés, il suffit de suivre la même logique que pour les profilés précédents.
- La forme et les dimensions caractéristiques pour certaines sections non standard : sections rectangulaires, en I, tubulaires. Ces sections peuvent être variables. Le logiciel calcule alors lui-même les caractéristiques géométriques.

Spécifications de sections non standards :

Sections rectangulaires :

Pour spécifier une section rectangulaire, on peut utiliser la syntaxe suivante :

$$\underline{\mathbf{B}} = b \quad \underline{\mathbf{H}} = h \quad (\underline{\mathbf{EP}} = ep)$$

Avec :

B, H = respectivement, largeur et hauteur totales
EP = épaisseur de la section lorsqu'elle est creuse
B, h, ep = valeurs numériques respectives de ces labels

Exemple :

B=5 H=10 'section rectangulaire pleine
B=5 H=10 Epaisseur=2.5 'section rectangulaire creuse

Tubes :

Pour spécifier une section tubulaire, on peut utiliser la syntaxe suivante :

Diamètre = di (**EP** = ep)

Avec :

DI = diamètre extérieur du tube
EP = épaisseur de la section lorsqu'elle est creuse
Di, ep = valeurs numériques respectives de ces labels

Exemple :

DI = 10 'tube rond plein
DI = 10 EP=0.45 'tube rond creux

Section en I :

Pour spécifier une section en I, on peut utiliser la syntaxe suivante :

IB = b **H** = h **EA** =ea ES=es

Avec :

B, H, EA, ES = respectivement, largeur et hauteur totales, épaisseur de l'âme, épaisseur de la semelle
B, h, ea, es = valeurs numériques respectives de ces labels

Exemple :

I B=50 H=100EA=3 ES=5

Sections à inertie variable :

Le logiciel calcule les sections en I dont la hauteur varie linéairement. Il faut utiliser la syntaxe suivante :

Liste (type) (E1=e1) **VAR**iable (E2=e2)

Avec :

Liste = liste des éléments concernés
Type = type de section, dans ce cas I
EI = label d'affectation en début d'élément
E2 = label d'affectation, ayant varié, en fin d'élément
e1, e2 = valeurs numériques respectives de ces labels, en début et fin d'élément à inertie variable

Exemple :

1 3 I B=50 H=100 EA=3 ES=5 **VAR**iable H=150 'H varie de 100 à 150 pour les éléments 1 et 3

Définition de l'angle GAMMA dans le cas de portiques spatiaux

Les caractéristiques géométriques des sections sont toujours exprimées dans le repère local de l'élément.

5-2 – Chargements

5-2-1 Déclaration de charges réparties (pression)

Une pression trapézoïdale d'abscisses de début et de fin quelconques, peut être modélisée en respectant la syntaxe suivante :

Liste (**X**=v1) **P1** = p1 (**Jusque**) (**X**=v2) (**P2** =p2) (Θ = Local, ...)

Avec :

v1 = abscisse du début de la pression

P1= PX, PY ou PZ = pression à l'abscisse v1 suivant X, Y ou Z

v2 = abscisse de la fin de la pression

P2= PX, PY ou PZ = pression à l'abscisse v2 suivant X, Y ou Z

Θ = **L**ocal, **R**elatif, **P**rojete

Local : indique que l'on opère en repère local et non global.

Relatif : signifie que les abscisses sont mesurées relativement à l'élément. L'origine de l'élément est l'abscisse 0 et l'extrémité est l'abscisse 1 (v1 et v2 sont donc compris entre 0 et 1). Exemple : 0,33 sera pris égal au tiers de la longueur de l'élément.

Projete : la pression est indiquée dans le repère global et projeté sur l'élément, ce dernier pouvant prendre n'importe quel angle. Ce cas de figure correspond, par exemple, à une charge de neige sur une toiture à versant incliné, les charges de neige étant toujours des charges projetées.

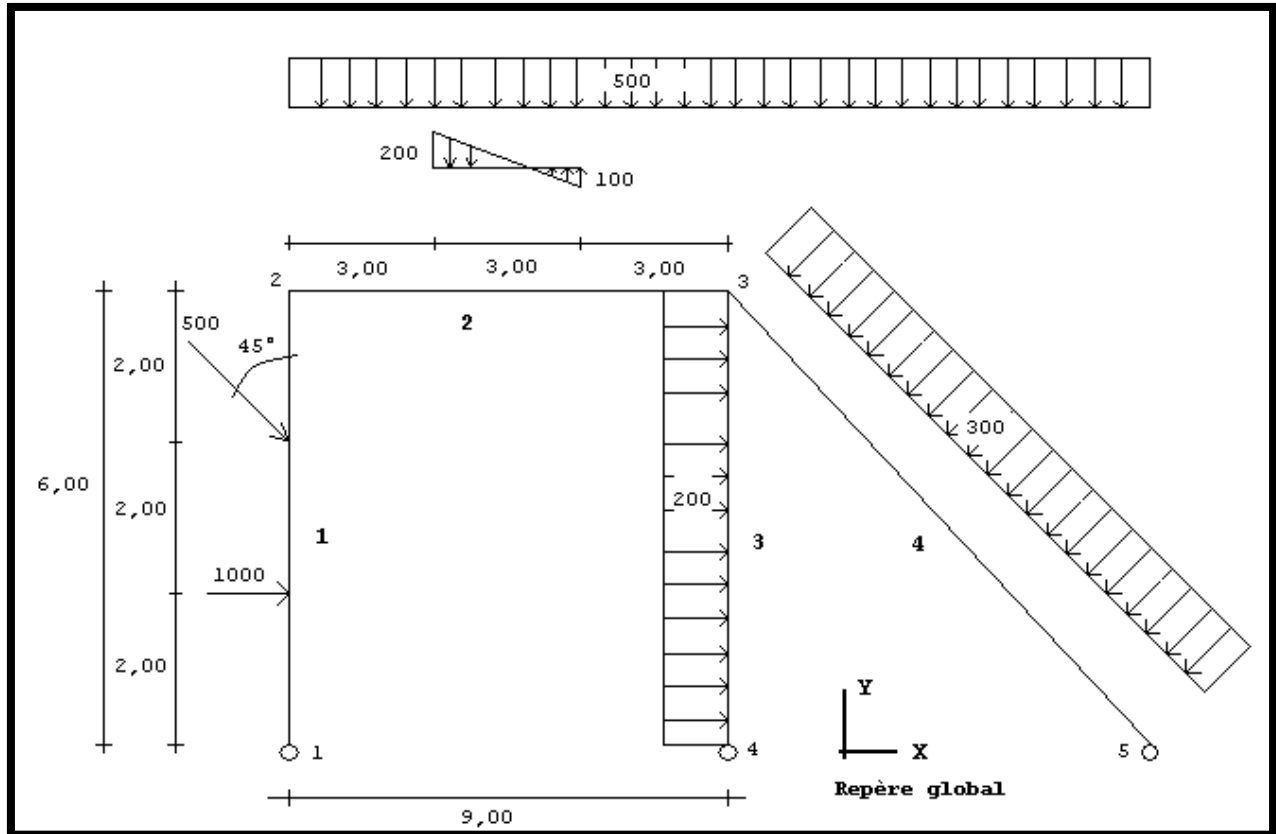
Le repère local est le repère attaché à la barre, X étant orienté du nœud origine vers le nœud extrémité et Y et Z sont pris de telle sorte que XYZ forme un repère orthonormé direct.

Les valeurs v1 et v2 comprises entre 0, origine de l'élément et la longueur de l'élément. Si une valeur de X est négative ou supérieure à la longueur de l'élément, le logiciel affichera un avertissement. Il effectuera le calcul de la structure mais sans la prise en compte du cas de charge objet de l'avertissement.

Par défaut :

1. Si « Local » n'est pas spécifié, on opère dans le repère global absolu
2. Si (**X**=v1) (**X**=v2) (**P2** =p2) ne sont pas renseignés, cela signifie que la pression est uniforme sur toute la longueur de l'élément.
3. Local et projete ne peuvent être indiqués simultanément. La charge est soit indiquée en repère local soit projetée sur la base du repère global. Une charge projetée est toujours indiquée en repère global. Par contre, Relatif et Projete peuvent être associés.

Exemple :



En considérant les orientations d'éléments ci-dessous,

Eléments	Origine	Extrémité
1	1	2
2	2	3
3	3	4
4	3	5

Le chargement du schéma ci-avant sera modélisé par :

....

ELEMENTS

1 X=2 FX=1000

1 X=0.66 FY=-500 ALPHA=-45 LOCAL RELATIF

3 PX=200

2 X=0.33 PY=-200 JUSQUE X=0.66 PY=100 RELATIF

2 4 PY=-500 PROJETE

4 PY=-300 LOCAL

....

Nota :

Pour l'élément 2 et la charge linéaire 500 daN/ml, la ligne « 2 4 PY=-500 PROJETE » est équivalente à « 2 PY=-500 ».

V – Génération automatique de structures

5-1 – Généralités

La génération automatique de structure permet à l'utilisateur de procéder à la modélisation d'une structure et de son chargement de manière plus rapide et plus intuitive que par le codage d'un fichier texte comme indiqué ci-avant.

5-2 – Modélisation de charges de vent

La charge de vent sur la structure est modélisée suivant les prescriptions de l'Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-4 : Actions générales – Actions du vent – NF EN 1991-1-4 (P02-114-1) de novembre 2005 amendé par l'Annexe Nationale de mars 2008.

Quelques restrictions ont toutefois été appliquées :

- Le logiciel ne prend pas en compte les rives arrondies et les brisis mansardés pour les toitures-terrasses.
- Le logiciel ne prend pas en charge les portiques à toitures multiples du type noues multiples, représentés par la figure 7.10 d de l'EN1991-1-4.

5-2 – Génération automatique de portiques métalliques

Cette partie du logiciel Structure se veut une transposition du logiciel Daves1 du CTICM. Ce logiciel, sous MS-DOS, permettait de calculer très rapidement une structure métallique de type portique simple ou multiple avec ou sans pont-roulant.

L'entrée des données se faisait sous format conversationnel (pas de souris à l'époque) et le programme déterminait automatiquement les profils des poteaux et arbalétriers avec l'affichage de la note de calcul comportant :

- Les efforts climatiques sur la structure en fonction du lieu d'implantation géographique du bâtiment
- Les déplacements.
- Les efforts maxi dans les poteaux et arbalétriers
- Les vérifications en résistance et stabilité des profilés. Tous les éléments étaient vérifiés suivant le règlement CM66.
- Les efforts résultants non pondérés sur les fondations. Ne pas oublier que le BAEL 80 est un règlement de calcul aux Etats Limites et au format semi probabiliste alors que le CM 66 était un code de calcul d'une génération plus ancienne raisonnant en contraintes admissibles. Toutefois, les combinaisons d'actions étaient pondérées mais les coefficients de pondération étaient différents de ceux appliqués au béton armé. Cela imposait donc de répartir des efforts non pondérés pour calculer les fondations avec le règlement de béton armé.

La feuille de génération automatique de portiques métalliques reprendra même philosophie.

Vous renseignez les dispositions géométriques de votre portique : forme (auvent, symétrique, etc. ...) et dimensions, type de couverture, région d'implantation, existence d'un pont-roulant et le logiciel va automatiquement vérifier votre structure.

Si le premier hall est un appentis et le deuxième hall un 2 versants, la toiture du premier hall doit être dans le prolongement de la toiture du deuxième hall. Aucun décroché entre les deux toitures n'est autorisé.

Si le dernier hall est un appentis et le l'avant-dernier hall un 2 versants, la toiture du dernier hall doit être dans le prolongement de la toiture précédente. Aucun décroché entre les deux toitures n'est autorisé.

Les décrochés entre toitures ne sont autorisés que si toutes les toitures sont déclarées en appentis, cela pour former une toiture de type shed.

Les résultats du calcul sont présentés sous forme d'une note de calcul au format .txt lisible par n'importe lequel traitement de texte. Dans le cadre du présent logiciel, ce dernier fait appel à NotePad inclus de base dans les systèmes d'exploitation de Microsoft, que ce soit XP, Vista ou Seven.


La note de calcul applique le schéma ci-après :

1. Rappel des hypothèses géométriques, charges, implantation géographique, etc. ...

2. Calcul de la charge de neige appliquée sur la structure
3. Calcul des efforts de vent sur la structure
4. Vérification des flèches de la structure
5. Vérification de la sensibilité de la structure aux effets de l'imperfection géométrique du défaut initial d'aplomb
6. Vérification de la sensibilité de la structure aux effets du second ordre suivant les conditions de l'article 5.2.1(4)B de l'EN 993.1.1
 - a. Vérification que la pente de toiture soit inférieure à 50%
 - b. Vérification que la compression axiale sur l'arbalétrier ne soit pas significative
 - c. Si les deux conditions précédentes sont remplies, calcul du coefficient d'amplification d'instabilité élastique suivant l'équation 5.2 de l'article 5.2.1(4)B pour toutes les combinaisons de charges. Vérification que ce coefficient soit supérieur à 10. Dans le cas où le coefficient serait inférieur à 10 mais supérieur à 3, le coefficient d'amplification est calculé mais non appliqué dans cette version logicielle.
7. Vérification des arbalétriers
 - a. Vérification des conditions de résistance de la section suivant les conditions de l'article 6.2 de l'EN 993.1.1. Ces vérifications sont conduites en 3 ou 5 points suivant que l'arbalétrier comporte ou pas des jarrets de raccordement aux poteaux. Les points de vérifications sont :
 - i. A l'épaule gauche soit le raccordement de l'arbalétrier au poteau gauche.
 - ii. Au raccordement jarret gauche – arbalétrier. Cette vérification n'est conduite que s'il existe un jarret à gauche.
 - iii. Au faitage.
 - iv. Au raccordement arbalétrier – jarret droit. Cette vérification n'est conduite que s'il existe un jarret à droite.
 - v. A l'épaule droite soit le raccordement de l'arbalétrier au poteau droit.
 - b. Vérification des conditions d'instabilité géométrique :
 - i. Pour le déversement : calcul des longueurs maximales à ne pas dépasser pour ne pas avoir à justifier de déversement du profilé : sous charge descendante, maintien par les pannes de toiture et sous charges ascendantes (effet de soulèvement par le vent), mise en place d'un bracon entre la panne et la semelle inférieure de l'arbalétrier.
 - ii. Pour le flambement : respect des conditions de l'article 5.2.1(4)B de l'EN 993.1.1 imposant que la compression ne soit pas significative.
8. Vérification des poteaux
 - a. Vérification des conditions de résistance de la section suivant les conditions de l'article 6.2 de l'EN 993.1.1. Ces vérifications sont conduites entre 2 et 4 points suivant que le poteau porte ou pas de chemin de roulement et qu'il soit ou pas un poteau de rive. Dans le détail, cela donne les positions de vérification suivantes, en parcourant le poteau du bas vers le haut :
 - i. En pied de poteau
 - ii. Section immédiatement en dessous du chemin de roulement le plus bas – Applicable uniquement si le poteau porte 2 chemins de roulement (un de chaque côté) que ceux-ci soient décalés en altimétrie.
 - iii. Section immédiatement en dessous du chemin de roulement le plus haut – Applicable uniquement si le poteau porte 1 chemin de roulement, en général poteau de rive.
 - iv. En tête de poteau
 - b. Vérification des conditions d'instabilité géométrique : application de l'article 6.3.3 de l'EN 993.1.1 et vérification que les équations (6.61) et (6.62) soient satisfaites. Les coefficients d'interaction sont calculés suivant l'annexe A comme l'exige l'Annexe Nationale.
9. Détermination des efforts maximaux appliqués sur les massifs de fondations. Si ces derniers sont calculés suivant l'Eurocode 2 et l'Eurocode 7, les efforts sont déjà pondérés et n'ont pas besoin d'être modifiés pour conduire le calcul des fondations comme cela existait quand on passait du CM66 au BAEL.

Pour ceux qui ont connus le logiciel Daves1 du CTICM, vous retrouvez exactement le même schéma de vérification à deux grandes exceptions près :

- a. La prise en compte des effets du second ordre qui n'existait pas avec le CM66
- b. Le calcul est maintenant conduit suivant l'EN1990 et EN1991 pour la détermination des charges et combinaisons appliquées à la structure et l'EN 1993.1.1 pour la vérification des profilés métalliques.

Face à certaines données figure l'icône . N'hésitez pas à cliquer dessus, il apparaîtra alors un fichier d'aide donnant des précisions sur les valeurs numériques que vous devez renseigner en regard de cette icône.

V – Calcul

5-1 – Méthodes de calcul

5-1-1 Calcul statique linéaire

La méthode de calcul utilisée est la méthode des déplacements.

L'avantage de cette méthode est qu'elle est relativement simple et bien adapté à une mise en œuvre informatique, les matrices de rigidité élémentaire étant codées en dur dans le programme une fois pour toute. Cette méthode est une adaptation particulière de la méthode des éléments finis car elle en reprend les grandes lignes.

La réalisation informatique suit les recommandations figurant dans le livre « Calcul des structures et informatique » de Mr Auboin paru aux Editions EYROLLES en 1983 et, malheureusement, devenu aujourd'hui indisponible.

Le déroulement du calcul suit l'ordre logique suivant :

Etablissement des matrices de rigidités élémentaires \mathbf{K}_e pour toutes les barres et poutres en espace 2D et 3D dans le repère local et suivant les déplacements autorisés à ses nœuds origine et extrémité.

Construction de la matrice de rigidité globale \mathbf{K}_g de la structure dans le repère global à partir des matrices de rigidité élémentaire.

Modification de la matrice de rigidité globale suivant les conditions aux limites (conditions d'appuis, déplacements autorisés, ...)

Calcul du vecteur des forces appliquées aux nœuds (second membre) : \mathbf{F}

Résolution du système linéaire $\mathbf{K}_g \times \mathbf{U} = \mathbf{F}$ par la méthode de Gauss avec recherche du pivot maximum.

Cette méthode est toutefois plus gourmande en temps de résolution, ce qui peut s'avérer gênant si la structure modélisée est volumineuse. Ce logiciel n'étant pas prévue pour le calcul de structure importante (les logiciels commerciaux étant là pour cela), la différence de temps entre les 2 méthodes n'est pas visible. Cette méthode permet d'avoir une meilleure précision numérique que la méthode habituelle de Gauss. La résolution du système linéaire permet de connaître \mathbf{U} vecteur des déplacements des nœuds dans le repère global

Calcul à partir des déplacements des nœuds des efforts dans les éléments et des réactions d'appui pour tous les cas de charges

Superposition des cas de charge suivant les coefficients de pondération pour le calcul des combinaisons renseignés dans le fichier descriptif de la structure. Le principe de superposition est applicable car nous sommes en élasticité linéaire qui impose petits déplacements – petites déformations. Ce principe n'est pas applicable en analyse statique non linéaire (voir ci-après).

5-1-2 Calcul statique non linéaire

Il existe trois types de non linéarité :

1. La non-linéarité matérielle : plasticité, viscoélasticité, viscoplasticité, ...
2. La non-linéarité de contact : ouverture/fermeture de fissures, soulèvement d'appui, ...
3. La non-linéarité géométrique : grandes déformations, grandes rotations, flambement, ...

Le logiciel ne traite que la dernière non-linéarité.

5-1-2-1 Analyse statique non linéaire de portiques en béton armé

La méthode de calcul utilisée est celle présentée par Mr Coin dans son livre « Ossatures des bâtiments ». Le calcul est de type itératif avec test de convergence et comporte les étapes suivantes :

Début

Etude du portique BA sous la combinaison de charge. Attention, nous sommes dans le cas d'une analyse non linéaire, le principe de superposition ne s'applique pas. Les déplacements et efforts sont calculés directement pour la combinaison renseignée.

- Détermination des sollicitations
- Détermination du ferrailage et vérification du coffrage
- Si le coffrage et le ferrailage conviennent (section cohérente) ce qui implique des déplacements petits et un ferrailage dont la densité reste dans des limites raisonnables) Alors détermination pour chaque élément de l'Inertie homogénéisée et de l'inertie homogénéisée réduite (= inertie efficace) – Vérification que les inerties calculées soient cohérentes avec les inerties qui figurent dans le fichier descriptif de la structure et qui ont permis le calcul des sollicitations Sinon refaire le calcul Rdm du portique avec de nouveaux coffrage et de nouvelles inerties, c'est à dire, avec celles déterminées ci-avant.

Modification du portique BA par :

- Application d'une inclinaison d'ensemble de 1/100 de radian si portique à 1 étage et 1/200 de radian si supérieur à 1 étage
- Affectation à chaque élément de son inertie suivant son type :
 - Si poteau : inertie homogénéisée
 - Si poutre : inertie comprise entre homogénéisée et efficace en favorisant plutôt cette dernière
- La structure conserve la même ligne moyenne et les mêmes liaisons. Les actions appliquées restent identiques

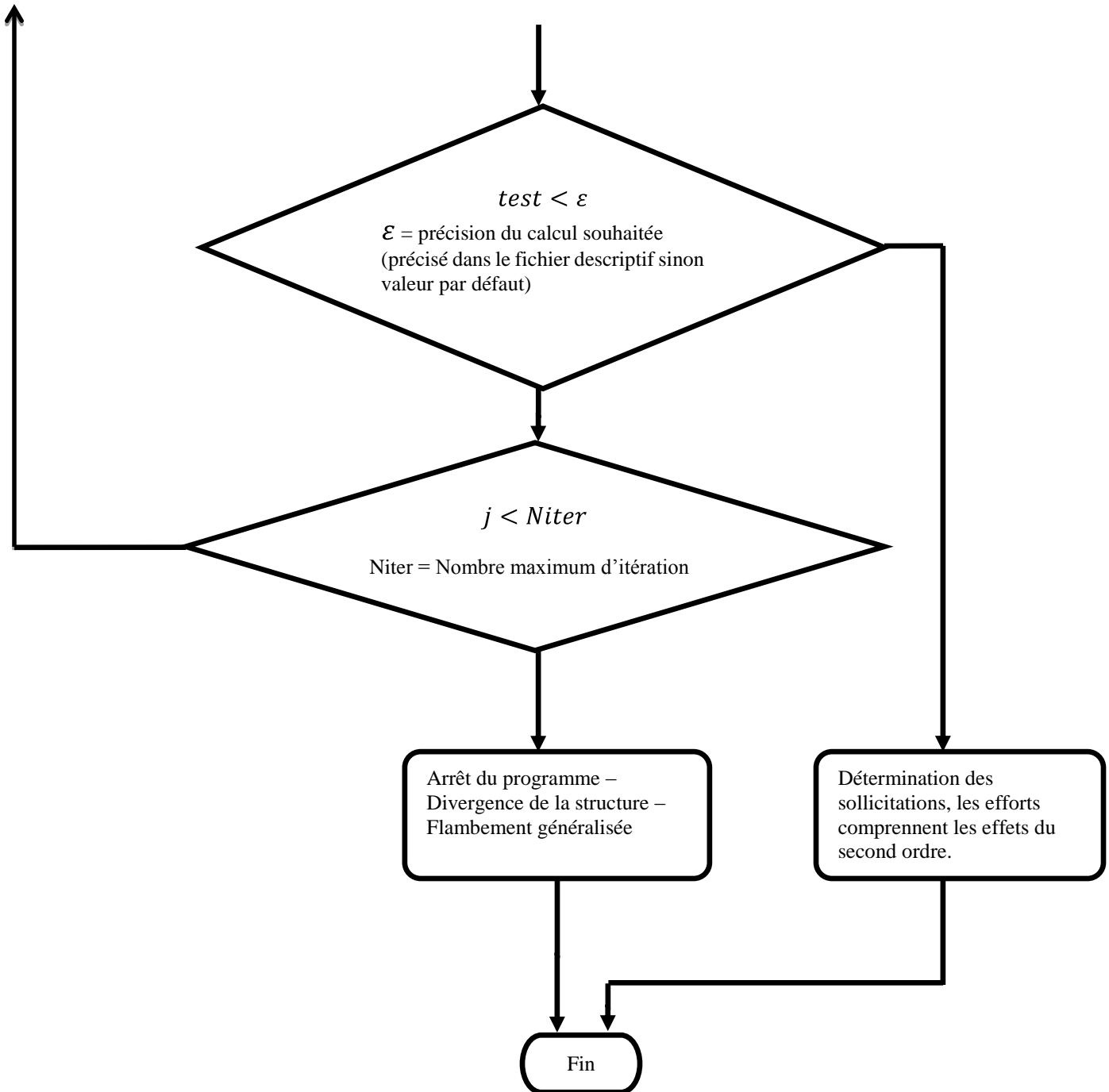
Itération 1 : calcul statique linéaire (voir ci-avant pour le détail du calcul) sur la structure non déformée, calcul des déplacements $\{U_1\}$ des nœuds

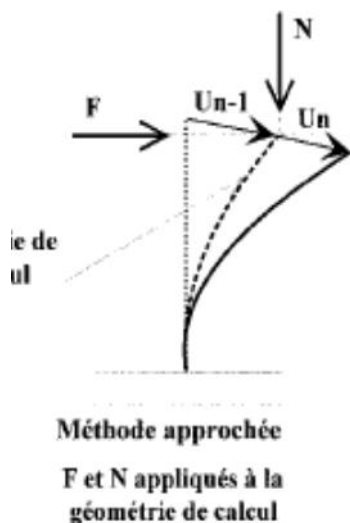
Itération i : modification de la géométrie initiale de la structure en ajoutant les déplacements $\{U_{i-1}\}$ à la géométrie des nœuds, calcul élastique linéaire sur la structure ainsi déformée et détermination des déplacements $\{U_i\}$ de la structure.

Calcul du test de convergence des déplacements :

$$test = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{Neq} \left(\frac{U_{i-1,j} - U_{i,j}}{U_{i,j}} \right)^2}{Neq}}$$

Neq = nombre de déplacements soit Ux et Uy pour un espace plan, on ne prend pas en compte les rotations.
 $U_{i,j}$ = déplacement du nœud j pour l'itération i





Le premier test vérifie que les déplacements au premier ordre obtenu en appliquant le chargement total sur la structure déformée soit égal à celui qui existe entre la structure initiale et la structure déformée au test de convergence près, soit $\{U_n\}$ est identique à $\{U_{n-1}\}$ au test de convergence près. Voir figure ci-contre.

Le deuxième test évite au logiciel de tourner indéfiniment dans le cas où la structure ne convergerait pas.

Cette méthode de calcul ne permet pas le calcul direct du coefficient d'amplification qui détermine l'effort critique sur la structure conduisant au flambement généralisé. Elle ne pourra donc pas être utilisée pour un calcul de structure en acier suivant l'Eurocode 3, ce dernier exigeant de connaître le coefficient d'amplification critique.

Les deux premiers items ne sont pas réalisés automatiquement par le logiciel. Ce sera l'objet d'une version ultérieure. Dans la version actuelle, vous devez entrer les coordonnées de la structure avec l'inclinaison et renseigner l'inertie.

5-1-2-2 Analyse statique non linéaire incrémentale

La structure est calculée avec les matrices de rigidité tangente. Le calcul conduit à la détermination du coefficient d'amplification critique par itération inverse sur la matrice de rigidité tangente stabilisée.

Cette analyse applique la théorie du flambement linéaire généralisé.

Le logiciel suit la procédure suivante pour l'analyse non linéaire d'une structure plane (2D) :

1 – le logiciel appelle la procédure « Analyse_lineaire_2D(,,,) » pour déterminer pour chaque cas de charge les efforts normaux dans toutes barres. Il renseigne donc le tableau eFBarre(i_pas, i, 1) qui recueille l'ensemble des efforts dans les éléments et notamment, la valeur de l'effort normal dans chaque élément.

2 – le logiciel calcule la matrice de rigidité du second ordre élémentaire pour chaque élément. Il détermine les paramètres α , β et γ (appelés aussi fonctions de stabilité) qui sont injectés dans la matrice élémentaire. Ces paramètres varient suivant la valeur de l'effort normal N qui a été déterminé précédemment.

3 – le logiciel réalise l'assemblage des matrices élémentaires et applique une correction suivant les conditions d'appui et l'introduction d'appui élastique.

4 – S'il s'agit de la première itération, calcul du vecteur des forces appliquées aux nœuds (second membre) en totalisant les forces appliquées directement aux nœuds avec les résultantes des forces équivalentes aux forces appliquées sur l'élément : $\{F\}$

5 - Résolution du système linéaire $[K_{gt}] \times \{U\} = \{F\}$ par la méthode de Gauss avec recherche du pivot maximum.

6 – Calcul des efforts normaux sur les éléments

7 - Calcul du test de convergence des déplacements :

$$test = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{Neq} \left(\frac{U_{i-1,j} - U_{i,j}}{U_{i,j}} \right)^2}{Neq}}$$

Neq = nombre de déplacements soit Ux et Uy pour un espace plan, on ne prend pas en compte les rotations.

U_{i,j} = déplacement du nœud j pour l'itération i

Si le test de convergence est inférieur la tolérance prédéterminé (en général pris égal à 1%) ou si le nombre d'itération excède le nombre limite autorisé (en général, pris égal à 40), le logiciel sort du module d'itération du calcul non linéaire sinon il recommence à l'étape 2 en injectant dans les matrices de rigidité tangentes élémentaires les nouvelles valeurs d'efforts normaux calculés à l'étape 6.

8 – Détermination des déplacements, des efforts dans les éléments et des réactions d'appui

9 – Calcul du coefficient d'amplification critique

5-1-3 Calcul dynamique linéaire

Le calcul dynamique est du type modal spectral avec utilisation d'un spectre de réponse de la structure.

1. Construction de la matrice de masse \underline{M}
 - Masse concentrée
 - Masse cohérente ou répartie (à venir)
 - Utilisation de la matrice de rigidité \underline{K} établi lors du calcul statique de la structure (voir chapitre précédent)
2. Calcul des déplacements propres (vecteur propre) et des modes propres (valeurs propres) de vibrations de la structure
 - Calcul des valeurs propres et vecteurs propres par itération inverse à partir de l'équation :

$$(\underline{K} - \omega^2 \times \underline{M}) \underline{U} = 0$$
 - Détermination de :
 - masse modale de rang i : m_i
 - masse modale généralisé : M_i
 - facteur de participation modal
3. Détermination du spectre normalisé pour un calcul sismique
Spectre établi suivant les règles parasismique PS 92 :

$$R_d(T) = a_N \times R(T) \times \rho \times \tau$$

Détermination de l'accélération subie par la structure pour chaque période propre
Détermination du déplacement subie par la structure pour chaque période propre
4. Calcul des réponses modales maximales
 - Détermination des déplacements dans les trois directions (X, Y, Z)
 - Détermination des efforts modaux (N, Ty, Tz, Mx, My, Mz) pour chaque direction
 - Combinaison des réponses modales à une direction sismique suivant l'indépendance des fréquences propres :
 - Combinaison Quadratique (ou méthode SRSS)
 - Combinaison Quadratique Complète (ou méthode CQC)
5. Eléments nécessaires au dimensionnement de la structure
 - Combinaison des efforts statiques et dynamiques suivant les coefficient indiqués dans le fichier de données.

5-3 – Déroulement du calcul d'analyse de structure

Le déroulement d'une session de calcul de la structure est relativement simple.

Le logiciel procède d'abord à la lecture du fichier de description de la structure et des charges qui y sont appliquées. Il vérifie la pertinence des données : géométrie de la structure, etc

Puis, suivant le module de calcul qui a été sélectionné (soit une Analyse Statique Linéaire, soit une Analyse Non Linéaire, une Analyse Dynamique), il procède à la détermination des efforts dans les éléments, aux déplacements des nœuds, aux calculs des réactions d'appui pour les différents cas de charges et les différentes combinaisons. Pour une analyse dynamique, ces résultats sont complétés par l'affichage des fréquences de résonance, des masses modales, des efforts et déplacements modaux et quadratiques. Une fois le calcul terminé, vous pouvez afficher l'ensemble des résultats par l'intermédiaire de la feuille « Résultats ».

5-4 – Vérification de portiques métalliques suivant l'Eurocode 3

Les éléments de portique sont vérifiés en compression et en flexion suivant les dispositions de l'Eurocode 3.

La stabilité au déversement et au flambement est vérifiée pour les poteaux et les arbalétriers.

Les flèches sont vérifiées en tête de poteaux, au faitage et au niveau du corbeau support du chemin de roulement si un pont-roulant existe.

Le calcul des poteaux vérifie les équations (6.61) et (6.62) de l'article 6.3.3 de l'EN 1993.1.1.

Pour rappel :

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} \leq 1 \quad \dots (6.61)$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} \leq 1 \quad \dots (6.62)$$

Où :

- * N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ et $M_{z,Ed}$ sont les valeurs de calcul de l'effort de compression et des moments maximaux dans le poteau par rapport respectivement à l'axe $y-y$ et à l'axe $z-z$;
- * $\Delta M_{y,Ed}$, $\Delta M_{z,Ed}$ sont les moments provoqués par le décalage de l'axe neutre selon 6.2.9.3 pour les sections de Classe 4, voir Tableau 6.7 ;
- * χ_y et χ_z sont les facteurs de réduction dus au flambement par flexion, d'après 6.3.1 ;
- * χ_{LT} est le coefficient de réduction dû au déversement, d'après 6.3.2 ;
- * k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} sont les facteurs d'interaction.

Dans le cas d'un portique, généralement, le moment M_z est nul et la classe du profilé est égale à 1, 2 ou 3. Avec ces hypothèses, les équations (6.61) et (6.62) se réduisent à :

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{c,Rd}} + K_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{c,y,Rd}} \leq 1 \quad (6.61)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{c,Rd}} + K_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{c,y,Rd}} \leq 1 \quad (6.62)$$

VI – Organisation du logiciel

Le présent logiciel est décomposé en feuilles et modules pour respecter les règles de codage de Windows et VB.Net. De plus, cela rend le logiciel plus facile à maintenir et à développer.

Chaque feuille et chaque module possède un rôle bien particulier, généralement identifié par un nom parlant.

6-1 – Organisation générale

Le logiciel s'ouvre sur un écran général à partir duquel se lancent toutes les autres fenêtres.

Cette fenêtre générale regroupe :

Menu **Fichier** regroupant :

- La commande **Ouvrir un fichier** permettant le chargement par le logiciel du fichier de données de la structure à étudier.
- La commande **Quitter** pour terminer la session et quitter le logiciel.

Menu **Editeur**. L'éditeur affiche le fichier décrivant la structure et les charges qui lui sont appliquées. Il permet la visualisation et la modification des données ainsi que leurs enregistrements.

Menu **Projet** regroupant :

- La commande **Caractéristiques des matériaux**. Cette feuille affiche et permet de modifier les caractéristiques des matériaux béton et acier (module longitudinal, coefficient de poisson, ...)
- La commande **Visualisation de la structure**. Cette feuille est aussi activée par la touche F2 du clavier. Cette fenêtre affiche la structure sous forme filaire. Cette feuille permet de vérifier l'absence d'erreur dans la description de la géométrie de la structure.
- La commande **Séisme - spectre de dimensionnement**. Cette feuille permet de modifier les caractéristiques sismiques du projet par rapport à celles indiquées dans le fichier de données. Toutefois, cette commande ne sera pas validée si le fichier ne comporte pas d'origine une demande d'analyse sismique.

Menu **Exécuter** : permet le lancement des modules de calculs à partir de la sélection opérée par l'utilisateur. Il a ainsi accès à :

- L'**Analyse linéaire statique** de la structure 2D ou 3D.
- L'**Analyse non linéaire statique** de la structure 2D
- L'**Analyse linéaire dynamique** de la structure 2D ou 3D.
- L'**Analyse globale**. Le logiciel réalise l'ensemble des analyses demandées par le fichier de données. Cette commande permet de lancer toutes les analyses indiquées dans le fichier de données. Les commandes indiquées ci-avant permettent de réaliser une analyse sans devoir lancer l'ensemble des analyses précisées dans le fichier. Cela peut permettre des gains de temps si la structure à calculer est volumineuse.

Menu **Résultats** permettant l'affichage des réactions d'appui, des déplacements des nœuds et des efforts dans les barres. Pour le calcul dynamique, la fenêtre affiche de plus les fréquences de résonances, les efforts modaux, les déplacements modaux, les déplacements quadratiques et les efforts quadratiques ainsi que leurs combinaisons avec les efforts et déplacements statiques suivant les combinaisons indiquées dans le fichier de données.

Menu **Outils** :

- La **calculatrice**. Affiche la calculatrice par défaut de Windows®. Utile lorsque pour vérifier une donnée.
- Le calcul de l'**angle Gamma** permettant l'orientation des profilés dans le cas de calcul sur structure 3D (Voir documentation Robot® et autre) .
- Le **catalogue des profilés**. Commande l'affichage du fichier Excel du catalogue 2006 des profilés commercialisés par ARBED. Ce fichier présente les caractéristiques géométriques des profilés courants (IPE, IPN, UPN, HE, ...) ainsi que des profilés standard étranger tel que UB britannique, profilés américains, japonais.
- **Caractéristiques géométriques**. Affiche une feuille de calcul Excel qui permet le calcul des caractéristiques géométriques (inerties, aires, etc. ...) des Profilés Reconstitués Soudés (PRS). Je remercie Mr Cahen et toute son équipe lycéenne qui a réalisé ce fichier et l'a mis à la disposition de tous.

Menu ? regroupant:

- La commande **Aide**. Cela affiche le présent document dans le logiciel WordPad®.
- La commande **Fichier modèle**. Cela permet l'affichage du modèle de fichier de données.
- La commande **A propos**. Cette commande informe sur la version du logiciel exécuté.

6-2 – Modules

Le logiciel comprend cinq modules :

1. module de lecture « **Lecture.bas** » :
sert à lire et à transcrire pour les modules de calcul le fichier de la structure à calculer
2. module de calcul « **Lineaire2D.bas** » :
procède à l'Analyse linéaire statique de la structure 2D
3. module de calcul « **Lineaire3D.bas** » :
procède à l'Analyse linéaire statique de la structure 3D
4. module de calcul « **Dynamique2D.bas** » :
procède à l'Analyse linéaire dynamique de la structure 2D
5. module de calcul « **Dynamique3D.bas** » :
procède à l'Analyse linéaire dynamique de la structure 3D (inactif dans cette version logicielle)

6. module de calcul « **Non_Lineaire2D.bas** »
procède à l'Analyse non linéaire statique de la structure 2D

Ces modules sont activés par l'intermédiaire du menu figurant sur la feuille structure.

6-3 – Feuilles

La feuille « Editeur » consiste à afficher NotePad®. Ce dernier va servir d'éditeur pour la création du fichier descriptif de la structure à calculer.

VII – Générations automatiques

7-1 – Générations automatiques de portiques métalliques

Le logiciel Structure offre la possibilité de générer automatique des portiques métalliques jusqu'à 4 nefs. Il reprend la même typologie que le logiciel bien connu du CTICM : DAVES.1®

Cette génération est particulièrement bien adaptée au calcul de bâtiment industriel. Aussi, la méthode de calcul utilisée comporte des limitations propres à ce type de structures. Elles sont récapitulées ci-après.

L'utilisation de la génération automatique suppose les hypothèses suivantes :

- La dimension du long-pan est plus grande ou égale à la longueur du pignon. La longueur du long-pan ne doit jamais être inférieure à celle du pignon sous peine de voir les efforts appliqués à la structure complètement faussés.
- Les portiques (ou les halls ou les nefs) sont orientés dans le sens du pignon. Ils reprennent donc les efforts du vent sur les long-pan.
- La qualité de l'acier est la même pour tous les éléments (poteaux et traverses) de tous les portiques. Le logiciel n'autorise pas les panachages de qualités d'acier.

VIII – Exemples d'utilisation du logiciel

Ce chapitre présente deux séries d'exemples :

- Les exemples constituant la première série sont tirés du Guide ICAB SSL que l'on peut retrouver sur le site <http://www.icab.fr/>. Ce guide est lui-même un extrait du manuel « Guide de validation des progiciels de calcul de structures » élaboré par la Société Française des Mécaniciens (SFM) et publié par l'AFNOR.
- Les exemples de la deuxième série sont extraits de la littérature.

Ces exemples permettent de mieux comprendre comment sont conçus les fichiers descriptifs des structures. Ils ont permis aussi de valider les performances et limites du logiciel.

8-1 – Exemples ICAB SSL

Les exemples tirés du guide ICAB figurent dans le répertoire \data ICAB.

Tous les exemples vérifiés et validés portent le nom SSL[n°d'ordre].txt. Le numéro d'ordre correspond au numéro de l'exemple. Ainsi, l'exemple n°1 dénommé dans le document ICAB SSLLO1 se trouve décrit dans le fichier SSLLO1.txt. Tous les autres exemples suivent la même logique. Une petite différence a été faite pour les exemples 6 et 8 car ces derniers imposés plusieurs modélisations de la même structure. Ces différentes modélisations ont conduit à la création de plusieurs fichiers.

7-2 – Exemples tirés de la littérature

7-2-1 – Passerelle Hermes

Cet exemple de calcul d'une passerelle figure dans le livre « Une approche simple du calcul des structures par la méthode des éléments finis » paru aux éditions Hermeset ayant pour auteurs Mr Gay et Mr Gambelin. Cet exemple se trouve à la page 48 de l'édition de 1989.

Titre du fichier : passerelle_Hermes.txt

7-2-2 – Tour Hermes

Cet exemple de calcul d'une passerelle est extrait du livre « Une approche simple du calcul des structures par la méthode des éléments finis » paru aux éditions Hermes avec pour auteurs Mr Gay et Mr Gambelin, page 57 pour l'édition de 1989.

Titre du fichier : tour_Hermes.txt

7-2-3 – Exemple TANGO

Cet exemple a été présenté dans les Annales de l'ITPTP – Bulletin du CACT – série Informatique appliquée n°49, Annales n°396 de juillet-août 1981.

Titre du fichier : tango.txt

7-2-4 – Exemple de calcul de treillis plan

Cet exemple de calcul d'un treillis plan est tiré du livre de Mr Asanchevov « Calcul des structures en basic » page 69.

Titre du fichier : test treillis plan.txt

7-2-5 – Exemple de calcul d'une poutre continue

Cet exemple de calcul d'une poutre continue est tiré du livre de Mr Asanchevov « Calcul des structures en basic » page 116.

Titre du fichier : PoutContAsanchevov.txt

7-2-6 – Exemple de calcul d'un portique en analyse non linéaire suivant la méthode de Coin

Portique plan comportant une rotule interne sur le nœud 5, chargé latéralement, avec une charge verticale sur le montant gauche.

Titre du fichier : PortiqueCoin.txt

7-2-7 – Exemple de calcul d'un treillis spatial

Cet exemple de calcul d'un treillis spatial est tiré du livre de Mr Asanchevov « Calcul des structures en basic » page 77.

Titre du fichier : test ossat spatial.txt

VIII – ANNEXES

8-1 Glossaire des variables

Le logiciel vous est livré avec son code source. Cela vous autorise d'y porter toutes les modifications que vous souhaitez.

Or, il n'est pas facile de faire une quelconque modification sur un code source quand les variables utilisées par le logiciel ne sont pas documentées.

Cette section de l'Aide répond à ce besoin. Elle ne sera donc utile qu'aux utilisateurs voulant porter des modifications au logiciel. Elle peut aussi rendre service à tous ceux désirant comprendre le fonctionnement interne du logiciel.

Par contre, cette section ne sera d'aucune utilité pour ceux désirant seulement utiliser le logiciel.

8-1-1 Classement par feuilles de données

Variables publiques à l'ensemble du logiciel

l_strFileName = nom du fichier de sauvegarde des données
 titre_probleme=
 Type_probleme : précise la catégorie de structure calculée
 1 = treillis plan
 2 = portique plan
 3 = treillis spatial
 4 = portique spatial

Caractéristiques générales des matériaux (acier, béton, bois, etc.)

Module de Young, densité volumique, ...

Eyb = module longitudinal du béton
 Eys= module longitudinal de l'acier
 Ros = densité volumique de l'acier
 Rob= densité volumique du béton
 PoissonS = coefficient de poisson de l'acier
 Gs = module transversal de l'acier
 LambdaS = coefficient de dilatation thermique de l'acier
 fys = contrainte caractéristique de l'acier

Caractéristiques mécaniques des éléments et des nœuds de la structure

Ele(1 ou 2, j) : indique le numéro du nœud 1 ou 2 pour l'élément j
 ddl_noe(i,j) : indique si le déplacement suivant j pour le nœud i est autorisée, permet de déterminer les relâchements ou des semi-encastrement

- ➔ =0 : aucun déplacement autorisé
- ➔ =1 : déplacement suivant j autorisé

Total_appui : nombre total de nœud formant appuis
 Total_nœud : nombre total de nœuds
 Total_element : nombre total d'élément
 Type_profile(j) = type de profilé de l'élément j : profilé en I, rond, etc.
 ➔ = 1 : profilé en I
 ➔ = 2 : tube rond
 ➔ = 3 : tube carré
 ➔ = 4 : cornière

It(j)= Inertie de torsion de l'élément j
 Iy(j)= plus grande Inertie en flexion de l'élément j
 Iz(j)= plus petite Inertie en flexion de l'élément j
 Sx(j)= Aire de l'élément j
 Sy(50), Sz(50),
 Ey(j) = module longitudinal de l'élément j
 Ro(i) = densité volumique de l'élément i
 poisson(i)= module de Poisson de l'élément i
 G(j) = module transversal de l'élément j
 lambda(i) coefficient de dilatation thermique de l'élément i
 fy(i):
 B(i)= largeur ou base de l'élément i. Valable pour des profils carrés ou rectangulaire, en I ou H
 H(j, i)=Hauteur de l'élément i. Valable pour des profils carrés ou rectangulaire, en I ou H. j prends 2 valeurs :
 J=1 : hauteur de l'élément à son origine
 J=2 : hauteur de l'élément à son extrémité
 Valable pour des profils à hauteur variable
 ea(i) = épaisseur de l'âme pour des profils en I ou H, i indique le n° du profilé
 es(i) = épaisseur de la semelle pour des profils en I ou H, i indique le n° du profilé.
 Les semelles haute et basse ont même épaisseur.
 X_noe(i), Y_noe(i), Z_noe(i) = coordonnées en X,Y,Z du nœud i
 Appui(i)= indique si le nœud i est un appui
 ➔ True = le nœud i est un appui

→ False = le nœud i n'est pas un appui

R_appui(7, j) = indique les degrés de liberté de l'appui j. Prends les valeurs VRAI pour un déplacement autorisé et FALSE pour un déplacement interdit.

R_appui(1, j)= déplacement suivant X pour l'appui j
 R_appui(2, j)= déplacement suivant Y pour l'appui j
 R_appui(3, j)= déplacement suivant Z pour l'appui j
 R_appui(4, j)= rotation autour de l'axe X pour l'appui j
 R_appui(5, j)= rotation autour de l'axe Y pour l'appui j
 R_appui(6, j)= rotation autour de l'axe Z pour l'appui j
 R_appui(7, j)= déplacement élastique suivant X pour l'appui j
 R_appui(8, j)= déplacement élastique suivant Y pour l'appui j
 R_appui(9, j)= déplacement élastique suivant Z pour l'appui j
 R_appui(10, j)= rotation élastique autour de l'axe X pour l'appui j
 R_appui(11, j)= rotation élastique autour de l'axe Y pour l'appui j
 R_appui(12, j)= rotation élastique autour de l'axe Z pour l'appui j

Kux(50), Kuy(50), Kuz(50), Krx(50), Kry(50), Krz(50)

Rel_ele(i, j) = indique pour l'élément j si son nœud 1 (i=1) est relâché et si son nœud 2 est relâché (i=2)

→ True = l'élément j pour le nœud i est relâché.
 → False = l'élément j pour le nœud i n'est pas relâché.

Inert_Variable(j) = indique si l'élément j est à inertie variable ou pas

→ True = l'élément j est à inertie variable
 → False = l'élément j n'est pas à inertie variable

n_barre_appui(i) = détermine le nombre de barres venant sur l'appui du nœud i

Poids_structure = poids total de la structure

Charges et combinaison :

Total_cas_de_charge(i) = nombre total de cas de charge indiqué dans le fichier de données

- i=1 : calcul statique linéaire
- i=2 : calcul statique non linéaire
- i=3 : calcul dynamique linéaire
- i=4 : calcul dynamique non linéaire

Total_combinaison(i) = nombre total de combinaisons indiqué dans le fichier de données

- i=1 : calcul statique linéaire
- i=2 : calcul statique non linéaire
- i=3 : calcul dynamique linéaire
- i=4 : calcul dynamique non linéaire

Coef_pond(N° de cas de charge, N° de combinaison) = coefficient de pondération s'appliquant au cas de charge i de la combinaison j

ForPN(, ,) = Force Ponctuelle sur Nœud(suivant x y ou z local, n° de nœud, n° de cas) - Attention une seule force ponctuelle par cas, par nœud et par direction

ForP(, , i , j) = Force Ponctuelle sur élément linéaire (suivant x y ou z local, n° d'élément, i = n° de force pour le cas j, j = n° de cas) - Attention : i limité à 10 soit 10 forces réparties et ponctuelles par cas et par direction, ceci afin de simplifier le code, si plus, il suffit de changer le code.

a_ForP(, , ,) = abscisse de la force ponctuelle sur l'élément

For11(, , ,) = force répartie sur élément Linéaire (suivant x y ou z local, n° d'élément, n° de force pour le cas j, n° de cas) = pression à l'abscisse **a_ForL**.

a_ForL(, , ,) = abscisse de l'origine de la pression linéaire trapézoïdale

For12(, , ,) = force répartie sur élément Linéaire (suivant x y ou z local, n° d'élément, n° de force pour le cas j, n° de cas) = pression à l'abscisse **b_ForL**.

ForL2 = ForL1 si la pression est uniforme

b_ForL(, , ,) = abscisse de l'extrémité de la pression linéaire trapézoïdale

CplePN(, ,)=CouplePonctuel sur Nœud(n° de nœud, n° de cas)- Attention une seule force ponctuelle par cas, par nœud et par direction

CpleP(,)=CouplePonctuel sur élément linéaire(n° d'élément, n° de cas)- Attention une seule force répartie ou ponctuelle par cas et par direction

a_CpleP(, , ,)= abscisse du couple ponctuel sur l'élément

Cplel1(, ,) = Couple répartie sur élément Linéaire (n° d'élément, n° de cas) = couple à l'abscisse **a_CpleL**.

a_CpleL(, , ,)= abscisse de l'origine du couple linéaire trapézoïdale

Cplel2(, ,) = couple répartie sur élément Linéaire (suivant X Y ou Z, n° d'élément, n° de cas) = pression à l'abscisse **b_CpleL**

b_CpleL(, , ,)= abscisse de l'extrémité du couple linéaire trapézoïdale

total_CpleP(i,j) = nombre total de couple appliqué à l'élément i pour le cas j.

local_cas(i, k, j, N_cas) = Vrai si la force répartie a été indiquée en repère local, faux si repère global ; i=1,2 ou 3 si force suivant X, Y ou Z ; k = n° de l'élément ; j indice d'ordre de la force, max 10, N_cas = n° de cas de charge

P_local_cas(i, k , j, N_cas) = Vrai si la force Ponctuelle a été indiquée en repère local, faux si repère global ; i=1,2 ou 3 si force suivant X, Y ou Z ; k = n° de l'élément ; j indice d'ordre de la force, max 10, N_cas = n° de cas de charge

Proj_cas(i, k , j, N_cas) = Vrai si la force répartie a été indiquée en force projetée, faux sinon ; i=1,2 ou 3 si force suivant X, Y ou Z ; k = n° de l'élément ; j indice d'ordre de la force, max 10, N_cas = n° de cas de charge

Cas_comb(indice d'ordre dans le vecteur colonne dim_Cas_comb, N° de combinaison) = N° de cas de charge sur lequel s'applique le I ième coefficient de pondération pour la combinaison j

dim_Cas_comb(N_comb)= nombre total de coefficient de pondération pour la combinaison N_comb

fn_noe_cas(i, j, k) = prend la valeur Vrai ou Faux suivant que la force du cas de charge n° k sur le nœud j suivant l'axe i (i=1->x, i=2->y, i=3->z) est une force nodale

Affichage des résultats du calcul statique

Depl(j ,i ,1 à 6) = Depl(N° de combinaison ou de cas de charge ,n° de nœud, direction)= valeur du déplacement pour le nœud i combinaison j suivant la direction X, Y ou Z ou rotation autour des axes X,Y,Z. Les déplacements sont données dans le repère global.

efBarre(j ,i ,1 à 6) = efBarre(N° de combinaison ou de cas de charge ,N° de barre, type d'efforts dans les barres) = valeur de l'effort pour l'élément i combinaison ou cas de charge j suivant le type d'effort (normal, tranchant, moment) soit :

en 2D :

efBarre(j ,i ,1) = effort normal au nœud 1 de la barre i sous la combinaison j

efBarre(j ,i ,2) = effort tranchant au nœud 1 de la barre i sous la comb. j

efBarre(j ,i ,3) = moment de flexion au nœud 1 de la barre i sous la comb. j

efBarre(j ,i ,4) = effort normal au nœud 2 de la barre i sous la combinaison j

efBarre(j ,i ,5) = effort tranchant au nœud 2 de la barre i sous la comb. j

efBarre(j ,i ,6) = moment de flexion au nœud 2 de la barre i sous la comb. j

en 3D :

efBarre(j ,i ,1) = effort normal au nœud 1 de la barre i sous la combinaison j

efBarre(j ,i ,2) = effort tranchant Ty au nœud 1 de la barre i sous la comb. j

efBarre(j ,i ,3) = moment de flexion Tz au nœud 1 de la barre i sous la comb. j

efBarre(j ,i ,4) = moment de torsion Mx au nœud 1 de la barre i sous la comb. j

efBarre(j ,i ,5) = moment de flexion My au nœud 1 de la barre i sous la comb. j

efBarre(j ,i ,6) = moment de flexion Mz au nœud 1 de la barre i sous la comb. j

efBarre(j ,i ,7) = effort normal au nœud 1 de la barre i sous la combinaison j

efBarre(j ,i ,8) = effort tranchant Ty au nœud 1 de la barre i sous la comb. j

eFBarre(j ,i ,9) = moment de flexion Tz au nœud 1 de la barre i sous la comb. j
 eFBarre(j ,i ,10) = moment de torsion Mx au nœud 1 de la barre i sous la comb. j
 eFBarre(j ,i ,11) = moment de flexion My au nœud 1 de la barre i sous la comb. j
 eFBarre(j ,i ,12) = moment de flexion Mz au nœud 1 de la barre i sous la comb. j

FNodal(j ,i ,1 à 6) = FNodal(N° de combinaison ou de cas de charge, n° de nœud, type d'efforts dans le nœud) = valeur de l'effort pour le nœud i combinaison ou cas de charge j suivant le type d'effort (normal, tranchant, moment).

Attention : pour les résultats présentés ci-dessus, le numéro de combinaison ou de cas de charge est présenté de la manière suivante : les cas de charge sont indiqués dans l'ordre de numérotation indiqué dans le fichier de donnée, par contre, pour les combinaisons, celui-ci est aussi présenté dans l'ordre de numérotation **mais** après tous les cas de charges. Ainsi, si nous avons 4 cas de charge et 3 combinaisons, la première combinaison sera identifiée par l'indice j=5 soit les 4 cas de charges + combinaison n°1, la deuxième combinaison aura un indice j=6 soit 4 cas de charge + 2 combinaisons, et ainsi de suite ...

Variables générales pour le calcul dynamique :

Cal_Dynamique_lin = active le mode de calcul dynamique linéaire (=TRUE)
 Cal_Dynamique_Non_lin = active le mode de calcul dynamique non linéaire
 Sismique_92 = indique si le calcul est conduit suivant les directives du règlement PS 92 (= TRUE)
 DynIter = nombre d'itération maximum pour la recherche de la valeur propre si la précision de calcul des valeurs propres n'est toujours pas atteinte.
 DynMode = nombre de modes propres à calculer, égal à 3 par défaut.
 DynTol = précision de calcul des valeurs propres, égal à 0.001 par défaut
 MasCon = modélisation avec matrice des masses concentrées
 MasCoh = modélisation avec matrice des masses réparties
 T(i) = période propre de l'ouvrage en mode i (= valeurs propres)
 Tau = coefficient d'amplification topographique
 Qsi = amortissement relatif
 Zone = classification de la zone. Zone Ia, Ib, II ou III
 Class_ouvrage = classe de l'ouvrage (=A, B, C, D)
 Q_cpt = coefficient de comportement
 Site_PS = classification du site sur lequel repose la construction. Site S0, S1, S2 et S3
 Mmi(DynMode, 3) = masse modale de rang i (i variant de 1 à dynmode) et pour les 3 ou 6 directions (2D ou 3D)
 Mgi(DynMode) = masse modale généralisée de rang i
 P_mode(DynMode, 3) = coefficient de participation de la masse modale de rang i pour l'une des 3 ou 6 directions (suivant 2D ou 3D)
 Effort_quadra(1 à 6, k = Total_element, j) = combinaison quadratique des efforts à chaque extrémité de barre pour chaque direction sismique (3 au maximum en espace plan et 6 en espace spatial, en fait cela est ramené à 2 en espace plan, la troisième direction n'ayant pas de signification physique). J=1 -> séisme suivant l'axe des X, J=2 -> séisme suivant l'axe des Y. Effort_quadra(1, k, j) = effort normal sur l'élément k nœud 1 direction j
 Effort_quadra(2, k, j) = tranchantsur l'élément k nœud 1 direction j
 Effort_quadra(3, k, j) = moment de flexionsur l'élément k nœud 1 direction j
 Effort_quadra(4, k, j) = effort normal sur l'élément k nœud 2 direction j
 Effort_quadra(5, k, j) = effort tranchantsur l'élément k nœud 2 direction j
 Effort_quadra(6, k, j) = moment de flexionsur l'élément k nœud 2 direction j
 Exyz(j, k) = coefficient pour la combinaison des effets des composantes du mouvement sismique avec :

J = direction de l'excitation sismique, suivant X (j=1) ou suivant Y (j=2) pour un espace 2D

K = N° du cas de charge sismique

mass_rep(j,k) = masse répartie sur l'élément k suivant x ou y local (j = 1 suivant x local ou j= 2 suivant y local pour un espace 2D)

F_modal(Total_nœud*3, 3=j, DynMode) = forces modales à chaque nœud de la structure pour chaque mode et pour chaque direction de seisme et avec i variant de 1 à la totalité des nœuds et j variant de 1 à 3

J=1 -> direction du seisme suivant l'axe x

J=2 -> déplacement suivant l'axe y

J=3 -> rotation autour de l'axe z

Def_dyn(Neq, DynMode) = vecteur propre de la structure. Déplacement de la structure sous l'effet des fréquences de résonances (= valeurs propres)

Depl_modal(Total_nœud=i, j=3, DynMode) = déplacement modal à chaque nœud pour chaque mode et pour chaque direction sous l'effet du spectre de réponse appliqué à la structure avec i variant de 1 à la totalité des nœuds et j variant de 1 à 3

J=1 -> déplacement suivant l'axe x

J=2 -> déplacement suivant l'axe y

J=3 -> rotation autour de l'axe z

Depl_quadra(Total_nœud * 3 ou 6, 3) = combinaison quadratique du déplacement modal pour chaque nœud de la structure suivant les 3 ou 6 directions (2D ou 3D) sous l'effet du spectre de réponse appliqué à la structure.

Max_mode(3) = indique le nombre de mode retenus pour chaque direction (3 ou 6 suivant 2D ou 3D)

Mass_struct(j) = masse participante de la structure dans la direction j

J=1 -> déplacement suivant l'axe x

J=2 -> déplacement suivant l'axe y

J=3 -> rotation autour de l'axe z

Variables générales pour le calcul non linéaire :

MaxIter = nombre maximum d'itération que l'on autorise au logiciel sinon divergence
IterPdeltaTol(i) = indique à quelle valeur d'itération la solution a convergé pour le cas i

Incl = 100 ou 200 -> inclinaison initiale de la structure suivant l'article A4.4.3 du BAEL99 soit 1/100 ou 1/200 de radian - Utilisable uniquement que pour les portiques BA

MaxPdeltaTol = valeur maximum de tolérance que l'on autorise au logiciel sinon divergence

PdeltaTol(i) = valeur de tolérance lorsque le processus a convergé pour le cas i

Feuille Lecture

ddl_noe(i,j) = indique les déplacements autorisés pour chaque nœud i suivant la direction j. j prends les valeurs de 1 à 6 sachant que :

J=1 -> déplacement suivant x

J=2 -> déplacement suivant y

J=3 -> déplacement suivant z

J=4 -> rotation autour de l'axe Ox

J=5 -> rotation autour de l'axe Oy

J=6 -> rotation autour de l'axe Oz

Ddl_noe(i,j) prends 2 valeurs:

➔ 0 : déplacement interdit

➔ 1 : déplacement autorisé

biblio_ro(i) = la lecture de la densité volumique ro pour l'élément i est faite à partir de la bibliothèque Excel du logiciel (=TRUE) ou directement dans le fichier de données (= FALSE).

biblio_ele(i) : indique si pour l'élément i les caractéristiques sont lues à partir de la bibliothèque Excel du logiciel (=TRUE) ou directement dans le fichier de données (= FALSE).

Type_analyse = indice permettant de déterminer quelle analyse est conduite.

1 = analyse statique linéaire

2 = analyse statique non linéaire = analyse delta-P

3 = analyse dynamique linéaire

4 = analyse dynamique non linéaire

5 = analyse statique non linéaire incrémentale = recherche du coefficient critique de flambement

Type_force,

type_Unite(2) : indique en quel type d'unité a été renseigné le fichier de données
sitype_unite(1)

= 1 'aucune modification

= 2 'transformation de mm en m

= 3 'transformation de cm en m

sitype_unite(2)

= 1 ' daN pas de modification

= 2 'transformation de N en daN

= 3 'transformation de KN en daN

= 4 'transformation de KdaN en daN

= 5 'transformation de Kg en daN

= 6 'transformation de tonne en daN

N_generation_poids_propre = numéro de combinaison correspondant au calcul du poids propre de la structure

Var_comb

Local_cas(i) = indique si le cas de charge i est indiqué en repère local (=TRUE) ou en repère global (=FALSE)

Feuille Génération automatique de portique métallique

Onglet Généralité:

LongueurTot = longueur totale de la construction, est égale à la longueur du long-pan

Trav = longueur de la travée, c.a.d la distance entre deux portiques

Bcont = coefficient de continuité pour les lisses de bardage, suivant que la même panne s'appuie sur 2,3 ou plus de portique

Pbardage = poids propre du bardage ramené sur le poteau du portique

Def_Aplomb = indique si le fichier de description de la structure prend en compte le défaut d'aplomb (Def_Aplomb = true) ou pas (Def_Aplomb = false)

Structure_Sym = dans le cas de la prise en compte du défaut d'aplomb, si la structure est symétrique (Structure_Sym = true), le défaut d'aplomb est calculé sur un côté sinon, (Structure_Sym = false) il est calculé sur les 2 côtés.

Onglet Hall:

LargHall(i) = indique la distance entre les 2 poteaux du même portique, est égale à la largeur de la nef i, i pouvant prendre les valeurs 1 à 4 suivant qu'il s'agisse de la nef 1, nef 2, etc. ...

Pvg(i) = indique la pente de la couverture gauche du hall i, i pouvant prendre les valeurs 1 à 4 suivant qu'il s'agisse de la nef 1, nef 2, etc. ... Quelque soit la forme rentrée, Pvg() est transformé en radian

Pvd(i) = indique la pente de la couverture droite du hall i, i pouvant prendre les valeurs 1 à 4 suivant qu'il s'agisse de la nef 1, nef 2, etc. ... Quelque soit la forme rentrée, Pvd() est transformé en radian

Couv(i) = poids propre de la couverture - Attention: prendre en compte le poids du bac acier de couverture plus le poids propre de la panne support.

HjarretG(i) = hauteur sous le jarret du poteau gauche du hall i

HjarretD(i) = hauteur sous le jarret du poteau droit du hall i

AsPotG(i) = niveau d'assise du poteau gauche du hall i

AsPotD(i) = niveau d'assise du poteau droit du hall i

HacrotG = hauteur d'acrotère sur la file gauche du bâtiment

HacrotD = hauteur d'acrotère sur la file gauche du bâtiment

LfyG(i) = longueur de flambement dans le plan y (cad perpendiculairement au plan du portique) du poteau gauche du hall i

LfyD(i) = longueur de flambement dans le plan y (cad perpendiculairement au plan du portique) du poteau droit du hall i

LongJarG(i) = longueur du jarret du poteau gauche du hall i

LongJarD(i) = longueur du jarret du poteau gauche du hall i

Pcont = coefficient de continuité pour les pannes de couverture, suivant que la même panne s'appuie sur 2,3 ou plus de portique

geom(i) = type de portique

- i=1 appenti
- i=2 portique symétrique - pente symétrique
- i=3 Portique symétrique - Pente asymétrique
- i=4 Portique asymétrique - Pente symétrique
- i=5 Portique asymétrique - Pente asymétrique

PiedG = indique pour le poteau gauche du portique du hall i, le type de pied ; =1 pied de poteau articulé, =2 pied de poteau encastree

PiedD(i) = indique pour le poteau droit du portique du hall i, le type de pied ; =1 pied de poteau articulé, =2 pied de poteau encastree

JarretG(i) = indique pour le poteau gauche du portique du hall i, le type de jarret ; =1 pas de jarret, l'arba vient se connecter au poteau sans renforcement, =2 existence d'un jarret par renforcement de l'arba par un profilé en I, exemple : arba en IPE300 renforcé d'un demi IPE300 sur une longueur de 2 m

JarretD(i) = idem que pour le poteau gauche, mais cette fois-ci appliqué au poteau droit

Onglet Profilé :

type_Portique = indique le type de portique à calculer,

- = 1 : portique courant, reprenant une largeur complète de travée.
- =2 : portique de rive, reprenant une ½ largeur de travée.

Arba(i) = indique le profilé pour l'arba du hall i

PotG = indique le profilé pour le poteau gauche du hall 1

PotD(i) = indique le profilé pour le poteau droit du hall i, sachant qu'il sera identique au profilé du poteau gauche du hall i+1

ModArba(i) = indique le type de profilé pour l'arba du hall i, =1 :IPE ; =2 :HEA ; =3 :PRS

ModPotG = indique le type de profilé pour le poteau gauche du hall 1, =1 :IPE ; =2 :HEA ; =3 :PRS

ModPotD(i) = indique le type de profilé pour le poteau droit du hall i, sachant qu'il sera identique au type de profilé du poteau gauche du hall i+1, =1 :IPE ; =2 :HEA ; =3 :PRS

PR(i) = indique pour le hall i, la présence ou pas d'un pont-roulant, =true si pont-roulant ; =false si pas de pont-roulant

Neige :

Altitude = altitude du lieu d'implantation

RegNeige = region d'implantation de la construction vis à vis de la carte neige

Sn(i) = charge de neige caractéristique sans phénomène d'accumulation, i est le numéro du versant avec i prenant pour valeur :

- hall 1 versant gauche : i=1
- hall 1 versant droit : i=2
- hall 2 versant gauche : i=3
- hall 2 versant droit : i=4
- etc. ...

Sa(i)= charge de neige exceptionnelle sans phénomène d'accumulation, i est le numéro du versant suivant même découpage que ci-avant

Snacc(j, i) = charge de neige caractéristique avec phénomène d'accumulation, la charge est trapézoïdale, i est le numéro du versant suivant le même découpage que précédemment; j= 1 ou 2 suivant que c'est le début (=1) ou la fin du versant (=2) ; la charge avec accumulation est triangulaire.

Sa_acc(j, i)= idem que ci-dessus pour la charge de neige exceptionnelle

Vent :

RegVent= region d'implantation de la construction vis à vis de la carte vent

CatVent = catégorie de terrain environnant la construction pour le calcul du coefficient de rugosité

Dominant = indique si le bâtiment possède une façade avec une ouverture dominante (Voir EC1 pour la définition), prend la valeur True si oui, False si non

Ouvert= indique si le bâtiment est calculé avec une ouverture ouverte ou pas (Voir EC1 pour la définition), prend la valeur True si oui, False si non

SalpG = aire totale des ouvertures (portes et fenêtres) implantées dans le longpan gauche

SalpD = aire totale des ouvertures (portes et fenêtres) implantées dans le longpan droit

SapigB = aire totale des ouvertures (portes et fenêtres) implantées dans le pignon bas

SapigH = aire totale des ouvertures (portes et fenêtres) implantées dans le pignon haut

OroCas= catégorie de terrain sur lequel est implanté la construction pour le calcul du coefficient d'orographie

Coro = coefficient d'orographie (voir EC1-1)

Zeref = hauteur de référence (voir EC1-1)

CsCd = coefficient structural (voir EC1-1)

Cseason = coefficient de saisonnalité (voir EC1-1)

Cdir = coefficient de direction (voir EC1-1)

ValCpi = détermine si

- = 1 ; Cpi calculé suivant disposition 7.2.9(5) et 7.2.9(6)
- = 2, le Cpi prends 2 valeurs : +0,2 et -0,3
- = 3, les Cpi sont renseignés directement

pVent(cas, ele, i, j,k)= pression de vent

- cas indique le numéro de cas traité. 5 cas ont été identifiés. Si la structure est symétrique, les cas 3 et 4 sont redondants avec les cas 1 et 2.
cas 1 du vent : vent G/D sur long-pan + Surpression intérieure
cas 2 du vent : vent G/D sur long-pan + Dépression intérieure
cas 3 du vent : vent D/G sur long-pan + Surpression intérieure
cas 4 du vent : vent D/G sur long-pan + Dépression intérieure
cas 5 du vent : vent sur pignon + surpression intérieure
- ele = indique le n° d'éléments sur lequel s'applique la pression
- i = indique la localisation de la pression
 - o = 1 pour pression à l'origine de l'élément,
 - o = 2 pour pression à l'extrémité de l'élément,
 - o = 3 pour la 1^{ière} pression intermédiaire

- o = 4 pour la 2^{ième} pression intermédiaire, permet d'indiquer au logiciel que plusieurs pressions s'appliquent sur l'élément
- j=1 ou 2, si j=1, il s'agit de la pression appliquée sur un portique de rive, sinon sur un portique intermédiaire.
- K = indice de la pression du vent sur la structure. Pour certain type de toiture, les coefficient de pression peuvent prendre plusieurs valeurs et le règlement demande de faire la vérification avec l'ensemble des valeurs. K est égal à nb_Cpe

xv1(cas,ele)=en coordonnées absolues, coordonnée du changement de pression, coordonnées du premier changement de pression, correspond à la 1^{ière} pression intermédiaire

xv2(cas,ele)=en coordonnées absolues, coordonnée du changement de pression, coordonnées du deuxième changement de pression, dans le cas où l'élément est suffisamment long pour que s'applique 3 pressions différentes.

Nb_Cpe(cas,hall) = nombre de Cpe différents sur une même zone de pression et sur le même hall. Exemple : Cpe,10 pour la zone I en toiture-terrasse qui prend la valeur +0,2 et -0,2, le nombre de Cpe peut varier suivant le cas traiter. Ainsi, pour une toiture en 1 versant de 30° d'inclinaison, le vent sur la rive basse engendre 2 Cpe à traiter.

Module convertisseur

NcombELS = indice à partir duquel démarre les combinaisons ELS

NcombELS1 = indice à partir duquel démarre les combinaisons ELS comprenant les charges permanentes

Feuille Eurocode

FFlp = force sur aire F suivant découpage Eurocode toiture-terrasse, vent perpendiculaire au longpan

FGlp = force sur aire G suivant découpage Eurocode toiture-terrasse, vent perpendiculaire au longpan

Fhlp = force sur aire H suivant découpage Eurocode toiture-terrasse, vent perpendiculaire au longpan

FIlp = force sur aire I suivant découpage Eurocode toiture-terrasse, vent perpendiculaire au longpan

FFlpi = force sur aire F suivant découpage Eurocode toiture-terrasse, vent parallèle au longpan, perpendiculaire au pignon

FGlpi = force sur aire G suivant découpage Eurocode toiture-terrasse, vent parallèle au longpan

Fhlpi = force sur aire H suivant découpage Eurocode toiture-terrasse, vent parallèle au longpan

FIlpi = force sur aire I suivant découpage Eurocode toiture-terrasse, vent parallèle au longpan

8-1-2 Classement par ordre alphabétique

ddl_noe(i,j) = indique les déplacements autorisés pour chaque nœud i suivant la direction j. j prends les valeurs de 1 à 6 sachant que :

J=1 -> déplacement suivant x

J=2 -> déplacement suivant y

J=3 -> déplacement suivant z

J=4 -> rotation autour de l'axe Ox

J=5 -> rotation autour de l'axe Oy

J=6 -> rotation autour de l'axe Oz

Ddl_noe(i,j) prends 2 valeurs:

- ➔ 0 : déplacement interdit
- ➔ 1 : déplacement autorisé