



M2
Conception des Ouvrages d'Art et
Bâtiments

INITIATION

à

ROBOT Structural Analysis

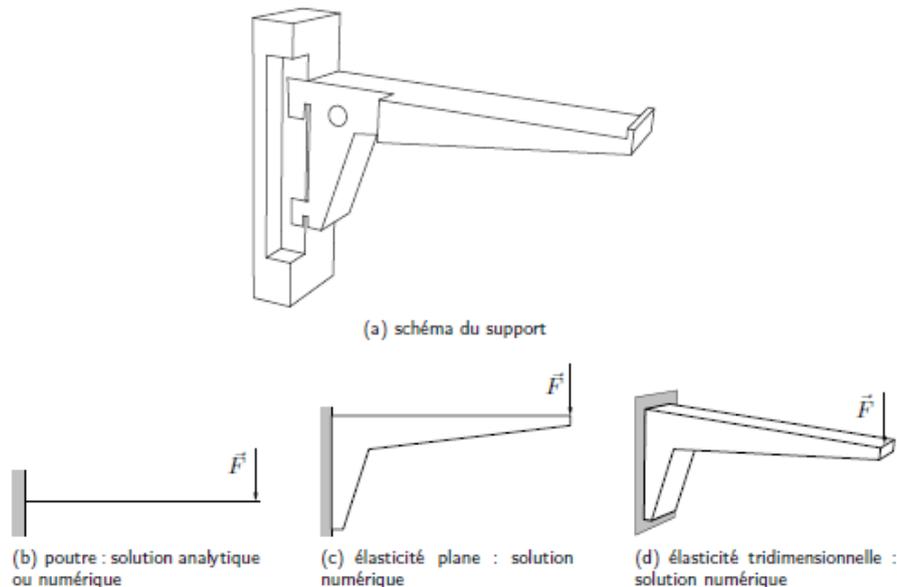
Thomas STABLON

1. PRINCIPES GENERAUX DE MODELISATION

Il est de plus en plus courant d'avoir recours à une modélisation numérique pour la conception, le calcul et la vérification des ouvrages de génie civil.

Le choix de l'outil et la manière dont la démarche de modélisation est menée jouent un rôle essentiel dans la qualité, la pertinence et l'efficacité des études.

La validité des résultats obtenus dépend de la pertinence des choix réalisés lors de la modélisation.



Exemple d'approche de modélisation

1.1. Données d'entrée

La qualité des données d'entrée est un élément majeur impactant fortement la qualité des résultats. Il convient de préciser nature, origine et niveau de précision des données d'entrée :

- Environnement du projet et interfaces avec d'autres intervenants,
- Géométrie,
- Matériaux,
- Types et modes d'application des charges.

Aussi, il convient de déterminer si les phases provisoires sont déterminantes et d'identifier l'utilité, la pertinence, de leur prise en compte.

Enfin, il faut déterminer les résultats attendus, attachés à un besoin technique ou à une demande spécifique client, et l'utilisation (post traitement) prévue.

Le choix du type de modélisation, du logiciel ainsi que les détails de modélisation sont directement corrélés aux données d'entrée et aux objectifs souhaités.

1.2. Choix du type de modélisation

Une fois les données d'entrée et le type de résultats souhaités sélectionnés, la typologie de modélisation peut-être déterminée. Elle est principalement fonction de :

- Phase d'étude : La précision du modèle varie suivant la phase d'étude (préliminaire, AVP, PRO, EXE, ...),
- Représentation comportement réel de la structure et/ou facilité de l'exploitation des résultats (modèle à barre, en coque, en volume),
- Pérennité des outils employés : qui utilisera encore le logiciel dans 10 ans ?

Aussi, il convient de porter une attention particulière au :

- mode de discrétisation,
- éléments de structure à ne pas modéliser,
- échelle et type de modélisation approprié aux objectifs,
- modèle local et/ou global,
- nécessité de plusieurs modèles.

Un seul leitmotiv : « Faire Simple ! »

1.3. Préparation du modèle

La préparation du modèle s'articule autour de :

- Géométrie,
- Matériaux constitutifs,
- Type d'élément employé,
- Phasage de construction,
- Limites du logiciel retenu,
- Modes de représentation graphique et édition des résultats,
- Points de lecture des efforts (au nœud/au centre des éléments),
- Mode et points d'application des charges,
- Conditions entre le modèle et le milieu extérieur (appuis),
- Discrétiser plus finement certaines zones,
- Nécessité de transférer des efforts d'un modèle à un autre.

1.4. Importance de la note de modélisation

Il est primordial de répertorier clairement l'ensemble des données et choix d'une modélisation et de consigner tous les éléments nécessaires à la reconstitution d'un calcul équivalent. Tous ces éléments du dossier n'ont pas forcément à être transmis au client, mais ils doivent constituer un dossier accessible pour tout audit technique, reprise de modèle ou suite à sinistre. De même que l'on conserve les plans d'une structure, il convient de conserver l'ensemble des informations qui ont été collectées pour établir une modélisation. Aussi, il est important de documenter cette note de modélisation avec un maximum de représentations pertinentes du modèle entier et éventuellement de parties permettant de comprendre dans les détails la modélisation (géométrie, cas de charges, calcul des cas test, état déformé ...).

Ainsi, les hypothèses, les règles de numérotation choisies, les choix de certaines options doivent être consignés dans une note de modélisation (tout ou partie de cette note pourra être transmise au client pour faciliter l'exploitation des résultats). Cette note de modélisation doit permettre à l'auteur ou à une autre personne de reprendre le modèle, de le modifier, de le compléter. Le successeur éventuel a à sa charge de documenter toutes les modifications apportées.

Pour cela, les principaux chapitres d'une note de modélisation sont :

- 1- Données d'entrée disponibles
- 2- Règlements de référence
- 3- Géométrie avec :
 - a. Repère
 - b. Position des nœuds (inclure un listing et une vue explicitant les numéros des nœuds)
 - c. Définition des éléments par sous-groupe (inclure un listing et une vue explicitant les numéros des barres, plaques, volumes)
 - d. Définition des appuis
- 4- Caractéristiques des barres
- 5- Matériaux
- 6- Validation du modèle (inclure le(s) cas-test simple et la descente de charge sous poids propre)
- 7- Charges considérées (permanentes et surcharges)
- 8- Combinaisons

La note de modélisation est à rédiger au fur et à mesure de la conception du modèle. La note de calcul est un document, indépendant ou non de la note de modélisation, présentant les résultats du calcul et les vérifications réglementaires associées.

1.5. Validation du modèle

Tout modèle numérique, avant son exploitation, doit être vérifié. La validation du modèle passe par des cas-tests simples dont les résultats sont à comparer aux valeurs attendues :

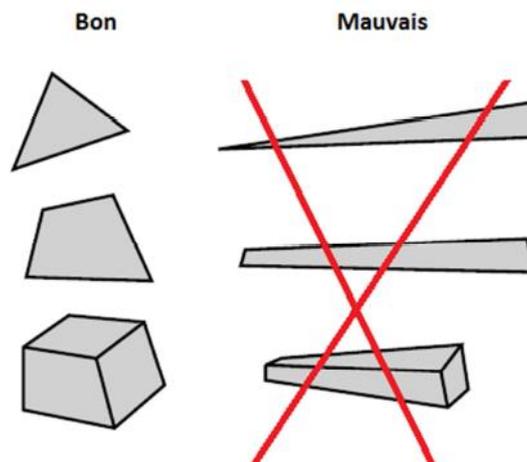
- Validation de la descente de charge,
- Représentation de la déformée sous poids propre,
- Validation des résultats obtenus sous chargement unitaire simple (par ex : charge ponctuelle centrée, charge surfacique unitaire,...),
- Représentation de la déformée sous cas simple.

Toute anomalie doit faire l'objet d'une recherche active de résolution : il faut en comprendre l'origine et corriger.

1.6. Recommandations et pièges à éviter

Les recommandations usuelles sont :

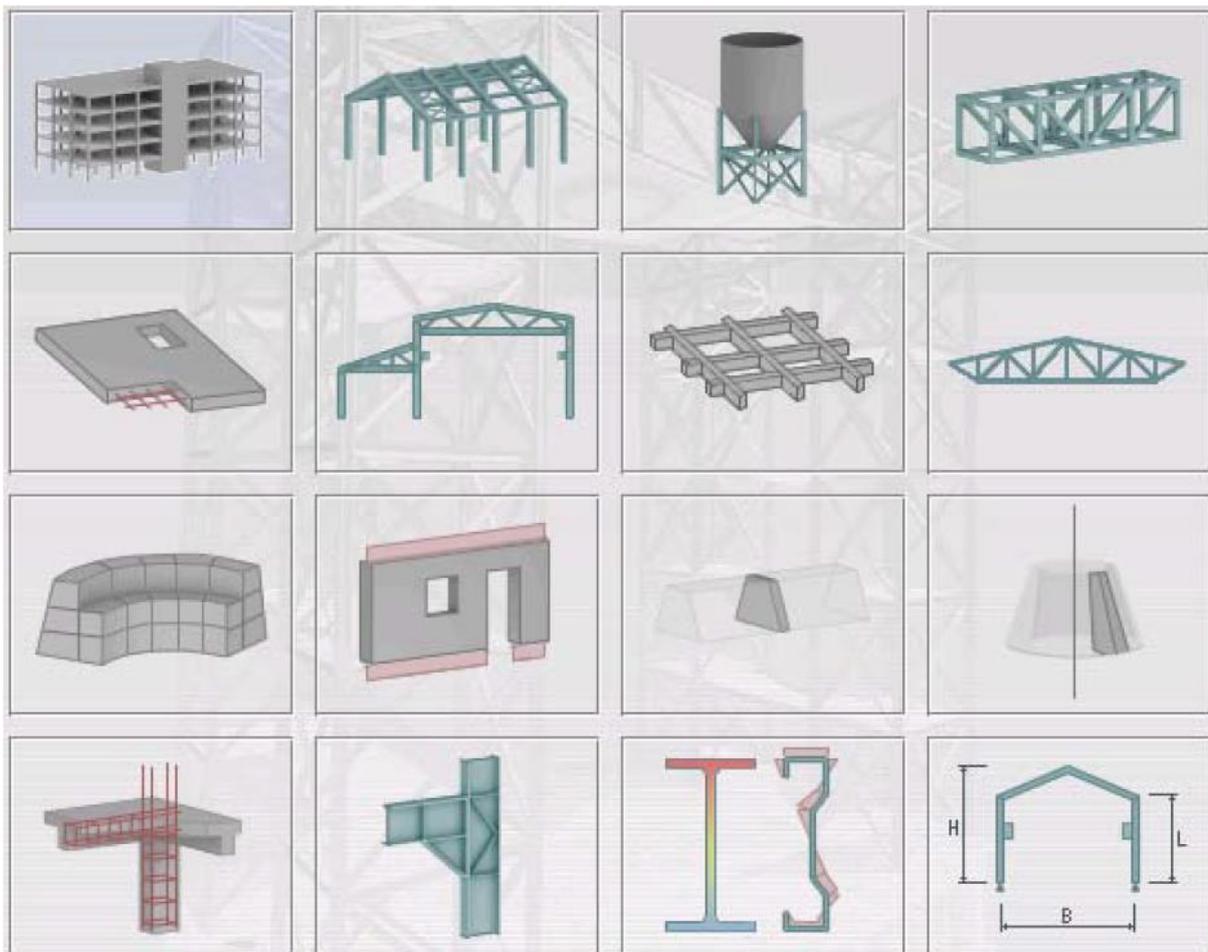
- Généralités :
 - Ne pas foncer tête baisser. Prendre le temps de la réflexion préalable. Par ex, un portique en béton ne se modélisera pas nécessairement comme un portique en charpente métallique pour des raisons de comportement des liaisons entre pièces ou de points de lecture des efforts.
 - Prêter une attention particulière à chaque phase du projet (en fonction de la précision requise) nécessite une modélisation adaptée. Une modèle EP ne peut correspondre à une phase PRO-DCE,
 - Se référer à un expert pour l'utilisation de certaines options complexes (méthode de convergence,
- Géométrie :
 - Choisir des éléments dont la géométrie est uniforme (pas trop élancée)
 - Ne pas utiliser des éléments « trop (ou trop peu) raides » - Eviter les variations de raideurs,
 - Prêter une attention particulière à l'homogénéité de la taille du maillage et tester son influence sur les résultats,
- Chargement :
 - Chargement incorrect avec, par ex, orientation erronée des actions,
- Ferrailage :
 - Pour le calcul de ferrailage, penser au décalage de la courbe des moments,
 - Dans les logiciels le permettant, toujours vérifier la logique de ferrailage automatique.



2. DEMARRAGE DE ROBOT

Le système **ROBOT** regroupe plusieurs modules spécialisés dans chacune des étapes de l'étude de la structure (création du modèle de structure, calcul de la structure, dimensionnement). Les modules fonctionnent dans le même environnement.

Après le lancement du système **ROBOT** (pour ce faire, cliquer sur l'icône approprié affiché sur le bureau ou sélectionner la commande appropriée dans la barre des tâches), la fenêtre représentée ci-dessous est affichée. Dans cette fenêtre, vous pouvez définir le type de la structure à étudier, ouvrir une structure existante ou charger le module permettant d'effectuer le dimensionnement de la structure.



Les douze premières icônes servent à sélectionner le type de structure :



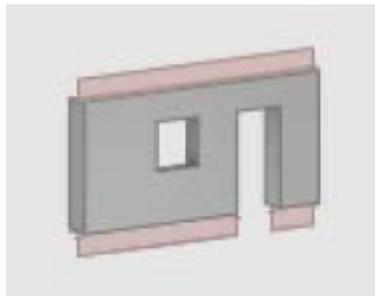
Etude d'un Portique



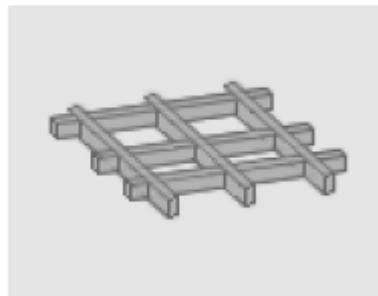
Etude d'une Coque



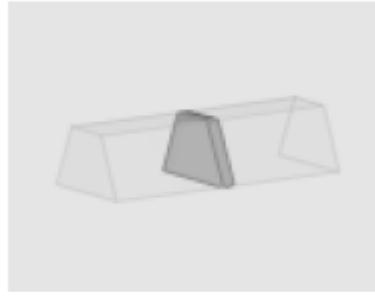
Etude d'un Treillis Plan



Etude en Contraintes Planes



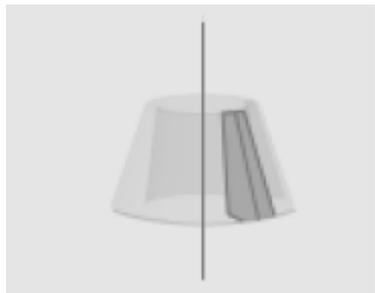
Etude d'un Grillage



Etude en Déformations Planes



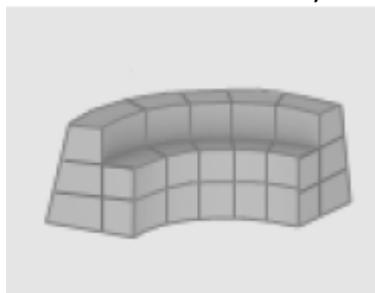
Etude d'un Treillis Spatial



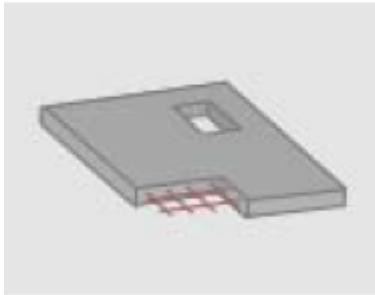
Etude d'un Structure Axisym.



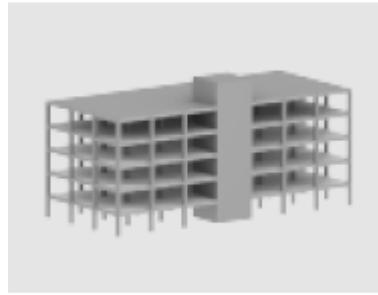
Etude d'un Portique Spatial



Modélisation en Volumiques



Etude d'une Plaque



Conception d'un bâtiment

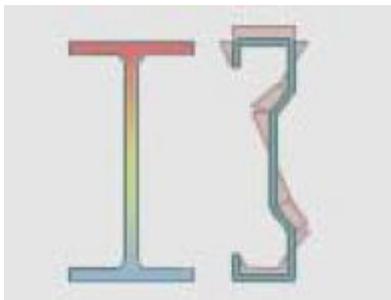
La dernière ligne concerne :



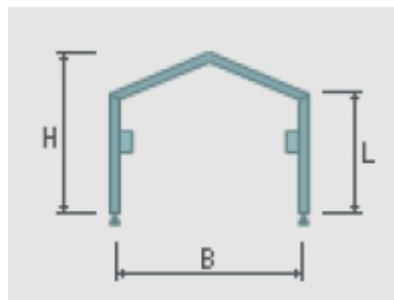
Dimensionnement des éléments des structures BA



Dimensionnement assemblages acier



Etude de caractéristique de section

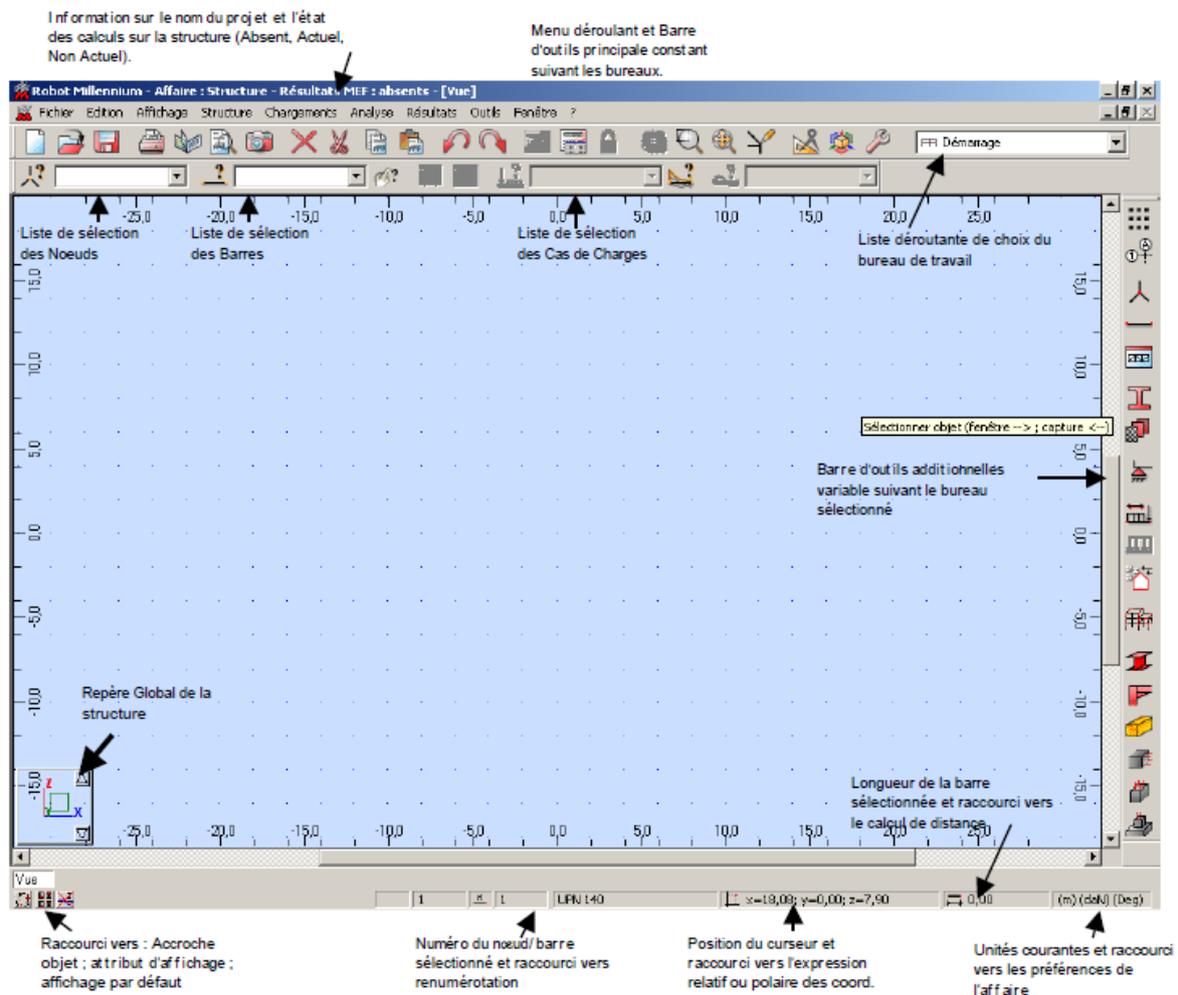


Création d'une structure type simple

Après la sélection de l'une de ces options, les paramètres du logiciel *Robot* sont adaptés aux fonctions du module réglementaire sélectionné ou au type de structure sélectionné. En fonction de l'objectif et du mode de fonctionnement du module, le logiciel affiche soit la fenêtre de l'éditeur graphique dans laquelle vous pouvez effectuer la saisie, soit le bureau spécifique adapté aux fonctions du module.

3. L'ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL

Une fois un type de structure sélectionné, vous arrivez à l'écran ci-dessous avec un certain nombre de zones utiles à connaître pour le déroulement de votre modélisation et de l'exploitation des résultats.



Le principe fondamental de **ROBOT** est la gestion par bureaux qui va vous guider à travers les étapes essentielles de modélisation, d'exploitation de résultats et enfin du dimensionnement métier.

La sélection d'un bureau se fait à l'aide de la liste déroulante principale se trouvant en haut et à droite de votre écran (le bureau de départ se nommant : Démarrage).

La barre d'outils de droite correspond à des fonctions additionnelles relatives au bureau dans lequel vous vous trouvez.

L'autre fonctionnalité indispensable aux manipulations sous **ROBOT** est l'utilisation du **Menu contextuel** accessible par un simple clic droit sur la souris.

Lors du travail dans l'éditeur graphique ou dans un tableau, un clic sur le bouton droit de la souris ouvre un menu contextuel supplémentaire qui affiche les commandes les plus souvent utilisées.

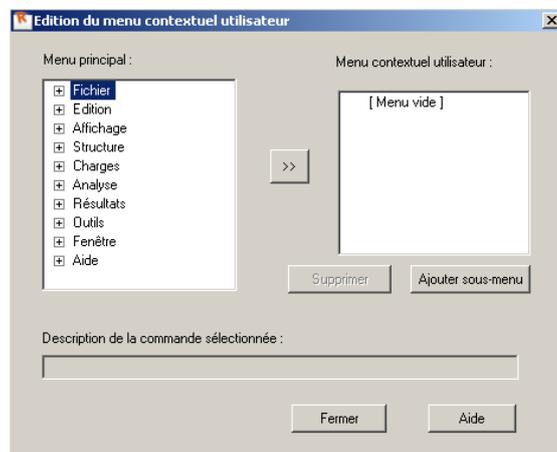
Par exemple, la figure ci-dessous représente le menu contextuel qui s'ouvre après un clic sur la zone graphique du bureau **Démarrage**.



Le menu contextuel de **ROBOT** est personnalisable de façon à rajouter de nouvelles fonctions propres à votre métier ou à l'utilisation de **ROBOT**.

Pour cela, dans le menu déroulant Outils, choisissez **Personnaliser** et **Personnaliser menu contextuel**.

Il vous reste alors à rechercher, dans l'arborescence proposée, la fonction que vous souhaitez choisir et à la glisser à droite de l'écran :



La même manipulation peut être effectuée pour personnaliser les barres d'outils liées au bureau, toujours à l'aide du Menu déroulant **Outils/Personnaliser/Personnaliser Barre d'outils**.

4. LE PRINCIPE DES BUREAUX

Il est fortement conseillé d'utiliser le plus possible le système de bureaux mis en place dans **ROBOT**. Il vous permettra d'acquérir une méthode de travail rapide et efficace.

Vous remarquerez que les fenêtres constitutives d'un bureau sont protégées contre la fermeture. En effet, il n'y a pas de raison de fermer une fenêtre : si vous voulez la fermer cela signifie que vous voulez faire autre chose, donc changez de bureau.

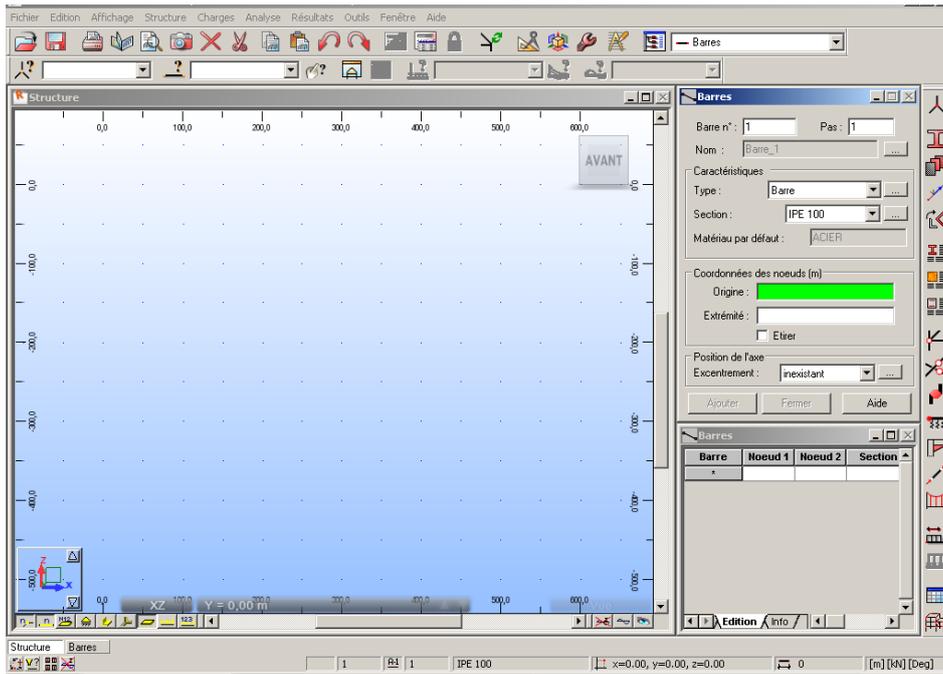
Néanmoins, les fenêtres ne sont pas protégées contre le déplacement ou la réduction. Si vous êtes loin de la configuration initiale de votre bureau, vous pouvez donc réinitialiser la configuration par défaut du bureau en allant dans le menu déroulant **Outils/Personnaliser/Réinitialiser** à partir du modèle.

Dans le système **ROBOT**, le mécanisme de bureaux prédéfinis a été créé afin de rendre la définition de la structure plus facile et plus intuitive. Evidemment, vous n'êtes pas obligés d'utiliser ce mécanisme. Toutes les opérations effectuées dans le système **ROBOT** peuvent être réalisées sans recourir aux bureaux définis.

Le choix des bureaux se fait en ouvrant la liste déroulante des bureaux et en cliquant sur le bureau choisi afin d'effectuer la tâche précise correspondante :



A titre d'exemple, vous pouvez voir la composition du bureau **Barres** :



5. LE REGLAGE DES PREFERENCES

Il est à noter que toutes les langues ne sont pas accessibles dans la version de base, il s'agit de modules de langues supplémentaires que vous pouvez acquérir.

La partie correspondant à la protection du logiciel vous permet de rentrer un code faisant évoluer le logiciel (augmentation du nombre de barres, modules supplémentaires, ...) pour les versions anciennes. Pour les autres, il n'y a pas besoin de lancer le logiciel. Il suffit d'aller dans :

« Démarrer / programmes / Robot structural office / tools / protection - paramètre » ou dans « Démarrer / programmes / Robot office / tools / protection paramètre »

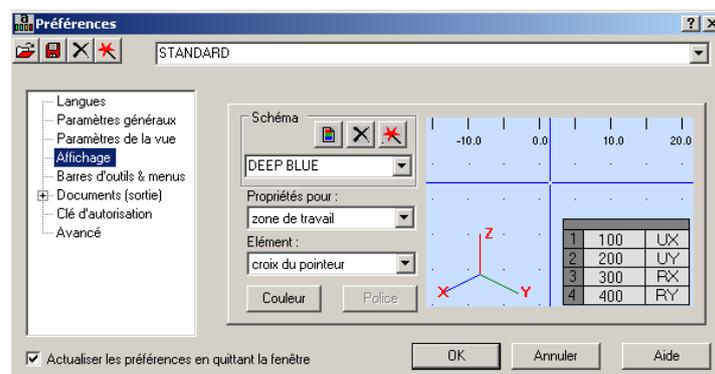
La personnalisation vous permet de changer le nom sur la CLE et non uniquement sur le poste de travail, ce nom apparaît à chaque démarrage de **ROBOT** et correspond au nom d'utilisateur apparaissant par défaut sur les notes de calcul.

Afin de définir les paramètres de travail du système **ROBOT**, vous pouvez utiliser deux options : **Préférences** et **Préférences de l'affaire**.

• Les préférences

Pour y accéder, aller dans **OUTILS**. Les **Préférences** a contrario des **Préférences de l'affaire** vous permettront de changer les paramètres gérant la forme du logiciel : couleur, polices, tailles des icônes, etc.

Dans la boîte de dialogue **Préférences** représentée sur la figure ci-dessous, vous pouvez définir les paramètres de base du logiciel. Afin d'ouvrir la boîte de dialogue, vous pouvez sélectionner dans le menu déroulant **Outils** puis **Préférences**.



La boîte de dialogue représentée ci-dessus se divise en plusieurs parties, notamment :

- La partie supérieure de la boîte de dialogue regroupe quatre icônes et le champ de sélection de fichiers de préférences. Par défaut, le nom des préférences actuelles est affiché. Dans ce champ, vous pouvez sélectionner un fichier de préférences existant ; pour cela, cliquez sur la flèche à droite du champ et sélectionnez les préférences appropriées à vos besoins dans la liste déroulante.
- La partie gauche de la boîte de dialogue **Préférences** contient une arborescence qui affiche la liste des options que vous pouvez personnaliser. Pour cela, cliquez sur le bouton gauche de la souris sur la position que vous voulez modifier.

- Dans la partie droite de la boîte de dialogue **Préférences** se trouve la zone dans laquelle vous pouvez définir les paramètres spécifiques du logiciel, l'aspect de cette zone varie en fonction de la sélection effectuée dans l'arborescence de gauche.

• **Les préférences de l'affaire**

Les préférences de l'affaire vous permettent de changer le fond de votre étude à savoir les unités, les matériaux, les normes, etc.

Tout comme les Préférences, vous y accédez dans le menu déroulant Outils.

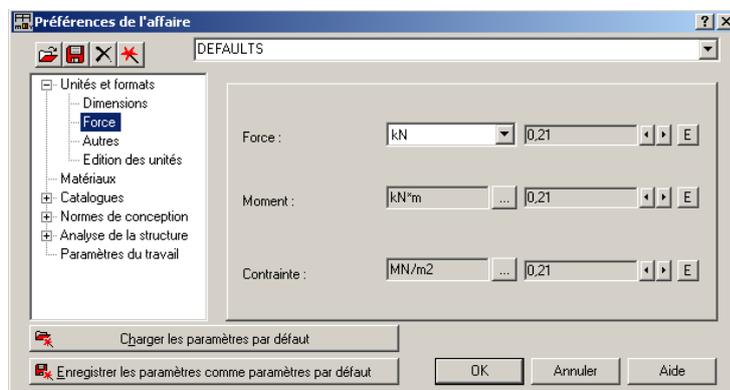
Vous naviguez dans l'arborescence de **ROBOT** afin de régler les différentes unités de Forces, Dimensions et Normes.

Réglage des unités :

Les unités utilisées sont celles qui sont employées dans la pratique de la charpente métallique. Elles sont parfois différentes des unités « légales » (Système International SI), ces dernières étant dans certains cas inadaptées, car disproportionnées par rapport aux ordres de grandeur des valeurs couramment rencontrées.

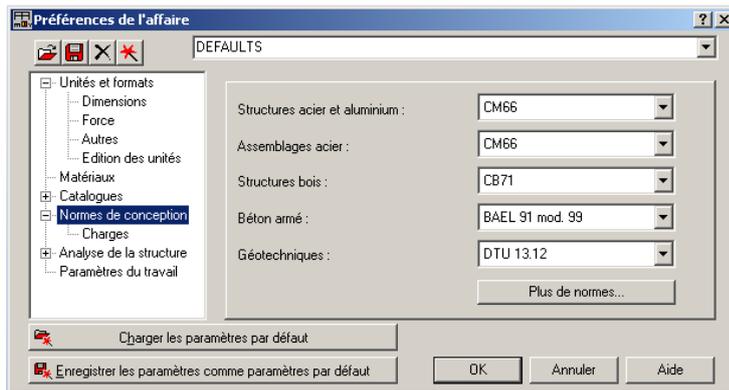
En outre, nous assimilons les décaNewtons aux kilogrammes ($1 \text{ daN} = 1 \text{ kg}$), alors qu'en toute rigueur $1 \text{ daN} = 1.02 \text{ kg}$ (car $g = 9.81 \text{ m/s}^2$). L'erreur commise, de 2%, est négligeable, compte tenu de la précision générale des calculs.

La fenêtre de réglage des unités est présentée sur la figure ci-dessous. Les indications à droite des entrées d'unités correspondent au nombre de chiffres après la virgule souhaitée.



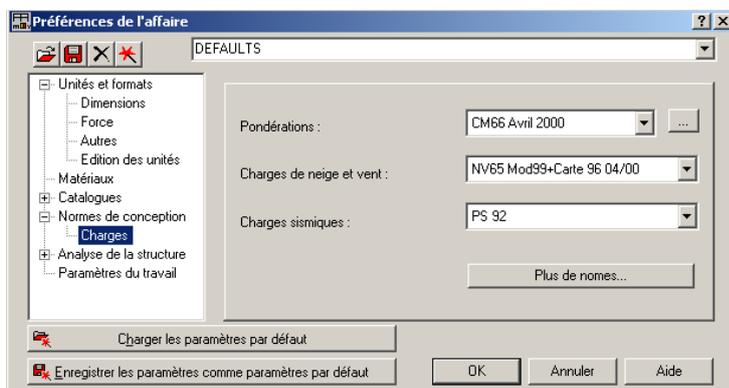
Réglage des normes :

La fenêtre de réglage des normes est présentée sur la figure ci-après :



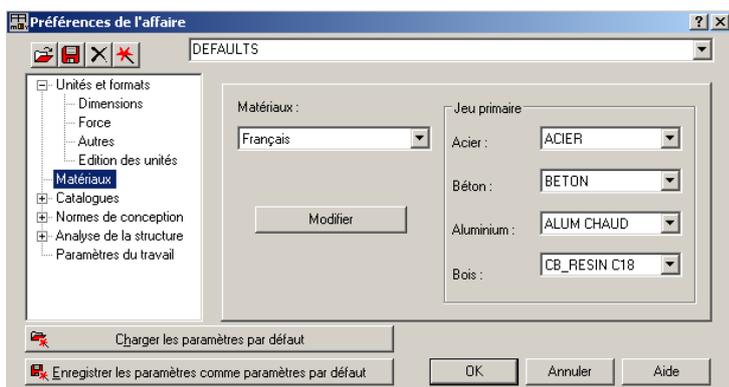
Attention : le chapitre **Norme de conception** cache une sous-arborescence que vous pouvez afficher en cliquant sur le petit +.

Le sous-chapitre **Charges** apparaît et permet de définir notamment les paramètres d'actions du vent et le règlement de pondération utilisé (il peut être différent de la norme de dimensionnement).



Matériaux :

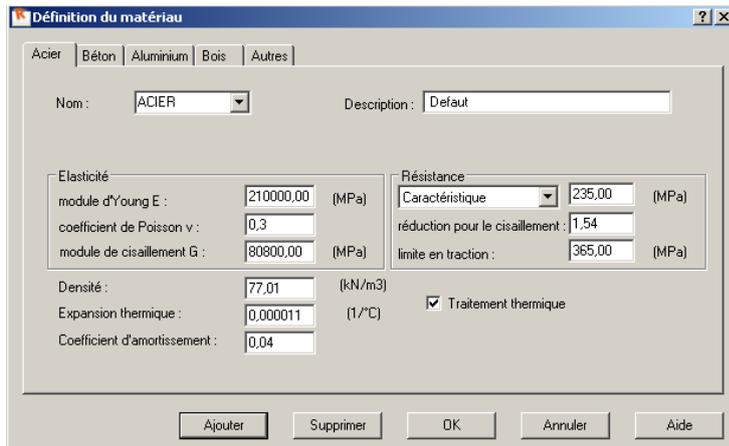
La fenêtre des préférences relatives aux matériaux est présentée dans la figure ci-après :



Pour consulter les caractéristiques des matériaux, les modifier ou même rajouter un matériau, vous devez sélectionner dans l'arborescence **Matériaux** et cliquez sur le bouton **Modifier**.

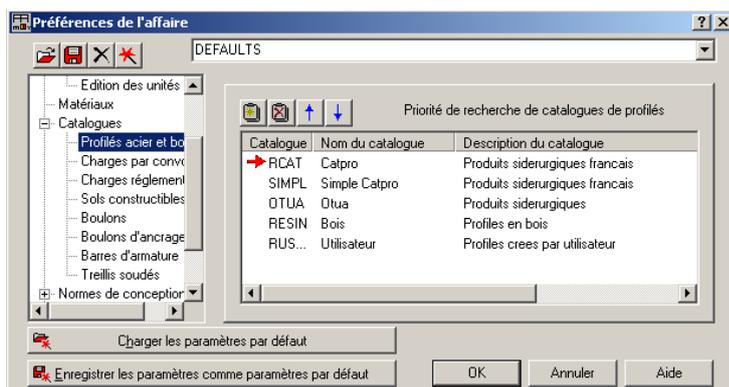
Il suffit alors de consulter ou de modifier les données en faisant **Ajouter** pour valider les modifications.

De plus, si vous souhaitez ajouter un matériau, il suffit également de modifier le nom et de valider.



Catalogue de profilés :

A propos du catalogue de profilés, les bases de données listées sont accessibles dans **ROBOT** dans l'ordre spécifié à cet endroit. Vous pouvez modifier l'ordre des catalogues pour mettre par exemple votre catalogue utilisateur en premier.



Divers :

D'autres éléments, moins importants pour la formation, sont également accessibles dans les **Préférences de l'affaire**, comme l'ajout de catalogues de profilés étrangers, les modifications des paramètres d'analyse de structure ou encore des paramètres de maillage éléments finis.

Pour consulter ces informations, nous vous invitons à lire l'aide en ligne ou le manuel d'utilisation. Dans tous les cas, nous vous conseillons de sauvegarder ce jeu de préférences de façon à le retrouver facilement en cas de modification ou de réinitialisation involontaire des préférences.

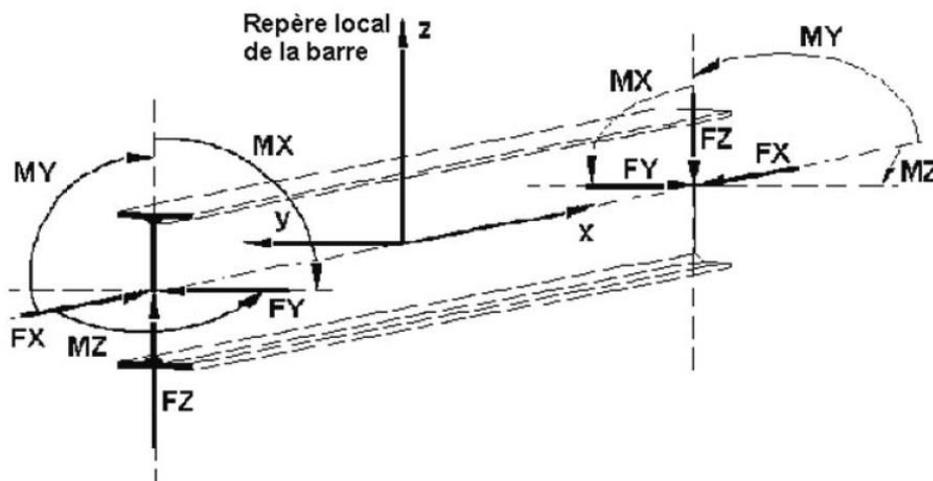
6. LES CONVENTIONS DE SIGNE

Dans le logiciel, la convention de signes pour les éléments barres est basée sur la convention des forces sectorielles. Suivant cette règle, le signe des efforts sectoriels est le même que celui des forces nodales positives appliquées à l'extrémité de l'élément produisant les mêmes effets (il s'agit des efforts dont l'orientation est conforme à l'orientation des axes du système local). Par conséquent, les efforts de compression sont positifs et les efforts de traction sont négatifs. Les moments fléchissants positifs MY provoquent la traction des fibres de la poutre se trouvant du côté négatif de l'axe local z. Les moments fléchissants positifs MZ provoquent la traction des fibres de la poutre se trouvant du côté positif de l'axe local «y».

Pour la convention de signes décrite, les sens positifs des efforts sont représentés de façon schématique sur la figure ci-dessous.

NOTE :

Pour les portiques plans (barres 2D), la convention de signes pour les efforts internes est déterminée par rapport au repère local par défaut de la barre. La convention de signes NE CHANGE PAS lors de la rotation du repère d'un angle GAMMA.



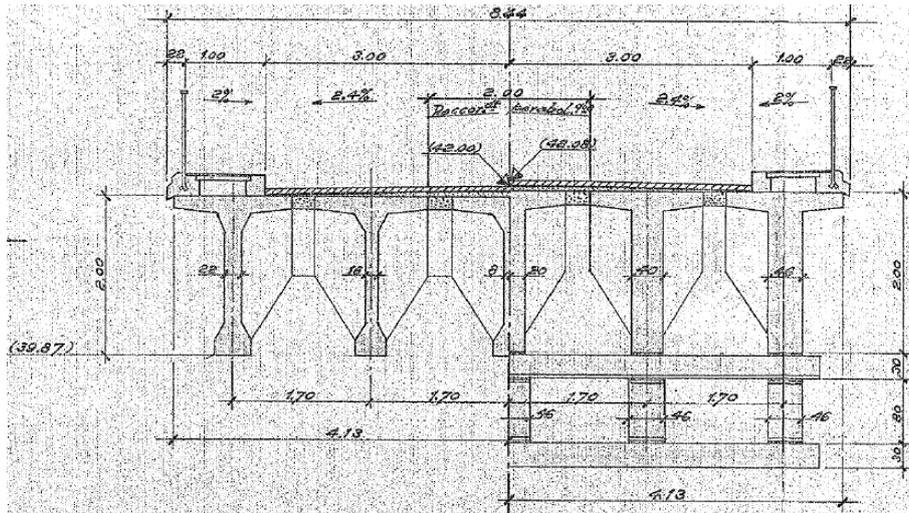
7. DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DE SECTION

7.1. Exemple 1 : Section d'une poutre de VIPP

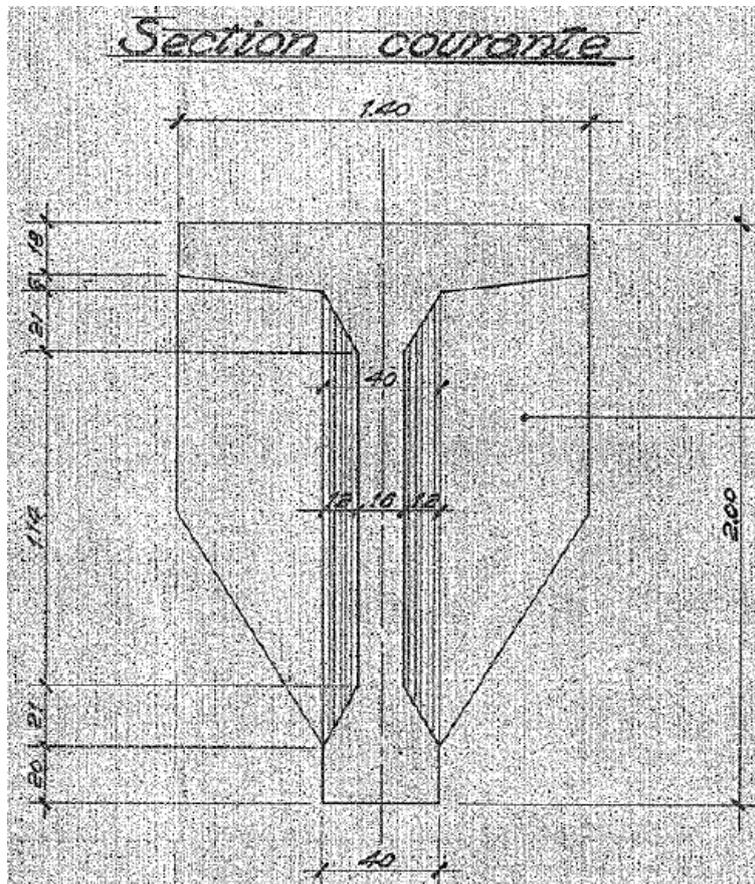
7.1.1. Contexte



Pont de la Trave en Gironde

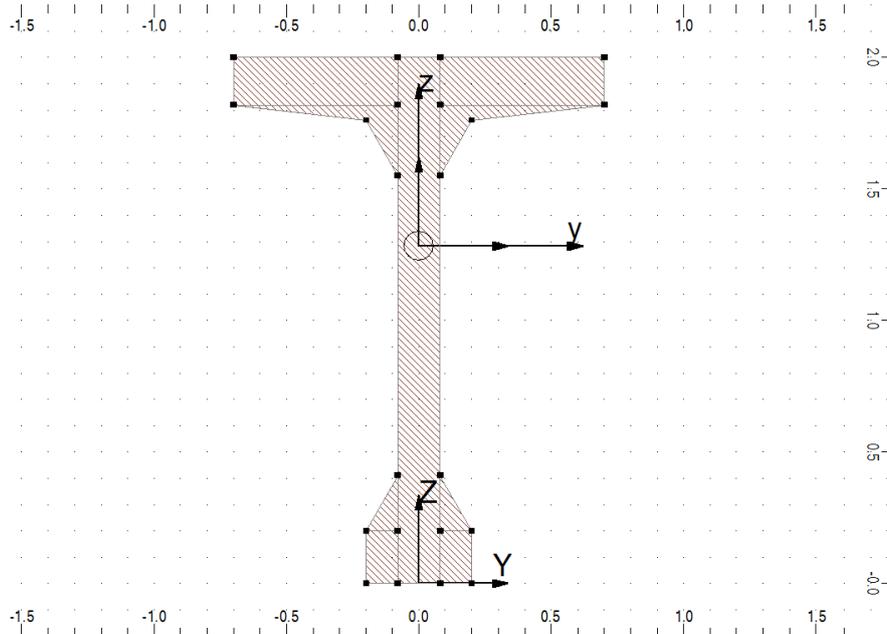


Coupe transversale du tablier



Section courante d'une poutre intermédiaire

7.1.2. Etude des caractéristiques de la section



Description de la géométrie

Point n°	Y	Z
1	-0.200 m	0.200 m
2	0.080 m	2.000 m
3	0.080 m	1.820 m
4	0.700 m	1.820 m
5	0.700 m	2.000 m
6	0.080 m	1.550 m
7	0.200 m	1.760 m
8	0.700 m	1.820 m
9	0.080 m	1.820 m
10	0.200 m	0.200 m
11	0.080 m	0.410 m
12	0.080 m	0.200 m
13	-0.080 m	2.000 m
14	-0.080 m	1.820 m
15	-0.700 m	1.820 m
16	-0.700 m	2.000 m
17	-0.080 m	1.550 m
18	-0.200 m	1.760 m
19	-0.700 m	1.820 m
20	-0.080 m	1.820 m
21	-0.200 m	0.200 m
22	-0.080 m	0.410 m
23	-0.080 m	0.200 m
24	-0.080 m	0.000 m
25	-0.080 m	2.000 m
26	0.080 m	2.000 m
27	0.080 m	0.000 m
28	-0.200 m	0.200 m
29	-0.200 m	0.000 m
30	-0.080 m	0.000 m
31	-0.080 m	0.200 m

32	0.200 m	0.200 m
33	0.200 m	0.000 m
34	0.080 m	0.000 m
35	0.080 m	0.200 m

Résultats généraux

Aire de la section	A	=	0.68600 m ²
Centre de gravité	Yc	=	0.000 m
	Zc	=	1.283 m
Périmètre	S	=	6.815 m
Matériau de base	BETON30		
	E	=	34000.00 MPa
	dens.	=	2501.36 kg/m ³
	p.un.	=	1715.94 kG/m

Repère des axes principaux

Angle	alpha	=	0.0 Deg
Moments d'inertie	Ix	=	0.01271 m ⁴
	Iy	=	0.32987 m ⁴
	Iz	=	0.04830 m ⁴
Rayons d'inertie	iy	=	0.693 m
	iz	=	0.265 m
Coefficients de rigidité en cisaillement	Ay	=	0.00000 m ²
	Az	=	0.00000 m ²
Facteurs de résistance en flexion	Wely	=	0.25706 m ³
	Welz	=	0.06899 m ³
Facteurs de résistance au cisaillement	Wy	=	0.00000 m ²
	Wz	=	0.00000 m ²
Facteurs de résistance plastique	Wply	=	0.00000 m ³
	Wplz	=	0.00000 m ³
Distances extrêmes	Vy	=	0.700 m
	Vpy	=	0.700 m
	Vz	=	0.717 m
	Vpz	=	1.283 m

Repère central

Moments d'inertie	Iyc	=	0.32987 m ⁴
	Izc	=	0.04830 m ⁴
	Iyczc	=	0.00000 m ⁴
Rayons d'inertie	iy	=	0.693 m
	iz	=	0.265 m
Distances extrêmes			

$$\begin{aligned}
 V_{yc} &= 0.700 \text{ m} \\
 V_{pyc} &= 0.700 \text{ m} \\
 V_{zc} &= 0.717 \text{ m} \\
 V_{pzc} &= 1.283 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Repère arbitraire

Position du repère

$$\begin{aligned}
 y_{c'} &= 0.000 \text{ m} & \text{Angle} &= 0.0 \text{ Deg} \\
 z_{c'} &= 1.283 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Moments d'inertie

$$\begin{aligned}
 I_{y'} &= 0.32987 \text{ m}^4 \\
 I_{z'} &= 0.04830 \text{ m}^4 \\
 I_{y'z'} &= -0.00000 \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

Rayons d'inertie

$$\begin{aligned}
 i_{yc} &= 0.693 \text{ m} \\
 i_{zc} &= 0.265 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Moments statiques

$$\begin{aligned}
 S_{y'} &= 0.00000 \text{ m}^3 \\
 S_{z'} &= 0.00000 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Distances extrêmes

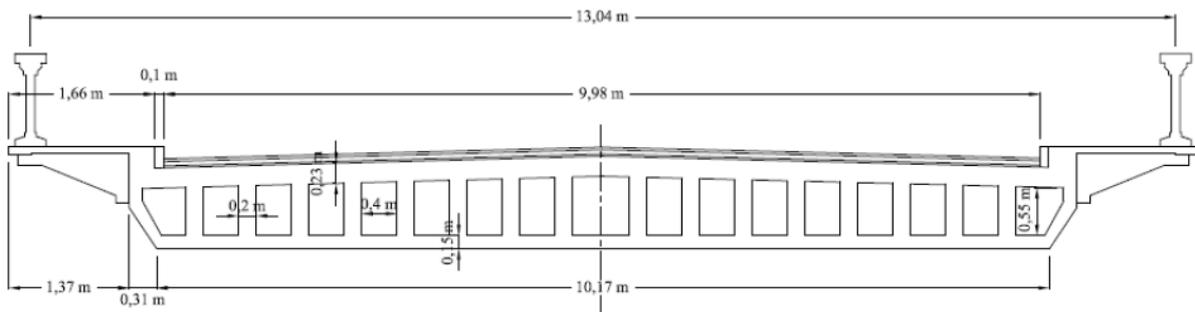
$$\begin{aligned}
 V_{y'} &= 0.700 \text{ m} \\
 V_{py'} &= 0.700 \text{ m} \\
 V_{z'} &= 0.717 \text{ m} \\
 V_{pz'} &= 1.283 \text{ m}
 \end{aligned}$$

7.2. Exemple 2 : Section d'un pont caisson

7.2.1. Contexte

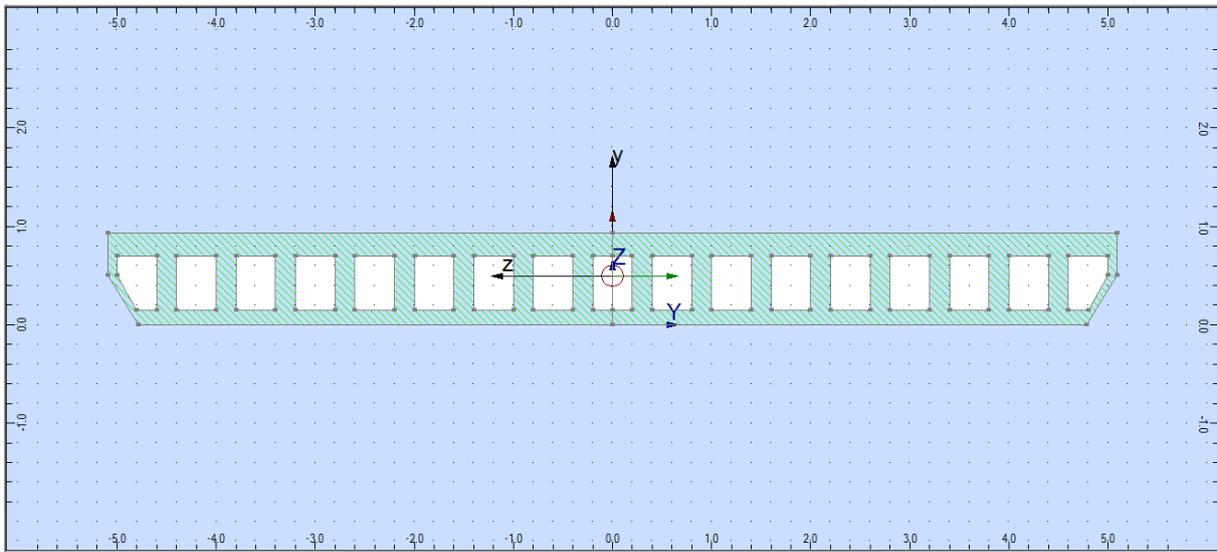


Pont de Sernam - Caisson béton armé



Coupe transversale du tablier

7.2.2. Etude des caractéristiques de la section



Description de la géométrie

Point n°	Y	Z
1	0.0 cm	0.0 cm
2	0.0 cm	0.9 cm
3	-5.1 cm	0.9 cm
4	-5.1 cm	0.5 cm
5	-4.8 cm	0.0 cm
6	0.0 cm	0.1 cm
7	0.0 cm	0.7 cm
8	-0.2 cm	0.7 cm
9	-0.2 cm	0.1 cm
11	-0.4 cm	0.1 cm
12	-0.4 cm	0.7 cm
13	-0.8 cm	0.7 cm
14	-0.8 cm	0.1 cm
15	-1.0 cm	0.1 cm
16	-1.0 cm	0.7 cm
17	-1.4 cm	0.7 cm
18	-1.4 cm	0.1 cm
19	-1.6 cm	0.1 cm
20	-1.6 cm	0.7 cm
21	-2.0 cm	0.7 cm
22	-2.0 cm	0.1 cm
23	-2.2 cm	0.1 cm
24	-2.6 cm	0.1 cm
25	-2.6 cm	0.7 cm
26	-2.2 cm	0.7 cm
27	-2.8 cm	0.1 cm
28	-2.8 cm	0.7 cm
29	-3.2 cm	0.7 cm
30	-3.2 cm	0.1 cm
31	-3.4 cm	0.1 cm
32	-3.8 cm	0.1 cm

33	-3.8 cm	0.7 cm
34	-3.4 cm	0.7 cm
35	-4.0 cm	0.1 cm
36	-4.4 cm	0.1 cm
37	-4.4 cm	0.7 cm
38	-4.0 cm	0.7 cm
39	-4.6 cm	0.1 cm
40	-4.8 cm	0.1 cm
41	-5.0 cm	0.5 cm
42	-5.0 cm	0.7 cm
43	-4.6 cm	0.7 cm
44	0.0 cm	0.0 cm
45	0.0 cm	0.9 cm
46	5.1 cm	0.9 cm
47	5.1 cm	0.5 cm
48	4.8 cm	0.0 cm
49	0.0 cm	0.1 cm
50	0.0 cm	0.7 cm
51	0.2 cm	0.7 cm
52	0.2 cm	0.1 cm
54	0.4 cm	0.1 cm
55	0.4 cm	0.7 cm
56	0.8 cm	0.7 cm
57	0.8 cm	0.1 cm
58	1.0 cm	0.1 cm
59	1.0 cm	0.7 cm
60	1.4 cm	0.7 cm
61	1.4 cm	0.1 cm
62	1.6 cm	0.1 cm
63	1.6 cm	0.7 cm
64	2.0 cm	0.7 cm
65	2.0 cm	0.1 cm
66	2.2 cm	0.1 cm
67	2.6 cm	0.1 cm
68	2.6 cm	0.7 cm
69	2.2 cm	0.7 cm
70	2.8 cm	0.1 cm
71	2.8 cm	0.7 cm
72	3.2 cm	0.7 cm
73	3.2 cm	0.1 cm
74	3.4 cm	0.1 cm
75	3.8 cm	0.1 cm
76	3.8 cm	0.7 cm
77	3.4 cm	0.7 cm
78	4.0 cm	0.1 cm
79	4.4 cm	0.1 cm
80	4.4 cm	0.7 cm
81	4.0 cm	0.7 cm
82	4.6 cm	0.1 cm
83	4.8 cm	0.1 cm
84	5.0 cm	0.5 cm
85	5.0 cm	0.7 cm
86	4.6 cm	0.7 cm

Résultats généraux

Aire de la section

Centre de gravité	A	=	5.64 cm ²
	Yc	=	-0.0 cm
	Zc	=	0.5 cm
Périmètre	S	=	21.8 cm
Matériau de base	ACIER		
	E	=	210000.00 MPa
	dens.	=	7852.83 kg/m ³
	p.un.	=	4.43 kG/m

Repère des axes principaux

Angle	alpha	=	90.0 Deg
Moments d'inertie	Ix	=	0.00 cm ⁴
	Iy	=	47.25 cm ⁴
	Iz	=	0.56 cm ⁴
Rayons d'inertie	iy	=	2.9 cm
	iz	=	0.3 cm
Coefficients de rigidité en cisaillement	Ay	=	0.00 cm ²
	Az	=	0.00 cm ²
Facteurs de résistance en flexion	Wely	=	9.28 cm ³
	Welz	=	1.13 cm ³
Facteurs de résistance au cisaillement	Wy	=	0.00 cm ²
	Wz	=	0.00 cm ²
Facteurs de résistance plastique	Wply	=	0.00 cm ³
	Wplz	=	0.00 cm ³
Distances extrêmes	Vy	=	0.4 cm
	Vpy	=	0.5 cm
	Vz	=	5.1 cm
	Vpz	=	5.1 cm

Repère central

Moments d'inertie	Iyc	=	0.56 cm ⁴
	Izc	=	47.25 cm ⁴
	Iyczc	=	0.00 cm ⁴
Rayons d'inertie	iy	=	0.3 cm
	iz	=	2.9 cm
Distances extrêmes	Vyc	=	5.1 cm
	Vpyc	=	5.1 cm
	Vzc	=	0.4 cm
	Vpzc	=	0.5 cm

Repère arbitraire

Position du repère	yc'	=	-0.0 cm	Angle =	0.0 Deg
--------------------	-----	---	---------	---------	---------

Moments d'inertie	z_c'	=	0.5 cm
	$I_{y'}$	=	0.56 cm ⁴
	$I_{z'}$	=	47.25 cm ⁴
	$I_{y'z'}$	=	-0.00 cm ⁴
Rayons d'inertie	i_{yc}	=	0.3 cm
	i_{zc}	=	2.9 cm
Moments statiques	$S_{y'}$	=	-0.00 cm ³
	$S_{z'}$	=	0.00 cm ³
Distances extrêmes	$V_{y'}$	=	5.1 cm
	$V_{py'}$	=	5.1 cm
	$V_{z'}$	=	0.4 cm
	$V_{pz'}$	=	0.5 cm

8. ETUDE D'UNE PASSERELLE METALLIQUE

8.1. Contexte de l'opération

Dans les années 1930, deux culées en béton avec finition maçonnée ont été construites pour supporter le tablier d'une voie ferrée. Les culées de l'ouvrage ont été réalisées mais le tablier n'a jamais été posé et la voie ferrée jamais mise en service.

Votre client a pour projet de créer une voie verte sur le tracé de la ligne ferroviaire. Dans ce cadre, vous avez été missionné pour l'étude d'une passerelle piétonne.

Les deux culées sont des culées en béton avec enduit de surface avec une finition de type maçonnée. Elles font 4.40 de haut et environ 5.10 m de large.



Vue générale des culées existantes



Elévation de la culée C0

Les culées existantes sont considérées dans un bon état et leur capacité structurelle est satisfaisante pour recevoir une passerelle piétonne.

Ce franchissement sera exclusivement réservé aux modes doux (piétons, cycle, PMR...), il n'est pas prévu d'utiliser cet ouvrage pour faire transiter des véhicules motorisés (d'entretien ou de tourisme). L'ouvrage devra permettre les déplacements des différents types d'utilisateurs en toute sécurité sur la voie verte au franchissement de la route en contrebas.

8.2. Caractéristiques dimensionnelles de la passerelle

Tracé en plan et implantation

De par l'implantation des culées, l'ouvrage présentera un biais d'environ 77 grad (70°). Par ailleurs, les culées sont espacées de 7.50 m biais.

Profil en long

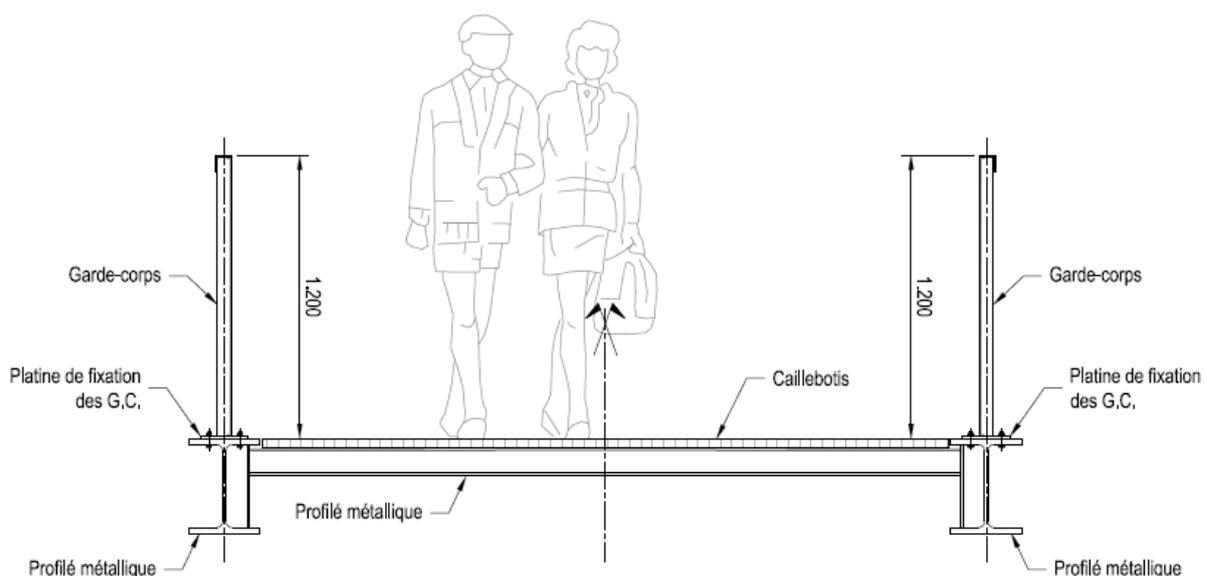
Le profil en long de la passerelle sera de pente constante de manière à permettre l'évacuation des eaux.

Profil en travers / Coupe fonctionnelle

Afin de créer un espace accueillant, une passerelle suffisamment large est envisagée pour accueillir la voie verte. La largeur utile de l'ouvrage est de 2.5 m soit un tablier de largeur environ 2.7 m hors tout.

8.3. Type de passerelle

Vous proposez une passerelle légère constituée de deux profilés métalliques principaux liés par des entretoises réparties environ tous les 1.4 m sur lesquelles reposent un platelage (bois ou métallique). Un exemple de passerelle de ce type est présenté ci-après :



8.4. Hypothèses de dimensionnement

8.4.1. Charges considérées

Les charges considérées sur la passerelle sont les suivantes :

- Poids propre de la charpente métallique : $\mu = 77 \text{ kN/m}^3$
- Poids propre du platelage : 0.50 kN/m^2
- Poids propre des garde-corps : 0.40 kN/ml
- Charges piétons : 5 kN/m^2 (cas défavorable d'une foule très dense, cf. NF EN 1991-2, §5.3.2.1(2)).

8.4.2. Combinaisons

Les combinaisons d'actions suivantes sont considérées :

- **ELS QP** : G
- **ELS Freq** : G + 0,40.qfk
- **ELS Car** : G + qfk
- **ELU Fond** : 1,35.G + 1,35.qfk

Avec G : charges permanentes ; qfk = charges piétons.

8.4.3. Vérification de la flèche

Conformément à l'EN 1993-1-1/NA Tableau 1, les flèches sont limitées à :

- A l'ELS Caractéristique : $l/200$
- Sous surcharges piétonnes uniquement : $l/300$

8.4.4. Comportement vibratoire

La détermination du critère de confort à retenir pour la passerelle et des contraintes qui en découlent est effectuée à partir du guide du SETRA : « Passerelles piétonnes – Evaluation du comportement vibratoire sous l'action des piétons » de mars 2006.

Classe de la passerelle : vous proposez de retenir la **classe III** correspondant à une « passerelle normalement utilisée, pouvant parfois être traversée par des groupes importants mais sans jamais être chargée sur toute sa surface » (cf. §2.1 du guide du SETRA pour la définition des classes).

Niveau de confort : vous proposez de retenir le niveau de **confort moyen** : « les accélérations subies par la structure sont simplement perceptibles par les usagers » (§2.2 du guide du SETRA).

Risque de mise en résonance (§2.3.1 du guide du SETRA) : vous proposez de retenir la plage 3 correspondant à un « risque faible de mise en résonance pour les situations courantes de chargement ».

Cela implique que les fréquences propres de vibration f_i doivent vérifier :

- Sens vertical et longitudinal : $f_i < 1.0 \text{ Hz}$ ou $f_i > 2.6 \text{ Hz}$
- Sens transversal : $f_i < 0.3 \text{ Hz}$ ou $f_i > 1.3 \text{ Hz}$

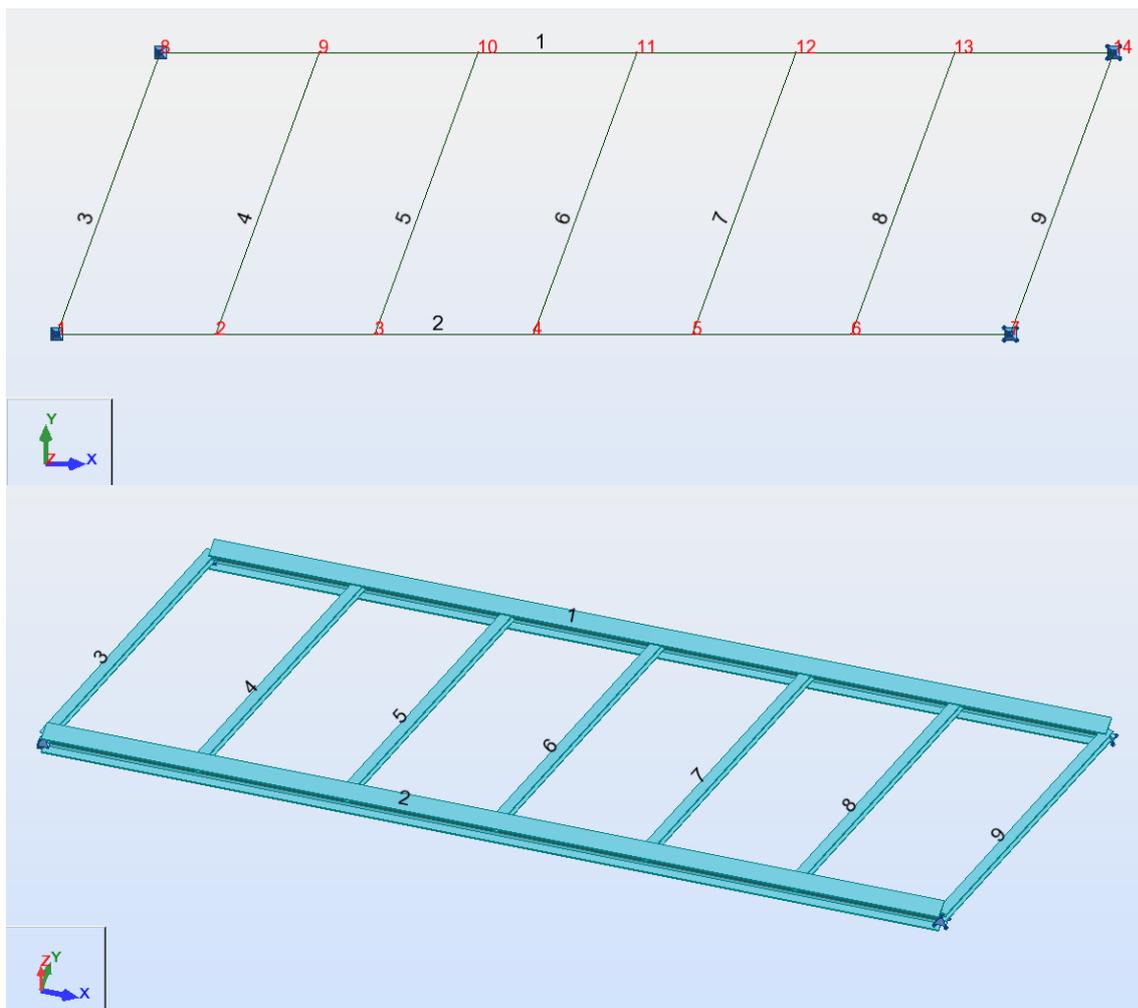
Si les conditions ci-dessus sont vérifiées, une étude dynamique de la structure n'est pas nécessaire.

8.5. Modélisation de la passerelle

8.5.1. Géométrie

Les profilés sont modélisés par des barres dont les caractéristiques sont conformes au plan. Les barres et nœuds sont présentés ci-dessous.

Les poutres principales sont simplement appuyées d'un côté et rotulées de l'autre.



8.5.2. Caractéristiques des barres

Les barres ont les caractéristiques suivantes :

- Poutres principales : HEB 240,
- Entretoises : HEB 120.

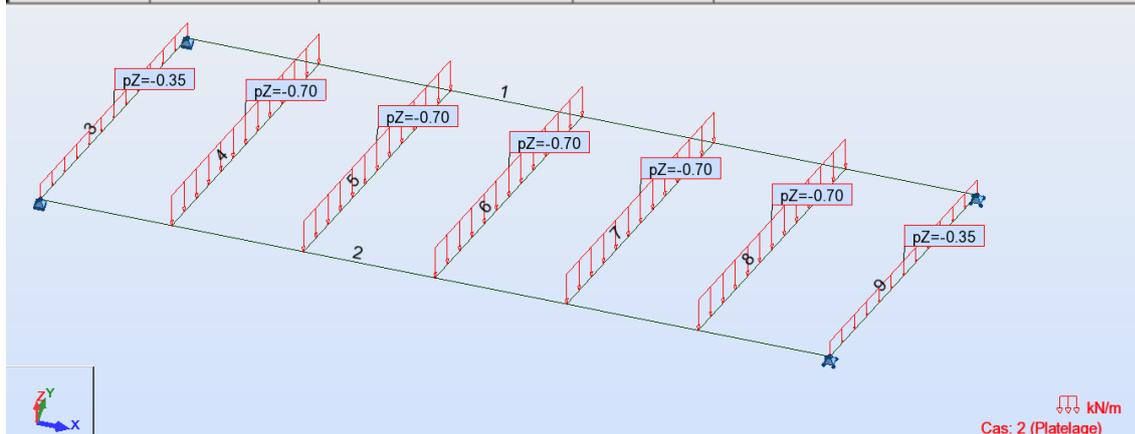
8.5.3. Charges

Cas n°1 : Poids propre

Cas	Type de charge	Liste	Valeurs de la charge
1	poids propre	1A9	PZ Moins Coef=1.00

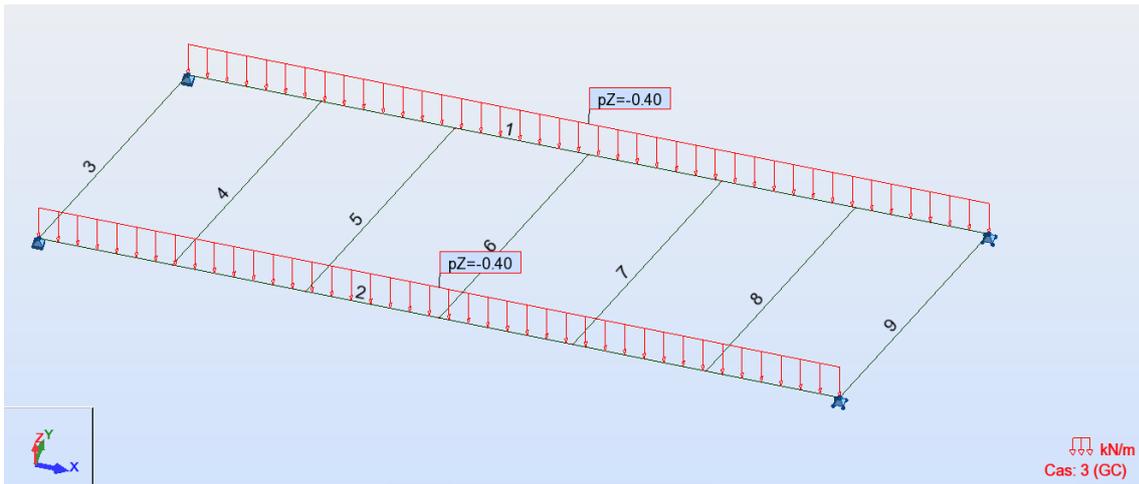
Cas n°2 : Platelage

Cas	Nom du cas	Type de charge	Liste	Valeurs de la charge
2	Platelage	charge uniforme	4A8	PZ=-0.70[kN/m]
2	Platelage	charge uniforme	3 9	PZ=-0.35[kN/m]



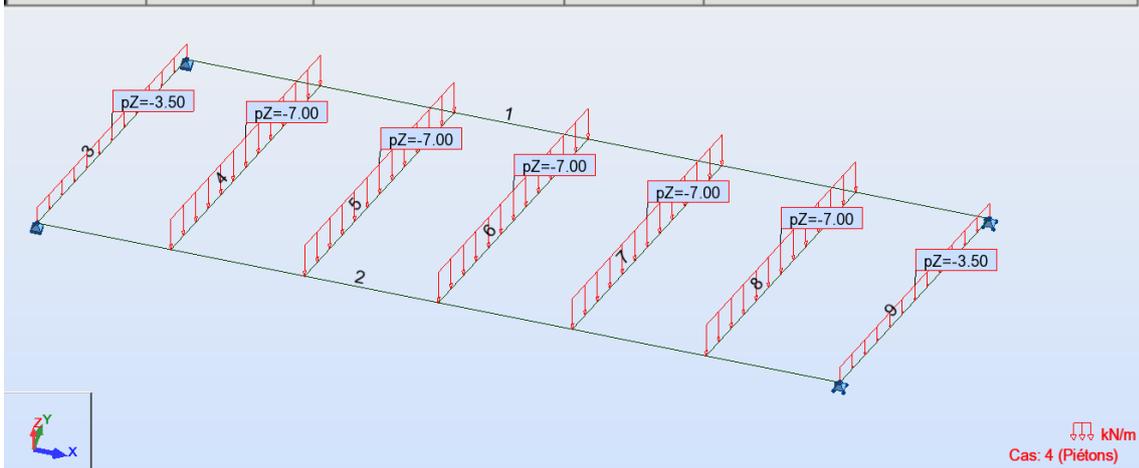
Cas n°3 : Garde-corps

Cas	Nom du cas	Type de charge	Liste	Valeurs de la charge
3	GC	charge uniforme	1 2	PZ=-0.40[kN/m]



Cas n° 4 : Charge de piéton

Cas	Nom du cas	Type de charge	Liste	Valeurs de la charge
4	Piétons	charge uniforme	4A8	PZ=-7.00[kN/m]
4	Piétons	charge uniforme	3 9	PZ=-3.50[kN/m]



8.5.4. Combinaisons

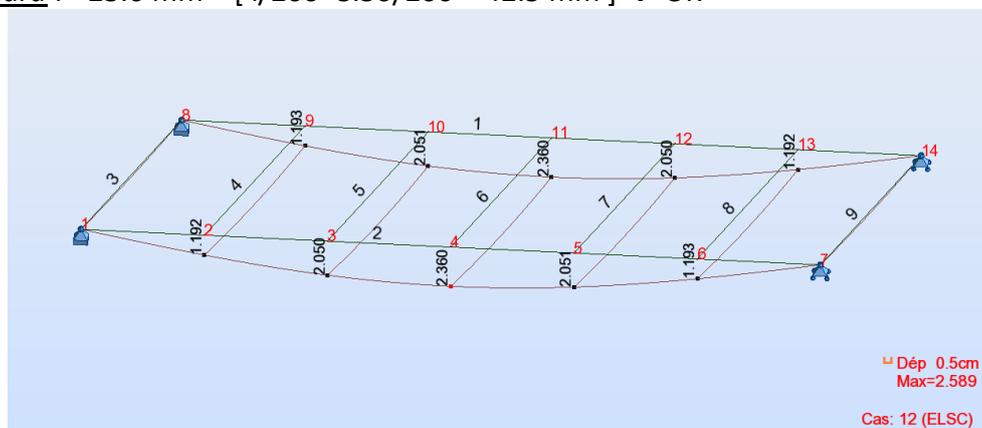
Combinaison	Nom	Cas	Coef.	Cas	Coef.	Cas	Coef.
10 (C)	QP	1	1.00	2	1.00	3	1.00
11 (C)	ELSF	10	1.00	4	0.40		
12 (C)	ELSC	10	1.00	4	1.00		
13 (C)	ELU	10	1.35	4	1.35		

8.5.5. Vérification des profilés

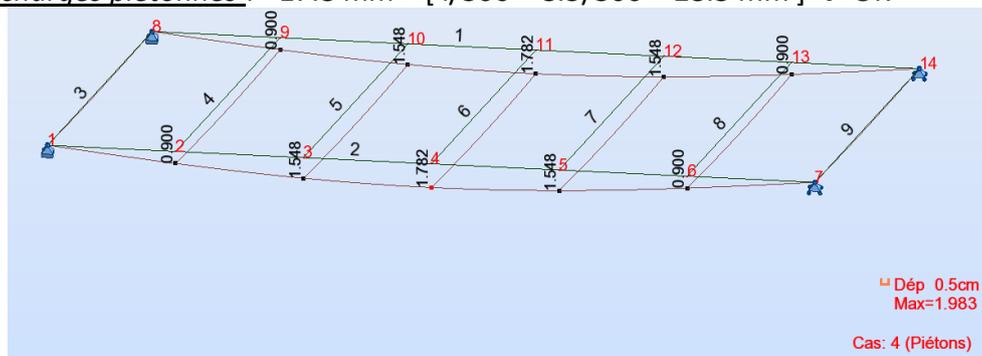
Pièce	Profil	Matériau	Lay	Laz	Ratio	Cas
1 Barre_1	OK HEB 240	ACIER	81.50	138.08	0.42	13 ELU
2 Barre_2	OK HEB 240	ACIER	81.50	138.08	0.42	13 ELU
3 Barre_3	OK HEB 120	ACIER	52.77	87.07	0.13	13 ELU
4 Barre_4	OK HEB 120	ACIER	52.77	87.07	0.24	13 ELU
5 Barre_5	OK HEB 120	ACIER	52.77	87.07	0.24	13 ELU
6 Barre_6	OK HEB 120	ACIER	52.77	87.07	0.24	13 ELU
7 Barre_7	OK HEB 120	ACIER	52.77	87.07	0.24	13 ELU
8 Barre_8	OK HEB 120	ACIER	52.77	87.07	0.24	13 ELU
9 Barre_9	OK HEB 120	ACIER	52.77	87.07	0.13	13 ELU

8.5.6. Vérification de la flèche

A l'ELS Cara $f = 23.6 \text{ mm} < [l/200 = 8.50/200 = 42.5 \text{ mm}] \rightarrow \text{OK}$



Sous surcharges piétonnes $f = 17.8 \text{ mm} < [l/300 = 8.5/300 = 28.3 \text{ mm}] \rightarrow \text{OK}$



8.5.7. Vérification dynamique

Une analyse modale est réalisée afin de déterminer les valeurs propres de la structure. Les 20 premiers modes propres sont listés ci-dessous, la structure est vérifiée « à vide » et « chargée » :

A vide

Cas/Mode	Fréquence [Hz]	Période [sec]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]	Masses Cumulées UZ [%]	Masse Modale UX [%]	Masse Modale UY [%]	Masse Modale UZ [%]
14/ 1	1.86	0.54	0.00	83.88	0.00	0.00	83.88	0.00
14/ 2	6.00	0.17	0.00	83.88	92.85	0.00	0.00	92.85
14/ 3	6.05	0.17	0.00	83.88	92.85	0.00	0.00	0.00
14/ 4	7.84	0.13	0.00	94.72	92.85	0.00	10.84	0.00
14/ 5	19.13	0.05	0.00	98.13	92.85	0.00	3.40	0.00
14/ 6	23.97	0.04	0.00	98.13	92.85	0.00	0.00	0.00
14/ 7	24.02	0.04	0.00	98.13	92.85	0.00	0.00	0.00
14/ 8	36.14	0.03	0.00	99.43	92.85	0.00	1.30	0.00
14/ 9	53.59	0.02	0.00	99.43	99.52	0.00	0.00	6.67
14/ 10	53.63	0.02	0.00	99.43	99.52	0.00	0.00	0.00
14/ 11	57.83	0.02	0.00	99.89	99.52	0.00	0.47	0.00
14/ 12	71.43	0.01	0.00	99.89	99.52	0.00	0.00	0.00
14/ 13	76.57	0.01	87.34	99.89	99.52	87.34	0.00	0.00
14/ 14	79.46	0.01	87.34	100.00	99.52	0.00	0.11	0.00
14/ 15	92.82	0.01	87.34	100.00	99.52	0.00	0.00	0.00
14/ 16	92.85	0.01	87.34	100.00	99.52	0.00	0.00	0.00
14/ 17	132.79	0.01	87.34	100.00	100.00	0.00	0.00	0.48
14/ 18	132.82	0.01	87.34	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00
14/ 19	154.52	0.01	87.34	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00
14/ 20	162.73	0.01	87.34	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00
15/ 1	1.64	0.61	0.00	83.90	0.00	0.00	83.90	0.00

Chargée

15/ 1	1.64	0.61	0.00	83.90	0.00	0.00	83.90	0.00
15/ 2	5.28	0.19	0.00	83.90	92.85	0.00	0.00	92.85
15/ 3	5.33	0.19	0.00	83.90	92.85	0.00	0.00	0.00
15/ 4	6.93	0.14	0.00	94.73	92.85	0.00	10.83	0.00
15/ 5	16.90	0.06	0.00	98.13	92.85	0.00	3.40	0.00
15/ 6	21.09	0.05	0.00	98.13	92.85	0.00	0.00	0.00
15/ 7	21.14	0.05	0.00	98.13	92.85	0.00	0.00	0.00
15/ 8	31.88	0.03	0.00	99.43	92.85	0.00	1.30	0.00
15/ 9	47.16	0.02	0.00	99.43	99.52	0.00	0.00	6.67
15/ 10	47.20	0.02	0.00	99.43	99.52	0.00	0.00	0.00
15/ 11	50.94	0.02	0.00	99.89	99.52	0.00	0.47	0.00
15/ 12	63.04	0.02	0.00	99.89	99.52	0.00	0.00	0.00
15/ 13	67.58	0.01	87.35	99.89	99.52	87.35	0.00	0.00
15/ 14	69.94	0.01	87.35	100.00	99.52	0.00	0.11	0.00
15/ 15	81.67	0.01	87.35	100.00	99.52	0.00	0.00	0.00
15/ 16	81.71	0.01	87.35	100.00	99.52	0.00	0.00	0.00
15/ 17	116.85	0.01	87.35	100.00	100.00	0.00	0.00	0.48
15/ 18	116.88	0.01	87.35	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00
15/ 19	136.03	0.01	87.35	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00
15/ 20	143.21	0.01	87.35	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00

- Vibration transversale :

Le 1^{er} mode propre correspond au 1^{er} mode de vibration transversale (84 % de la masse excitée selon l'axe UY = axe transversal) :

$f_1 = 1.9 \text{ Hz}$ à vide et 1.6 Hz chargée $> 1.3 \text{ Hz} \rightarrow$ pas d'analyse dynamique nécessaire (risque faible de mise en résonance)

- Vibration verticale :

Le 2^{ème} mode propre correspond au 1^{er} mode de vibration verticale (93 % de la masse excitée selon l'axe UZ = axe vertical) :

$f_2 = 6.0\text{Hz}$ à vide et 5.3 Hz chargée $> 2.6\text{ Hz}$ → pas d'analyse dynamique nécessaire (risque faible de mise en résonance)

- Vibration longitudinale :

Le 13^{ème} mode propre correspond au 1^{er} mode de vibration longitudinale (87 % de la masse excitée selon l'axe UX = axe longitudinal) :

$f_{15} = 76.6\text{ Hz}$ à vide et 67.6 Hz chargée $> 2.6\text{ Hz}$ → pas d'analyse dynamique nécessaire (risque faible de mise en résonance)

8.5.8. Descente de charges sur culée pour dimensionnement des fondations

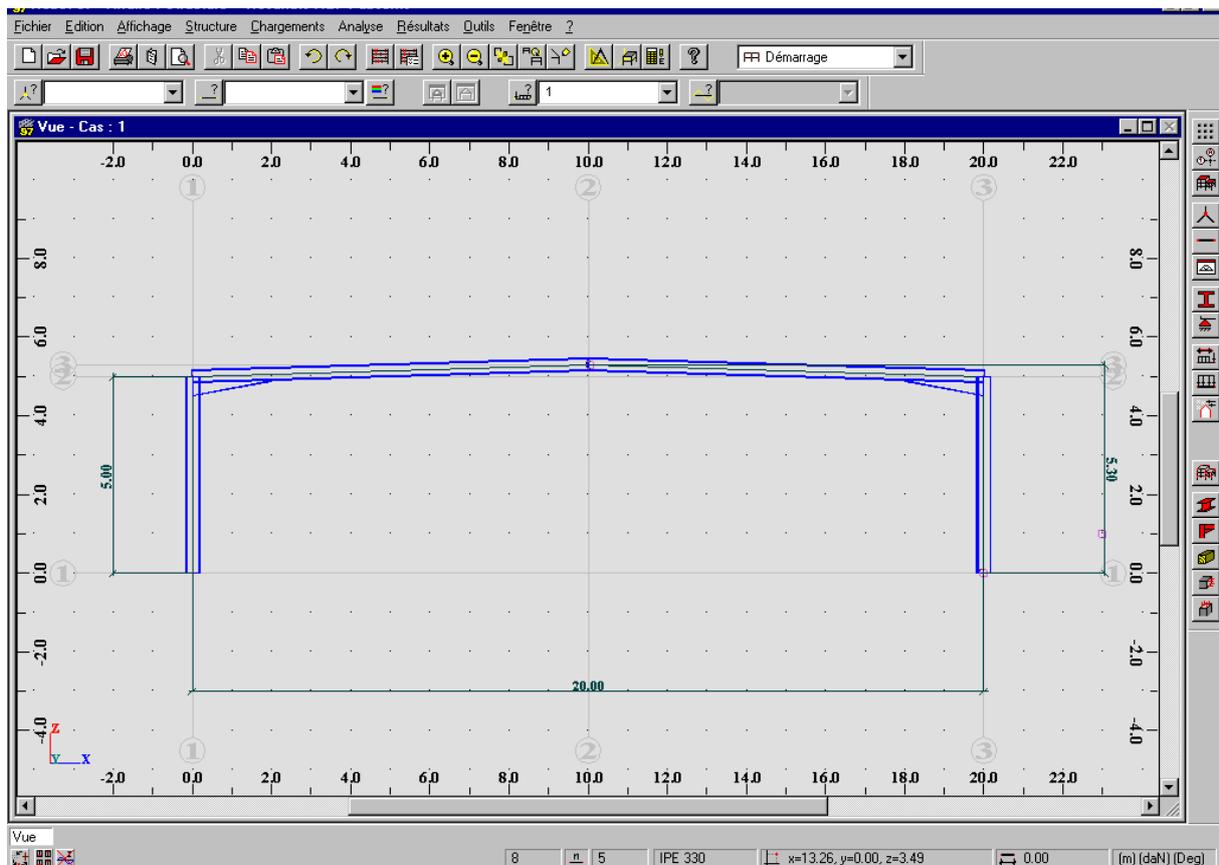
Ci-dessous la réaction par appareil d'appui pour les différentes combinaisons. Ces réactions sont à multiplier par 2 pour obtenir la descente de charge par culée :

	R [kN] / Appareil d'appui
ELS QP	10
ELS Fréquent	21
ELS Caractéristique	37
ELU	50

9. ANALYSE ET DIMENSIONNEMENT D'UN PORTIQUE SELON LE CM66

9.1. AVANT PROPOS

Ce document présente la définition, l'analyse et le dimensionnement du portique à une nef représentée dans la figure ci-dessous. Il doit permettre de comprendre les mécanismes de dimensionnement avec **ROBOT** et non d'assister le projeteur dans la modélisation de la structure. Néanmoins, au cours des exemples, quelques "astuces" de modélisation seront exposées afin de faciliter la démarche de l'utilisateur face aux multiples choix offerts par **ROBOT**.



9.2. PARAMETRES DE L'ETUDE

L'objectif étant de comprendre comment utiliser Robot, de connaître ses différentes fonctionnalités et de savoir comment analyser les résultats, nous appliquerons dans un premier temps sur les normes françaises avec lesquelles les paramétrages (notamment les instabilités) et les vérifications des dimensionnements sont plus simples qu'avec les normes européennes.

- **Unités de données** : m et daN

- **Géométrie** :

Largeur nef : 10,00 m

Longueur du bâtiment : 50,00 m

Largeur entre portique : 5,00 m (constante)

Hauteur des poteaux : 5,00 m (versants symétriques)

Pente : 6% (soit flèche 0,30 m)

Pieds de poteaux : articulés, pas de baïonnettes

Jarret de traverse: 2,00 m. A placer dans une seconde étude.

- **Section** (première estimation) :

Poteau : IPE 240

Traverse : IPE 220

- **Charges** :

- **Permanentés** :

Poids propre

Toiture multi-couches : 27 daN/m²

Bardage de long pan : 10 daN/m²

- **Exploitation** :

Palan : 800 daN (placé à 2,00 m du poteau de gauche)

- **Neige et vent** :

Région : Lot et Garonne.

Altitude de la construction : <200 m

Norme : NV65 Mod 99 + Carte 96 04/00

Perméabilité : néant

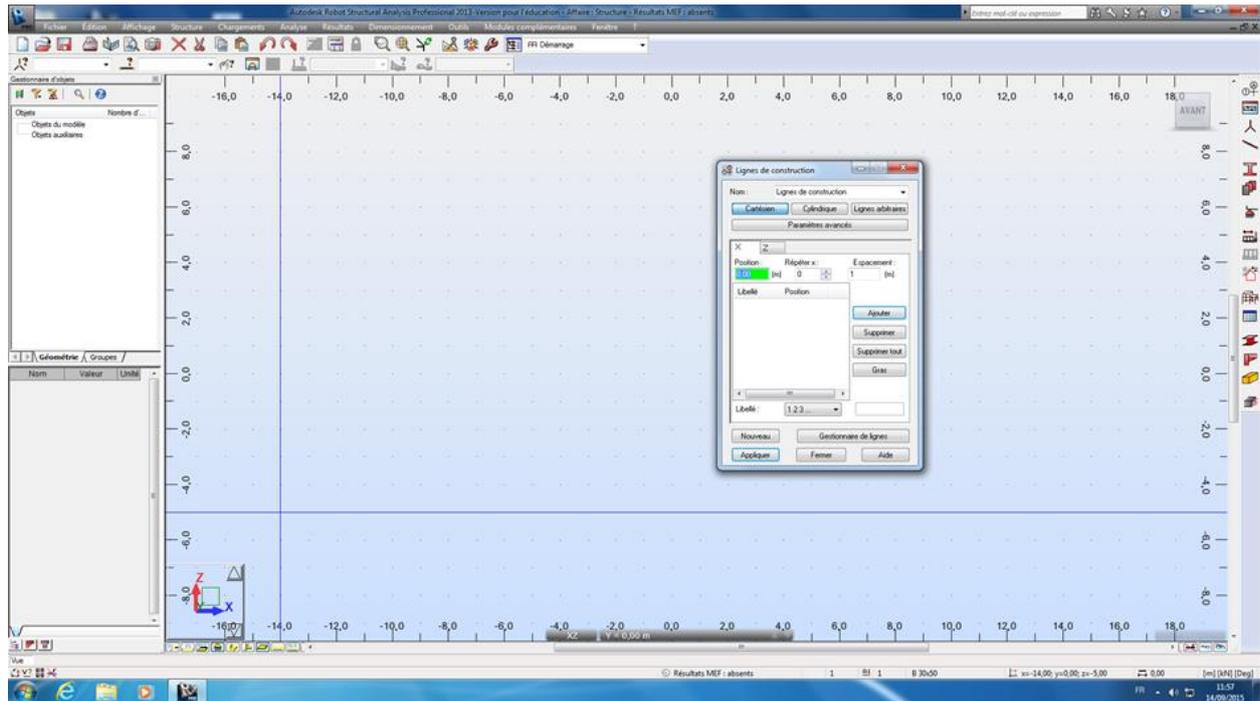
Vent : site normal (type : normal)

9.3. MODELISATION DE LA STRUCTURE

Afin de commencer la définition de la structure, lancer le système **ROBOT** (Clic sur l'icône correspondant).

Dans la fenêtre de l'assistant affichée par **ROBOT**, sélectionner le premier icône du premier rang (**Etude d'un portique plan**).

- **Lignes de construction**



→ Assurez-vous d'être dans le bureau initial **Démarrage**



→ Sélectionner l'icône de définition de lignes de construction



→ Définissez les lignes de construction afin de vous faciliter la mise en place des barres.

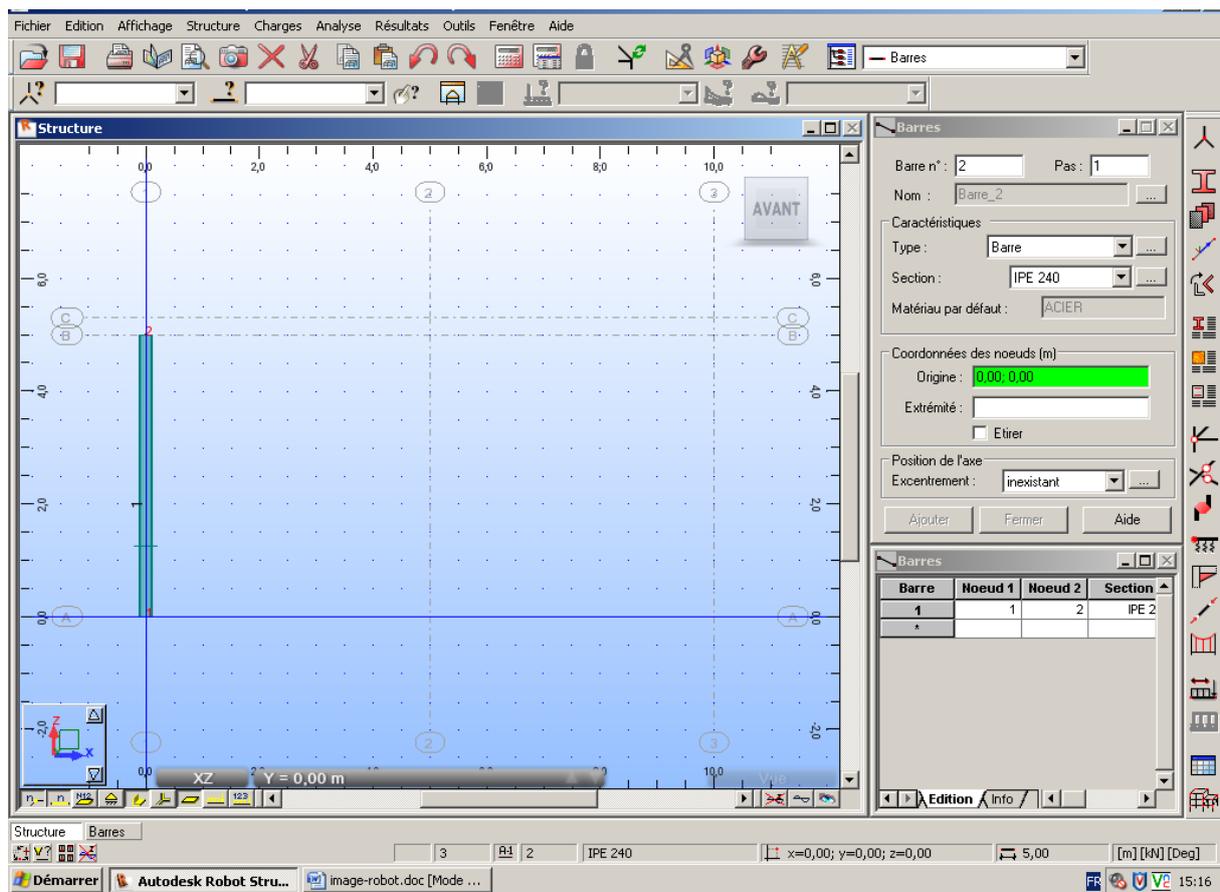
Lignes verticales :

onglet **X** : position 0, répétition 2, espacement 5 (ajouter)

Lignes horizontales :

onglet **Z** : position 0 (ajouter)
 position 5.0 (ajouter)
 position 5.3 (ajouter)
 changer ensuite le libellé en A,B,C (appliquer).

• Barres



→ Dans la liste des bureaux disponibles, sélectionner le bureau **Barres**

→ Dans la fenêtre **Barres**, sélectionner la section qui correspond à la barre que vous souhaitez modéliser (poteau : IPE 240, traverse : IPE220).

Si le profilé n'est pas disponible, cliquer sur les 3 points (...) à côté du champ **Section** et ajouter le nouveau profilé.

→ Définition des barres dans la structure étudiée. Clic dans le champ **Origine** (le champ devient vert), puis définition des barres à l'aide de la souris et des lignes de construction.

Poteaux : (A1 - B1) et (A3 - B3)

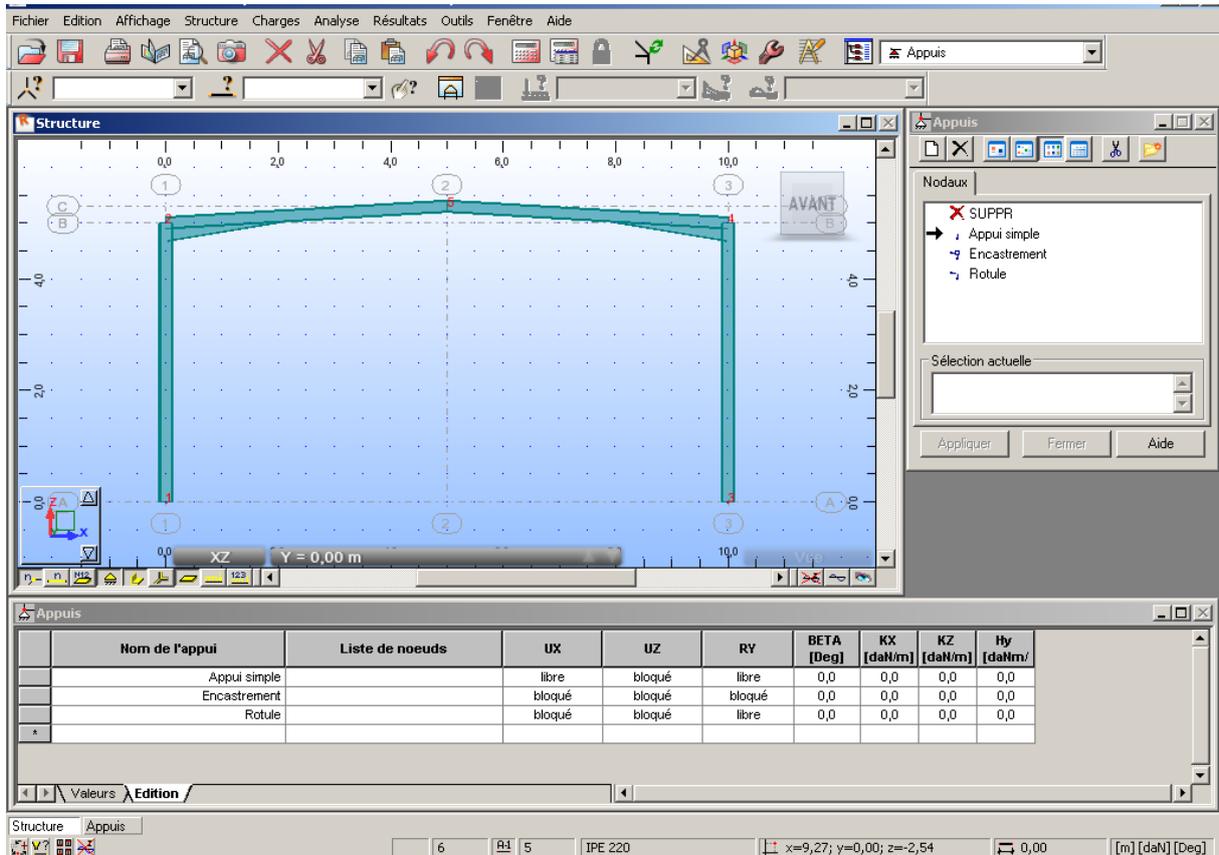
Arbalétrier : (B1 - C2) et (C2 - B3)

Remarque :

Vous avez la possibilité de renuméroter les noeuds et barres :

Aller dans le menu **Structure** puis **Numérotation**

• **Appuis**



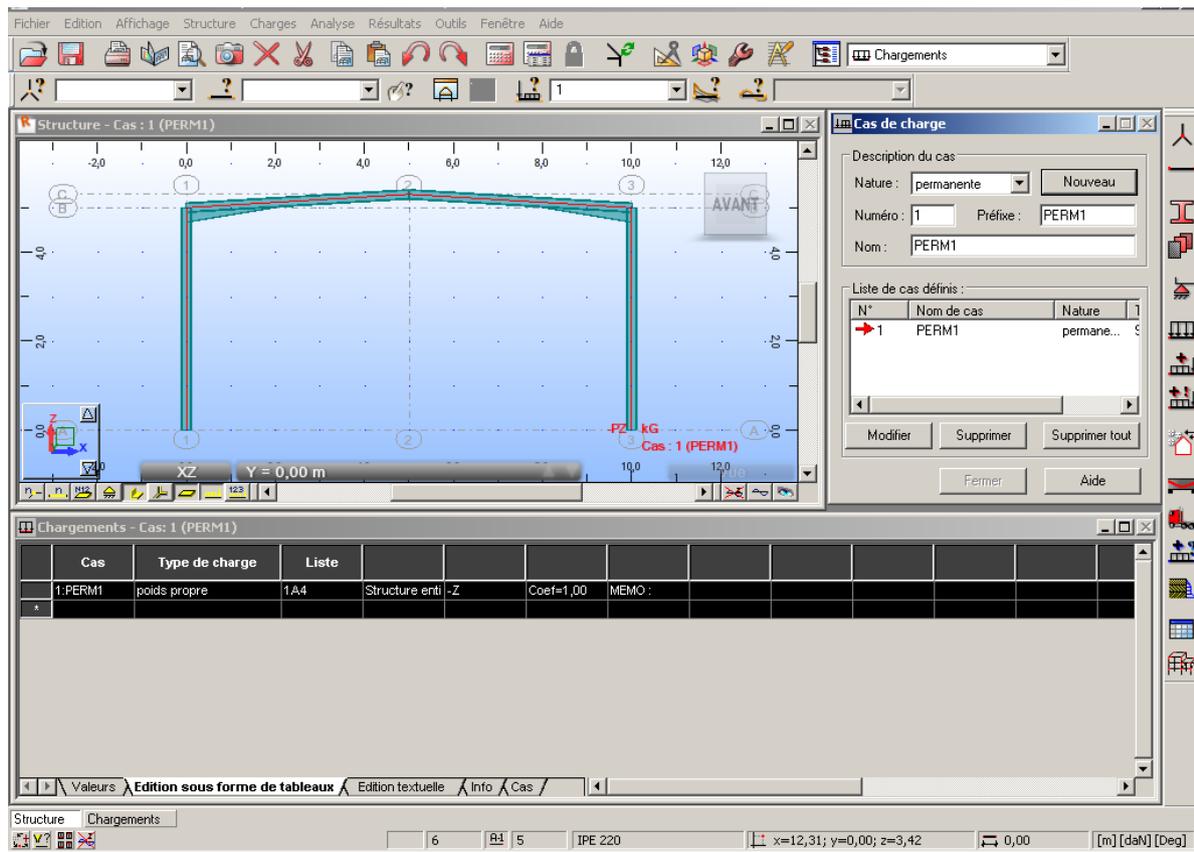
→ Dans la liste des bureaux disponibles, sélectionner le bureau **Appuis**.



→ Dans la fenêtre **Appuis**, sélectionner **Rotule**.

→ Imposer l'appui en cliquant sur les nœuds concernés (bases des poteaux).

9.4. DEFINITION DES CHARGEMENTS



→ Dans la liste des bureaux disponibles, sélectionner **Chargements**.



→ Définition d'un nouveau cas de charge (nature : permanente, nom standard PERM1).
Clic sur le bouton **Nouveau** dans la boîte de dialogue **Cas de charge**.

Remarque : Dans la première ligne, le logiciel a appliqué de façon automatique le poids propre à toutes les barres de la structure (en direction Z).

• Charge permanente due à la toiture multi-couches

Clic sur l'icône **Définir charges** puis sur l'index **Barres**, puis sur **Charges uniformes**

→ Paramètres de la charge : Clic dans le champ intersection de la colonne "P" et de la ligne Z et saisir la valeur 135 (daN/m), puis **Ajouter**.

→ Sélectionner les deux barres composant l'arbalétrier.

• Charge permanente due au bardage de long pan

→ Clic sur l'index **Barres** puis sur **Charges uniformes**.

→ Paramètres de la charge : Clic dans le champ intersection de la colonne "P" et de la ligne Z et saisir la valeur 50 (daN/m), puis **Ajouter**.

→ Sélectionner les deux poteaux.

• Charge d'exploitation due au palan

→ Définition d'un nouveau cas de charge (nature : exploitation, nom standard : EXPL1).
Clic sur le bouton **Nouveau** dans la boîte de dialogue **Cas de charge** puis sur **Définir charges**.

→ Clic sur l'index **Barres** puis sur **Force et/ou Moment sur barre**.

→ Paramètres de la charge : Clic dans le champ intersection de la colonne "F" et de la ligne Z et saisir la valeur 800 (daN). Définir la coordonnée de la charge en **absolue** (2m), puis **Ajouter**.

→ Sélectionner l'arbalétrier de gauche et **Appliquer**.

• Charge de neige et de vent

→ Définition des charges de Neige et vent. Clic sur l'icône : 

→ Définition des caractéristiques géométriques du bâtiment.
Pour définir l'enveloppe, Clic sur **Auto**, puis cocher « sans acrotère » et renseigner les champs **Profondeur** et **Entraxe** (50m et 5m).

→ Définition des paramètres globaux. Clic sur **Paramètres**.
Choisir par exemple le Lot et Garonne comme département. Toutes les autres valeurs par défaut restent correctes.
Clic sur l'onglet Vent, puis définir le site comme normal.

→ Calcul des charges de Neige et Vent : **Générer**.
Les notes de calcul concernant les paramètres de neige et vent apparaissent afin que vous puissiez contrôler les différents coefficients.
Après vérification, vous pouvez refermer ces fichiers.

• Calcul des pondérations

→ Activation du module Pondération : Clic sur l'icône pondération 

→ Désactivation des pondérations accidentelles. Clic sur la coche située devant ACC.

→ Calcul des pondérations : **Générer**.

9.5. ANALYSE DES RESULTATS

• Calculs

Dans la liste des bureaux disponibles, sélectionner **Résultats/Résultats**.

Vous pouvez également y accéder via l'icône « Calculatrice » sous la barre de menus

Le fait de choisir ce bureau provoque le démarrage automatique des calculs.

• Visualisation de la déformée de la structure

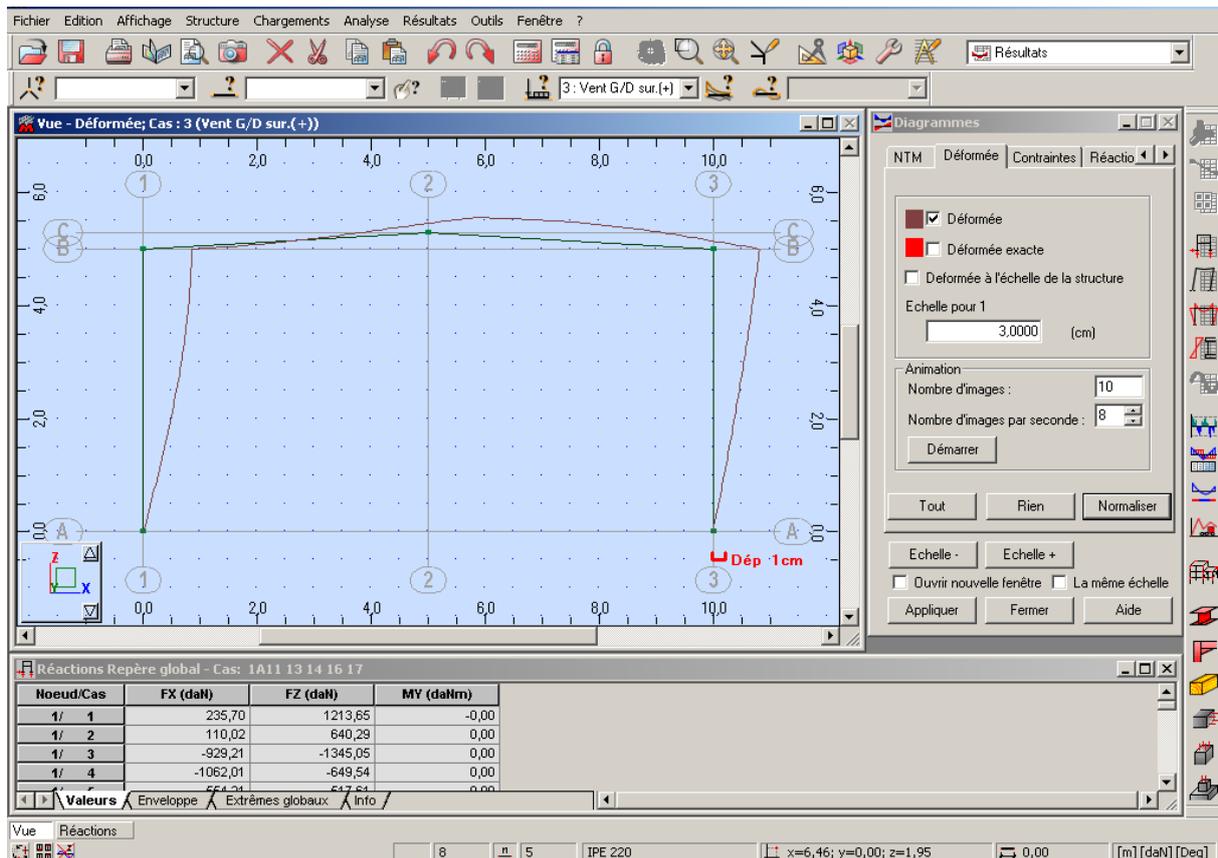
→ Sélection des résultats concernant un cas de charge de vent.

Dans le champ relatif au cas de charge, sélectionner Vent GD surpression.



→ Visualisation de la déformée de la structure sous le chargement de vent.

Dans la fenêtre **Diagrammes**, Clic sur l'onglet **Déformée** et activer l'option **Déformée**, puis **Appliquer**.



→ Désactivation des diagrammes.

Il est préférable ensuite de désactiver l'option **Déformée** pour éliminer des diagrammes parasites lors de l'exploitation d'autres résultats.

• Tableau de résultats

→ Modification du tableau de résultats concernant les réactions.

ClicBD dans le tableau **Réactions** (appel du menu contextuel).

→ Ajout du nom du cas de charge.

Sélection de l'option **Colonnes**, une boîte de dialogue s'ouvre alors.

Clic dans l'onglet **Cas de charge**. Puis Clic sur **Nom du cas**.

→ Opération de filtrage sur les résultats. Sélection des cas de charge simples.

ClicBD dans le tableau **Réactions** puis **Filtre**, remplacer **Nœud** par le mot clé **Cas**, puis sélectionner un par un tous les cas simples à l'aide d'un clic sur la double flèche.

→ Capture et enregistrement du tableau de résultats pour la future note de calcul.

ClicBD dans le tableau **Réactions**, puis **Capture d'écran**.

Donner un nom à cette capture d'écran puis **OK**.

The screenshot shows a software window with a menu bar (Fichier, Edition, Affichage, Structure, Chargements, Analyse, Résultats, Format, Outils, Fenêtre) and a toolbar. The main window displays a table with columns: Cas/Nœud, FX (daN), FZ (daN), and MY (daNm). The table is organized into sections by 'Nom du cas'. A dialog box titled 'Sélection des valeurs pour les nœuds' is open, showing the 'Cas de charge' tab. The dialog has a 'Sélection des informations à afficher' section with checkboxes for 'nom du cas', 'nature', 'type d'analyse', and 'définition de la combinaison'. The 'Ordre' section has radio buttons for 'Objet, cas' and 'Cas, objet', with 'nom' checked under 'Cas, objet'. The dialog also has buttons for 'OK', 'Annuler', 'Aide', 'Filtres', 'Extrêmes', and 'Cas'. At the bottom of the dialog, it says 'Réactions:1' and 'Dans le tableau actif, les colonnes sélectionnées dans cet onglet seront ajoutées' (with a radio button selected) or 'remplaceront les existantes'.

Cas/Nœud	FX (daN)	FZ (daN)	MY (daNm)
Nom du cas PERM1			
1/ 1	235,70	1213,65	-0,00
1/ 3	-235,70	1213,65	0,0
Nom du cas EXPL1			
2/ 1	110,02	640,29	0,00
2/ 3	-110,02	159,71	-0,00
Nom du cas Vent G/D sur.(+)			
3/ 1	-929,21	-1345,05	0,00
3/ 3	-554,21	-517,61	-0,00
Nom du cas Vent G/D dép.(-)			
4/ 1	-1062,01	-649,54	0,00
4/ 3	-421,41	177,90	0,00
Nom du cas Vent D/G sur.(+)			
5/ 1	554,21	-517,61	-0,00
5/ 3	929,21	-1345,05	0,00
Nom du cas Vent D/G dép.(-)			
6/ 1	421,41	177,90	-0,00
6/ 3	1062,01	-649,54	-0,00
Nom du cas Vent Av./Arr. sur.(+)			
7/ 1	161,26	-774,43	0,00
7/ 3	-161,26	-774,43	0,00
Nom du cas Vent Av./Arr. dép.(-)			
8/ 1	30,37	-88,89	0,0
8/ 3	-30,37	-88,89	-0,00
Nom du cas Neige cas 1 uniforme			
	255,46	875,00	0,00

9.6. DIMENSIONNEMENT

- Avant-propos

Dans la partie précédente, nous avons étudié le comportement de la structure sous diverses sollicitations. Maintenant, nous passons à l'étape de dimensionnement où nous allons vérifier les différentes pièces de la structure en tenant compte de la norme **CM66**.

Aussi, avant de poursuivre, il est important de s'arrêter sur les notions de barre, type de barre, pièce et famille. Expliquons ces différents termes :

Barre : Les paramètres de définition des barres sont relatifs à la géométrie (position, dimensions, sections) ainsi qu'au matériau. Ces paramètres sont nécessaires pour le calcul RDM.

Type de barre : Les paramètres de définition des types de barres sont relatifs au flambement, déversement et limitation de service. Ces paramètres sont nécessaires pour le dimensionnement par rapport aux normes.

Pièce : Une pièce est définie pour chaque barre (ou plusieurs barres dans le cas d'une superpièce) et intègre de ce fait les paramètres concernant la géométrie et le dimensionnement.

Famille : Une famille regroupe une ou plusieurs pièces. Par exemple, pour une table, nous pourrions considérer la famille Pied. Ainsi, la modification d'une pièce appartenant à la même famille se reportera sur les autres pièces de la famille.

Pour débuter le dimensionnement de notre portique, il nous faut maintenant définir les types de barres, les pièces et les familles relatives à la traverse et aux poteaux de notre structure. Pour cela, dans la liste des bureaux disponibles, sélectionner :

Dimensionnement/Dimensionnement acier.

Nota important : les différents paramètres utilisés dans l'exemple qui va suivre sont donnés à titre indicatif.

• Création du type de barre pour la traverse

→ Activation de la fenêtre **Type de barre**.

→ Création d'un nouveau type.

→ Définir le nom (**TRAV**), les paramètres de flambement et de service (voir figure ci-dessous)

Nota :

La valeur de la longueur de flambement autour de l'axe Z est la distance entre pannes contreventées (ici : nous imposons 2,50 m).

Ne pas oublier **d'enregistrer** les modifications (dans la fenêtre définition de pièces et la fenêtre de définition CM66).

Flambement : Utilisateur →

Calculé par **ROBOT** →

Déversement : →

Service :

Déplacement vertical de poutre
Attention : définit par rapport au repère local de la barre

On peut définir une contre flèche de fabrication, cette valeur viendra en soustraction de la flèche max. sous combinaisons ELS (DEP)

- Création de la super-pièce Traverse

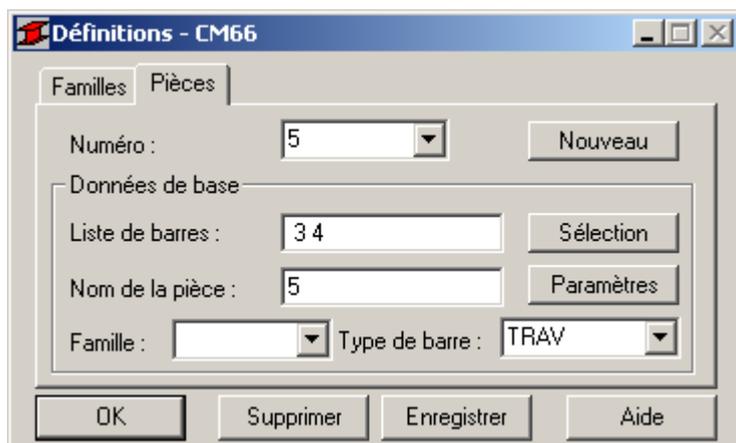
→ Activation de l'onglet **Pièces** dans la fenêtre **Définitions CM66**.

Création d'une nouvelle pièce : Cliquer sur **Nouveau**.

Remarque :

Le logiciel crée par défaut, une pièce pour chaque barre définie.

→ Définir la liste des barres (numéro des deux arbalétriers, par exemple : 3 et 4), le nom de la pièce (traverse) et affecter le type de barre précédemment définie (TRAV) puis **Enregistrer**.



• Création du type de barre pour les poteaux

→ Activation de la fenêtre **Type de barre**.

→ Création d'un nouveau type.

→ Définir le nom (**POT**), les paramètres de flambement et de service (voir figure ci-dessous).

Paramètres pour les poteaux →

→

Double-Click Sur l'icone

→

Rentrer le numéro de la super pièce

On peut vérifier le coef. de flambement en plaçant dans le champ "Tester la barre" le numéro du poteau (ici $L_{fy}=2.74 \times L_0$)

→

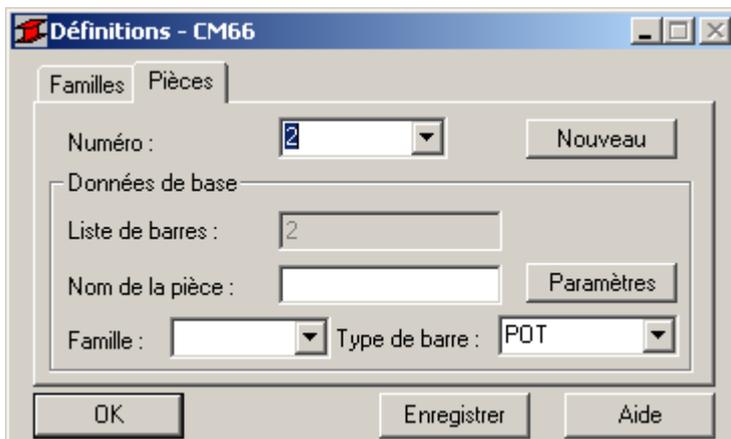
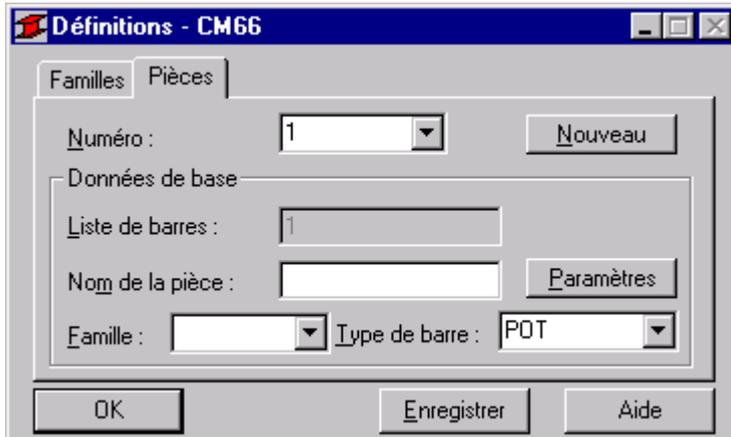
Déplacement horizontal
Attention : défini par rapport au repère global

- **Définition des pièces Poteau**

Pour la définition des pièces poteau, il suffit d'affecter aux barres 1 et 2 le type de barre POT précédemment défini.

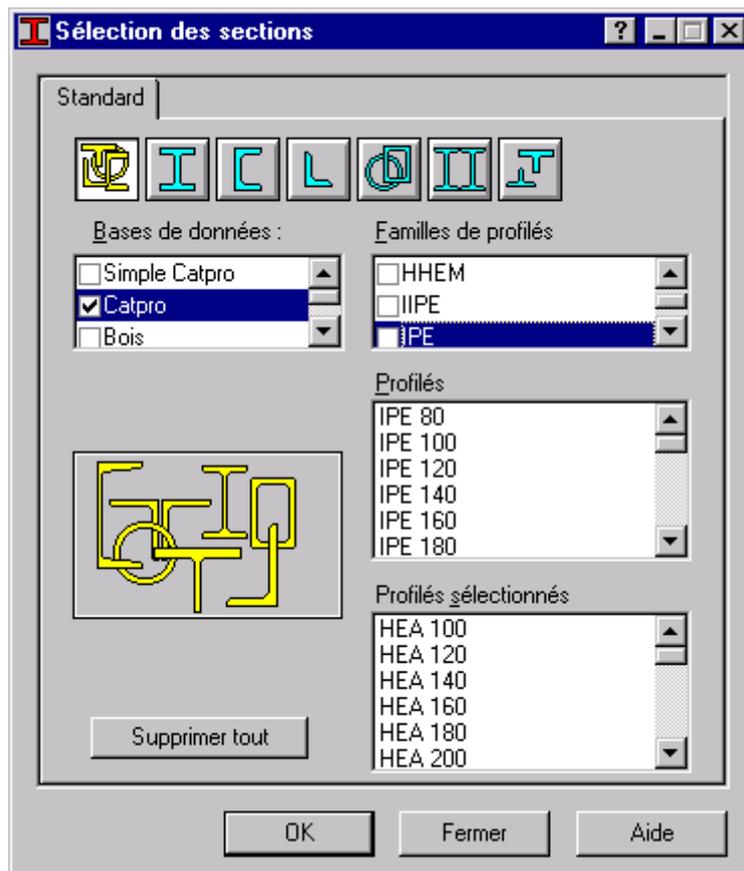
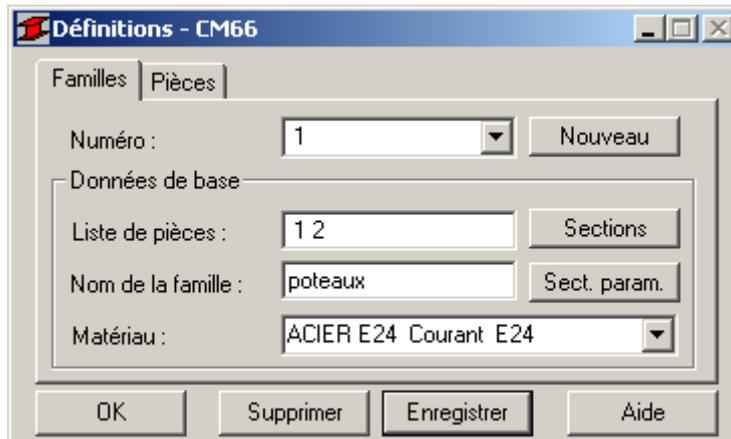
→ Activation de l'onglet **Pièces** dans la fenêtre **Définitions CM66**.

→ Afficher la barre numéro 1 et affecter le type de barre POT puis **Enregistrer**.
Réaliser la même opération pour la barre 3.



Création de la famille Poteaux

- Activation de l'onglet **Familles** dans la fenêtre **Définitions CM66**.
- Définir une nouvelle famille. Clic sur **Nouveau**.
- Définir le nom de la famille (poteaux) et le numéro des pièces formant cette famille (1, 2).



- Définir les sections susceptibles d'être utilisées dans cette famille. Clic sur **Sections** puis sélectionner les profilés de type IPE et HEA.
- Terminer par **Enregistrer**.

• Création de la famille Traverse

Opérer de la même manière que pour la famille Poteaux.

→ Définir une nouvelle famille. Clic sur **Nouveau**.

→ Définir le nom de la famille (traverse) et le numéro de la pièce formant cette famille (5).

→ Définir les sections susceptibles d'être utilisées dans cette famille.
Clic sur **Sections** puis sélectionner les profilés de type IPE.

→ Terminer par **Enregistrer**.



• Vérification des familles en contrainte



→ Sélectionner **Vérification des familles** et saisir les familles 1 et 2.

→ Dans **Sélectionner cas de charges**, sélectionner les combinaisons EFF (12) et DEP (15).

→ Pour la vérification en contrainte, cocher Etat limite **Ultime** et lancer **Calculer**.

Résultats

Les deux profilés sont corrects vis à vis de la contrainte (Ok) mais on bénéficie d'une réserve de résistance (ratio << 1).

Remarque : Le Ratio définit le rapport de la contrainte de calcul sur la contrainte ultime du matériau (235 daN/cm² pour l'acier).

Pièce	Profil	Matériau	Lay	Laz	Ratio	Cas
Famille : 2 traverse						
5 5	220	ACIER E24	94.36	100.60	0.53	12 EFF /33/
Famille : 1 poteaux						
1	IPE 240	ACIER E24	130.54	185.68	0.81	12 EFF /104/

Note de calcul

Pour inspecter une note de calcul, cliquer sur OK de la famille Poteaux.

IPÉ 240
Profil correct
OK

Famille : 1 poteaux
 Pièce : 1
 Point / Coordonnée : 3 / x = 1.00 L = 5.00 m
 Cas de charge : 12 EFF /104/ 1*1.00 + 2*1.00 + 6*1.75 + 9*0.83

Résultats simplifiés
Résultats détaillés
Changer

CONTRAINTES

SigN = 2493.96/39.116 = 0.64 daN/mm²
 SigFy = 5474.76/324.302 = 16.88 daN/mm²

DEVERSEMENT

✗

FLAMBEMENT y

L_y=5.00 m M_{uy}=19.08
 L_{fy}=13.02 m k_{1y}=1.02
 Lambda y=130.54 k_{Fy}=1.09

FLAMBEMENT z

L_z=5.00 m M_{uz}=9.43
 L_{fz}=5.00 m k_{1z}=1.04
 Lambda z=185.68

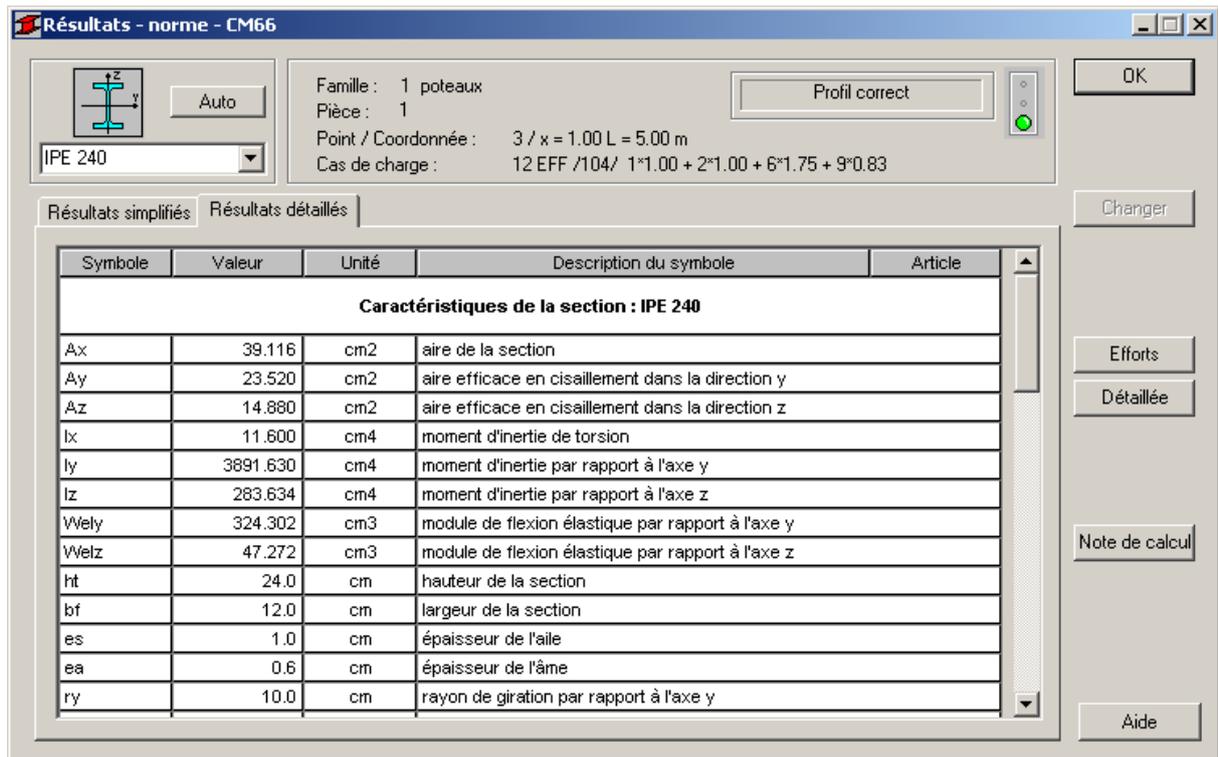
RESULTATS

k₁*SigN + k_{Fy}*SigFy = 1.04*0.64 + 1.09*16.88 = 19.01 < 23.50 daN/mm² (3.521)

1.54*T_{auz} = |1.54*-0.60| = |-0.93| < 23.50 daN/mm² (1.313)

Efforts
Détaillée
Note de calcul
Aide

où L_{fy} = 5 x 2,60 = 13,02 m

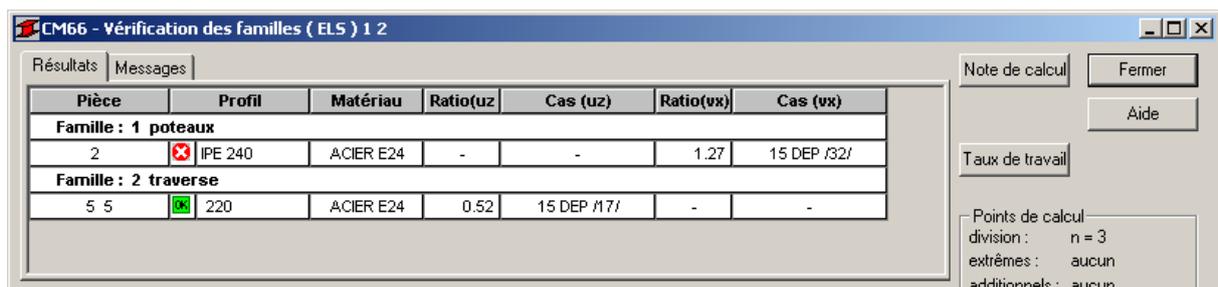


• Vérification des familles en flèche

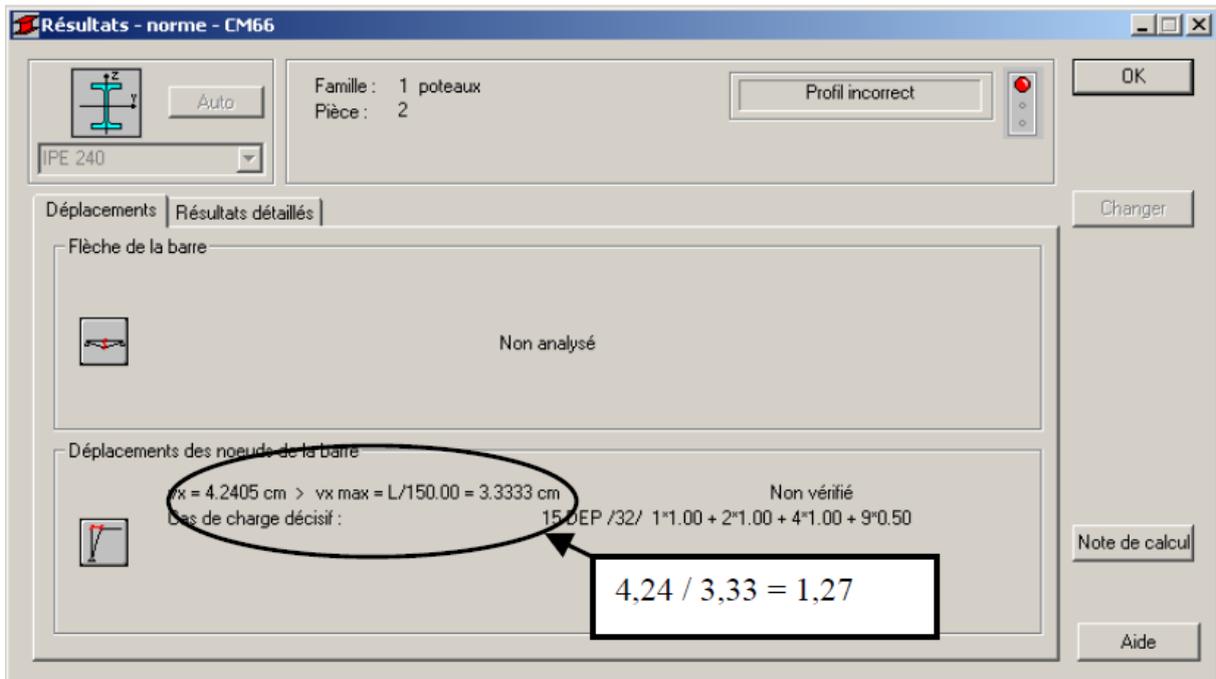
Pour la vérification en flèche, cocher Etat limite **Service** et lancer **Calculer**

Résultats

La famille Traverse est correcte mais pas la famille Poteaux.



Il est possible d'examiner le détail des calculs (Clic sur la croix rouge) :



• **Dimensionnement de familles en contrainte**

Nous allons maintenant utiliser l'outil de dimensionnement de familles en contrainte où **ROBOT** va faire une recherche automatique des profilés optimaux parmi les types de sections que nous avons définis.

→ Cocher **dimensionnement de familles** et saisir les familles 1 et 2.

→ Saisir **Etat limite ultime**, puis **Calculer**.

Résultats

Pièce	Profil	Lay	Laz	Ratio	Cas
Famille : 1 Poteaux					
1	HEA 160	190.50	125.48	1.30	10 EFF /74/
	HEA 180	168.01	110.61	0.91	
	HEA 200	151.10	100.38	0.66	
1	IPE 220	150.33	201.79	1.08	10 EFF /74/
	IPE 240	137.36	185.68	0.81	
	IPE 270	122.05	165.40	0.59	
Famille : 2 Traverse					
7 traverse	IPE 180	120.99	123.88	1.24	10 EFF /69/
	IPE 200	108.83	113.54	0.89	
	IPE 220	98.57	102.48	0.65	

Pour chaque famille de profilé, le logiciel affiche trois lignes :

Par exemple, pour la famille Poteaux et les sections IPE, on a :

- IPE 220 : le profilé n'est pas satisfaisant (ratio >1).
- IPE 240 : le profilé est satisfaisant (**en contrainte**).

- IPE 270 : le profilé est trop performant.

Comme vous le remarquez, pour les résultats dans la famille Poteaux, le logiciel affiche les résultats pour les IPE et les HEA car nous avons défini précédemment pour cette famille deux catégories de profilés.

• Dimensionnement de familles en contrainte avec optimisation sur le poids

→ Cocher **dimensionnement de familles** et saisir la famille 1.

→ Cocher **Optimisation** et cliquer sur **Options**.

→ Sélectionner **Poids** et **Calculer**.

Résultats

Pièce	Profil	Matériau	Lay	Laz	Ratio	Cas
Famille : 1 poteaux						
1	IPE 220	ACIER E24	134.17	201.79	1.06	12 EFF /104/
	IPE 240		130.54	185.68	0.81	
	IPE 270		127.07	165.40	0.60	
1	HEA 180	ACIER E24	173.50	125.48	1.26	12 EFF /104/
	HEA 180		161.59	110.61	0.91	
	HEA 200		155.56	100.38	0.67	

Nous retrouvons dans le tableau des résultats, les trois profilés proposés pour chaque famille. De plus, le signe **T** sur la ligne IPE 240 indique que celui-ci est plus léger que le HEA 180.

• Conclusion sur le dimensionnement

Le module dimensionnement permet de trouver le profilé optimal en **contrainte**. Nous constatons que **ROBOT** préconise un IPE 240 identique à notre choix de départ (une première estimation). Or, la vérification de l'IPE 240 en flèche nous démontre que le profilé est insuffisant.

Effectivement, la flèche est l'élément dimensionnant dans certaines structures, il serait donc licite de faire un dimensionnement en flèche. Malheureusement, le dimensionnement automatique en flèche est impossible. Pour justifier ce constat, il nous faut expliquer le fonctionnement du dimensionnement.

- Le dimensionnement aux ELU (EFF) :

Le logiciel va chercher dans une bibliothèque les caractéristiques des profilés (S , W_y et W_z) et applique celles-ci aux efforts (N , M_y et M_z) en négligeant la variation de poids propre. Le logiciel commence le calcul par le plus petit profilé (IPE 80 par exemple) pour s'arrêter sur le premier profilé correct (optimal). Ce calcul est rapide car les efforts (N , M_y et M_z) ne sont pas variables en fonction du type de profilé (poids propre négligé), le logiciel n'a donc pas besoin de relancer les calculs RDM à chaque itération.

- Le dimensionnement aux ELS (DEP) :

A chaque changement de profilé, le logiciel devrait relancer les calculs RDM car la rigidité du portique change et cela donnerait des temps de calcul très longs. De plus, la solution finale ne satisferait pas l'utilisateur car il y a plusieurs solutions possibles pour optimiser un portique en flèche. Raisonons sur notre exemple :

- 1^{ère} solution : Augmenter le gabarit du poteau.
- 2^{ème} solution : Augmenter le gabarit de la traverse (même si elle passe largement).
- 3^{ème} solution : Augmenter le jarret.
- 4^{ème} solution : Modifier les appuis (articulé encastré).
- 5^{ème} solution : Additionner les solutions énumérées ci-dessus.

C'est pour ces différentes raisons que le dimensionnement aux ELS (DEP) est impossible.

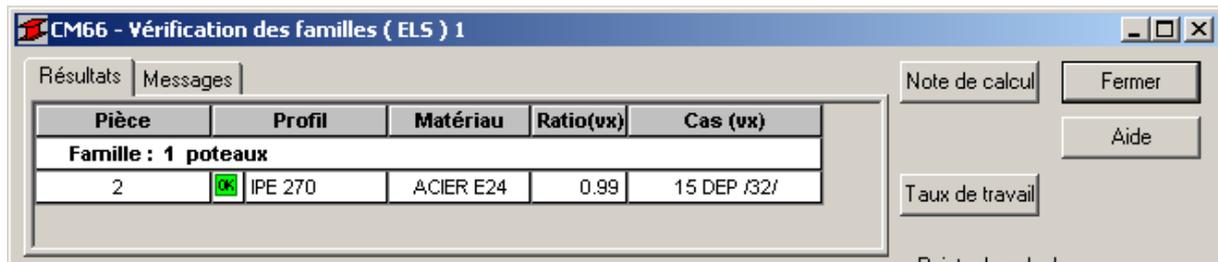
• Optimisation du portique

Comme nous l'avons constaté dans les paragraphes précédents, les familles Poteaux et Traverse respectent les conditions de contrainte ($<23,5 \text{ daN/mm}^2$).

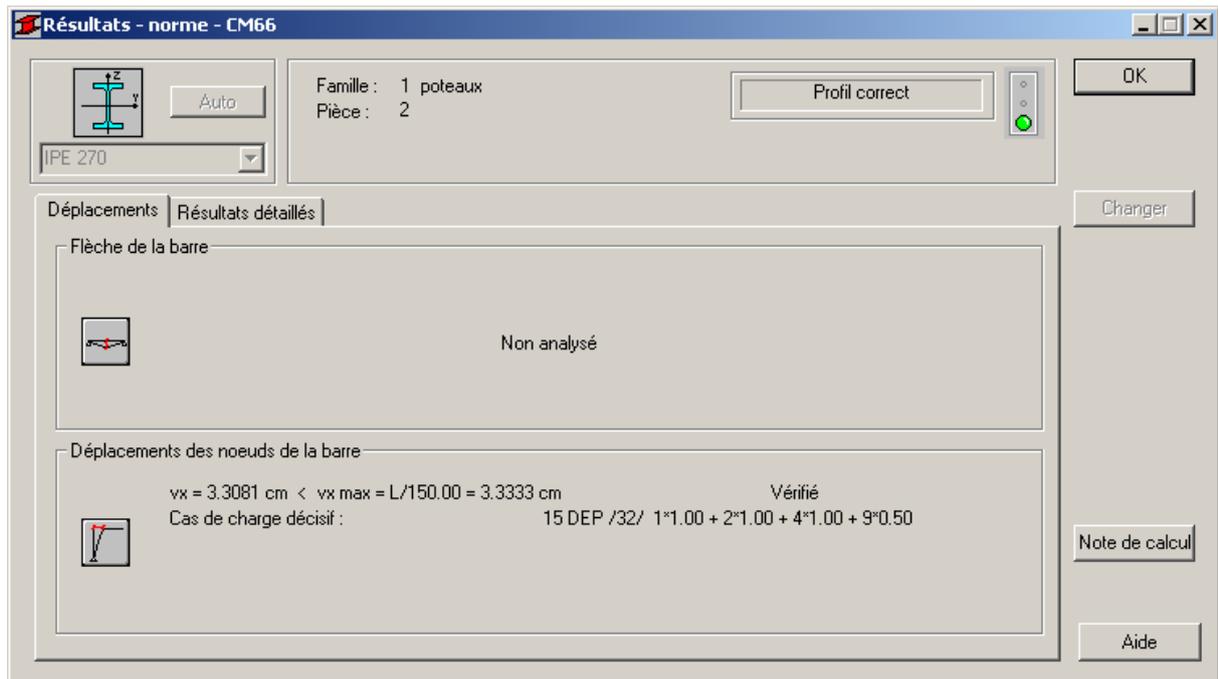
Par contre, le poteau sort du domaine des conditions limites de flèche (1/150). Nous allons donc choisir une solution qui permet d'augmenter la rigidité du portique (solution optimale trouvée après divers essais), à savoir :

- Changer le profilé des poteaux de IPE 240 en IPE 270.
- Modifier le jarret (passer de 200 cm à 230 cm).
- Relancer les calculs RDM (car la rigidité du portique a changé).
- Faire la vérification de la famille 1 en service.

Soit le résultat suivant :



Pièce	Profil	Matériau	Ratio(vx)	Cas (vx)
Famille : 1 poteaux				
2	 IPE 270	ACIER E24	0.99	15 DEP /32/



OK vis-à-vis de la valeur admissible du déplacement.

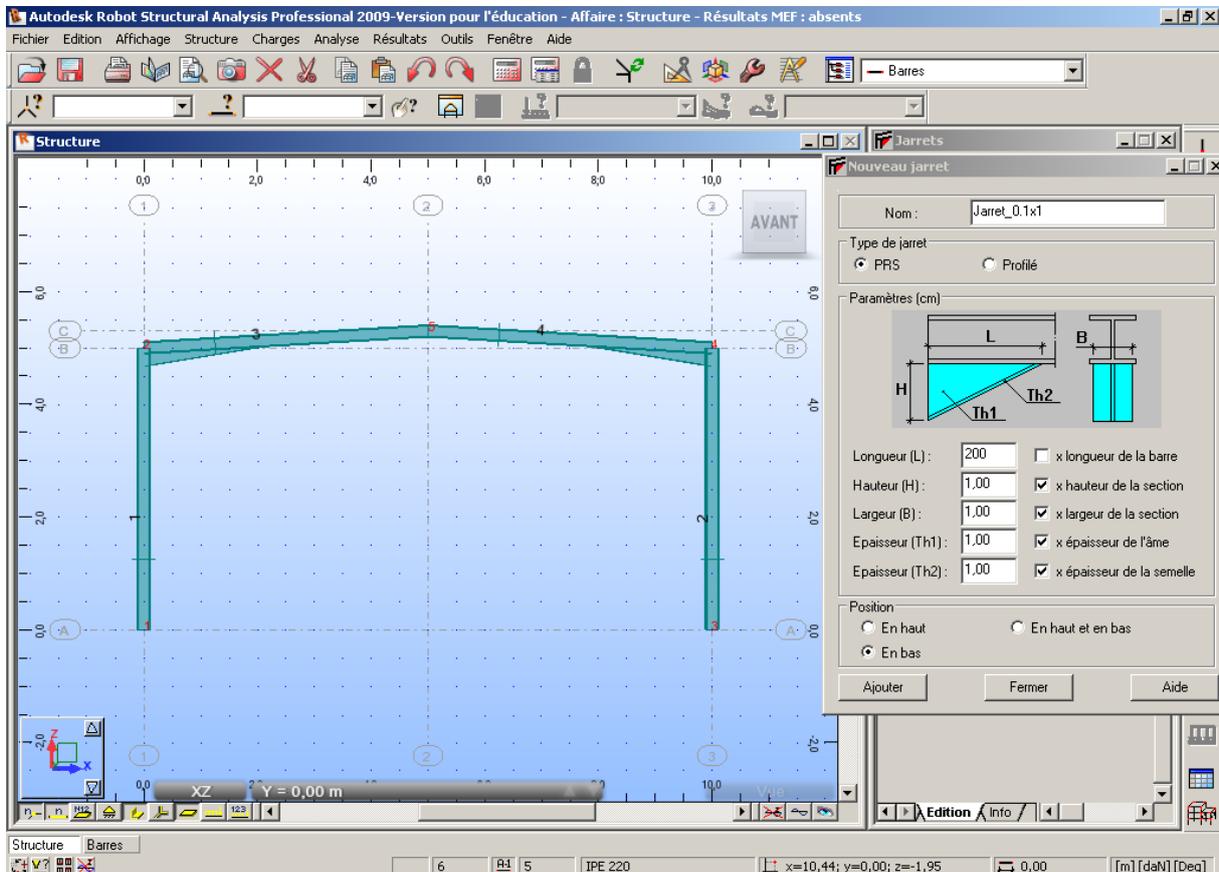
Nota important : Nous n'avons pas fait la vérification en contrainte de la famille Poteaux car la section IPE 240 passait largement.

Conclusion

Le **dimensionnement de famille** permet d'optimiser les profilés en contrainte et non en flèche. Ce calcul permet donc de donner un ordre de grandeur du gabarit des profilés à mettre en place (ceux-ci seront optimaux si la flèche n'est pas dimensionnante pour la structure étudiée). Il est impératif de faire la vérification en contrainte (EFF) et surtout en flèche (DEP) des familles car ce sont ces conditions qui permettront de justifier votre structure.

9.7. Refaire l'ensemble de l'étude en plaçant les deux jarrets

• Créations des jarrets



→ Définition des jarrets: Clic sur l'icône jarret 

→ Ouverture des propriétés du jarret Jarret_01x1 : DoubleClic sur l'icône de Jarret_0.1x1

→ Définir un jarret de type profilé avec une longueur réelle du jarret de 2 m, et une hauteur de 1H (Attention aux unités).

Longueur (L) :	<input type="text" value="200,0"/>	<input type="checkbox"/> x longueur de la barre
Hauteur (H) :	<input type="text" value="1,00"/>	<input checked="" type="checkbox"/> x hauteur de la section

→ Clic sur Ajouter, puis Clic sur les deux arbalétriers dans la zone de position finale des jarrets.

Relancer les résultats et comparer.

9.8. LES AUTRES PARAMETRES DU DIMENSIONNEMENT ACIER

• Paramétrage

Accessible dans la fenêtre « Calcul CM66 » / bouton Paramétrage :

Nombre de points de calcul sur point au milieu la barre :
ici un point à chaque extrémité + un point au milieu

Taux de travail max. = 100%

Si l'élongement de votre profilé dépasse 210, l'élément sera déclaré comme instable

Si vous faites une vérification de pièces sur l'ensemble des pièces (1 à 4 et 5) et que l'option **Barres composants la pièce non prises en compte** est cochée, le logiciel ne calculera que les pièces 1, 3 et 5.
Dans le cas où l'option n'est pas cochée, le logiciel calculera que les pièces 1,2,3,4 et 5

• Raidisseurs internes

Sélectionner l'icone

Rentrer les coordonnées des raidisseurs ainsi que les coeff. de flambement entre raidisseurs.
Si 2 coordonnées, alors on a 3 coefficients

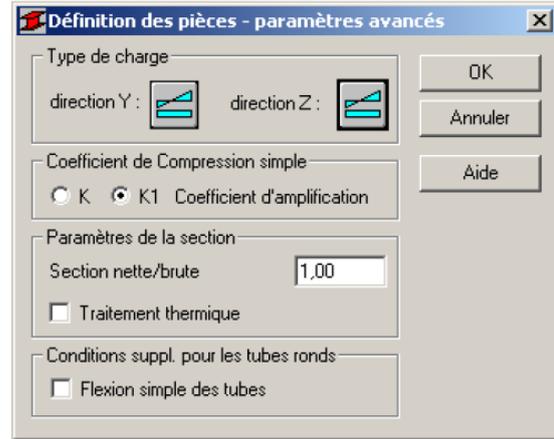
Nota : les icones (1, 0.5, 0.7, 2) sont sans effet dans cette version (version13.0).

• **Paramètres avancés**

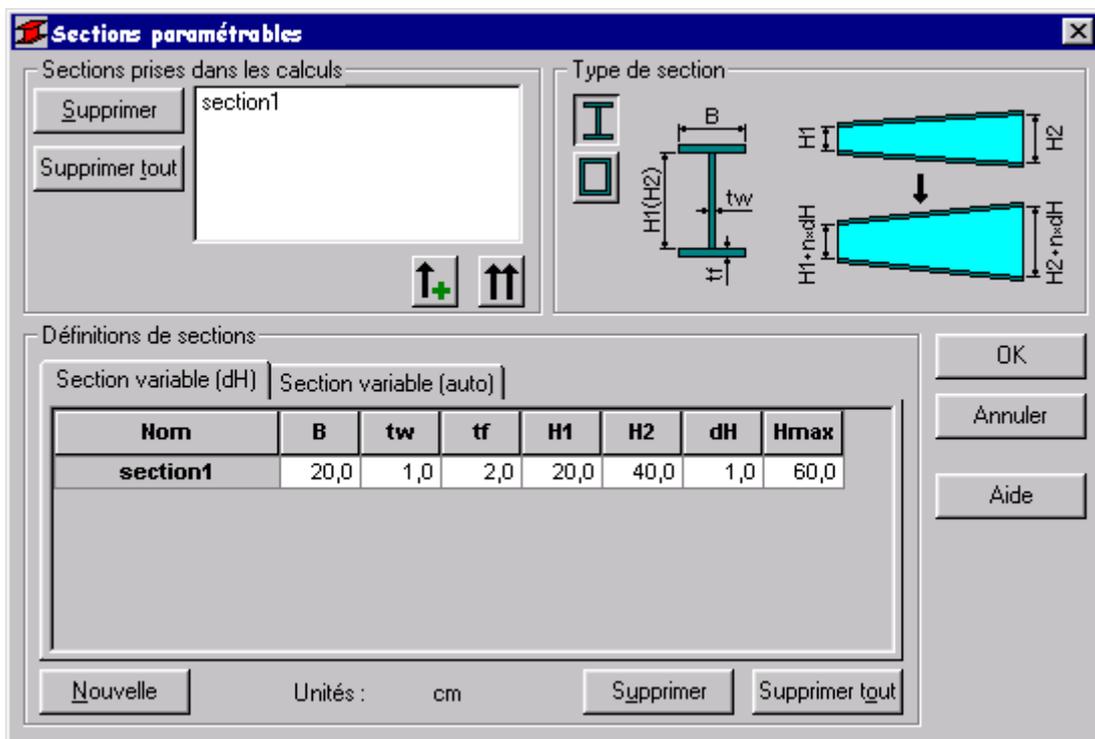
Diagramme pour les coef. De flambement K_{fy} et K_{fz}

Rapport entre section nette et section brute pour le calcul des éléments soumis à la traction

Cette option permet de tenir compte des contraintes sur le diamètre du tube



• **Sections paramétrables**



L'option section paramétrable permet de définir des PRS à inerties constantes ou variables en hauteur que cela soit en forme de I ou de tube carré. Le calcul est effectué par boucles successives par incrément de hauteur (dH), le processus s'arrête lorsqu'une section respecte les critères de contraintes.

→ Clic sur **Nouvelle**.

→ Saisir les données relatives à la section transversale.

→ Ajouter la section paramétrée.

9.9. ASSEMBLAGES

• Avant-propos

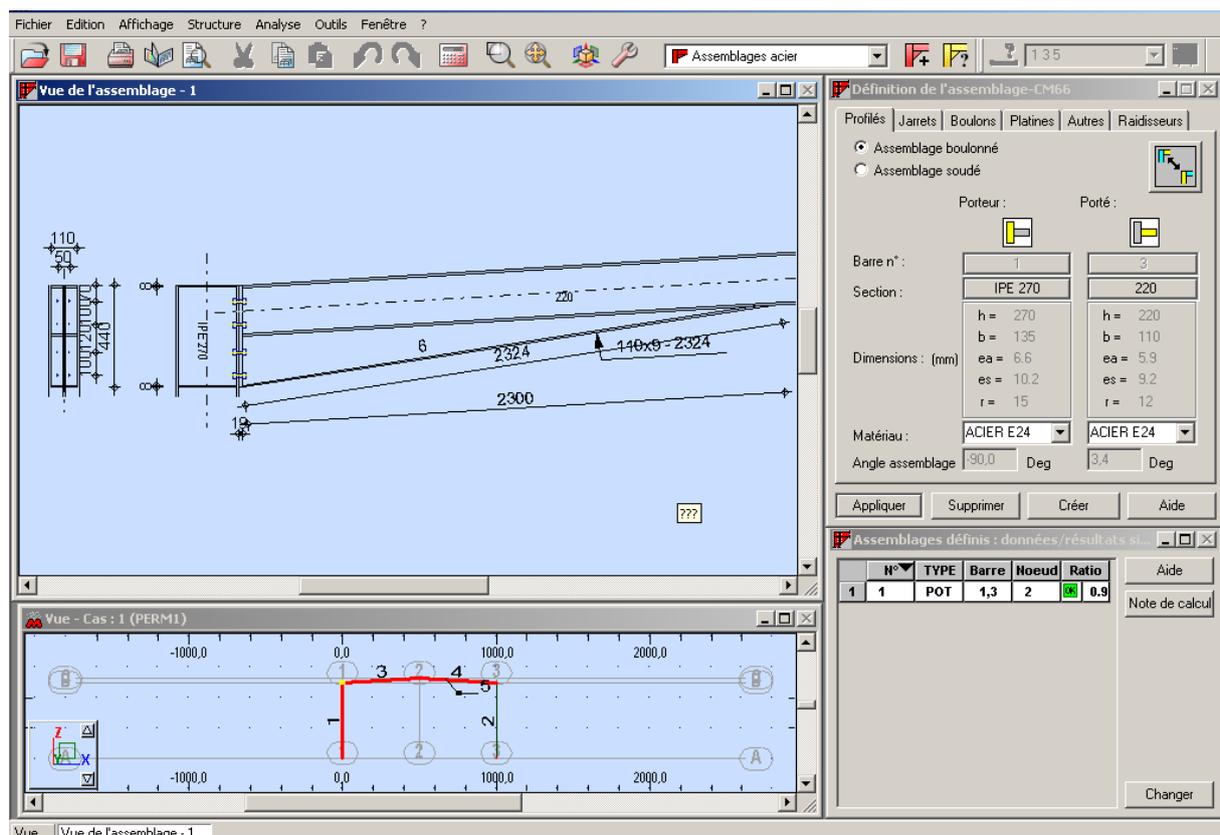
Dans la partie précédente, nous avons dimensionné la structure d'après la norme CM66. Maintenant, il nous reste à définir les assemblages entre les différents éléments. Nous nous concentrerons alors sur les assemblages poteau/traverse et pied de poteau.

• Assemblage Poteau/traverse

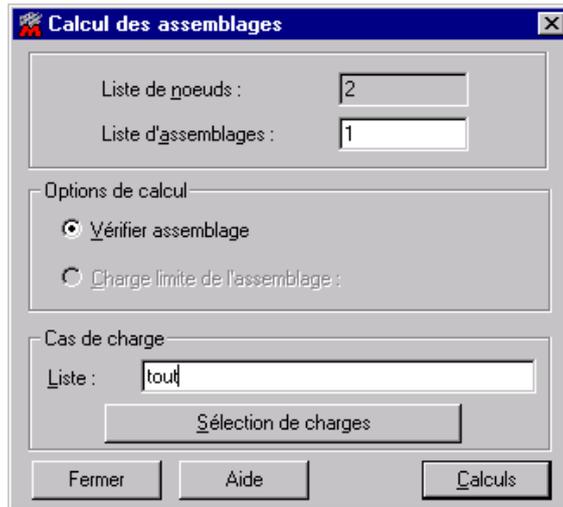
→ Dans la liste des bureaux disponibles, sélectionner le bureau **Dimensionnement assemblage acier**.

→ Dans la fenêtre **Vue**, sélectionner le poteau gauche extrême et la travée puis **Créer**. Il apparaît le dessin de l'assemblage défini ci-dessous.

→ Définir les différentes options pour l'assemblage dans la fenêtre **Définition de l'assemblage CM66**.



→ Vérification de l'assemblage. Clic dans la fenêtre **Vue de l'assemblage**, puis **Analyse/Calculer** pour ouvrir la boîte de dialogue du calcul.

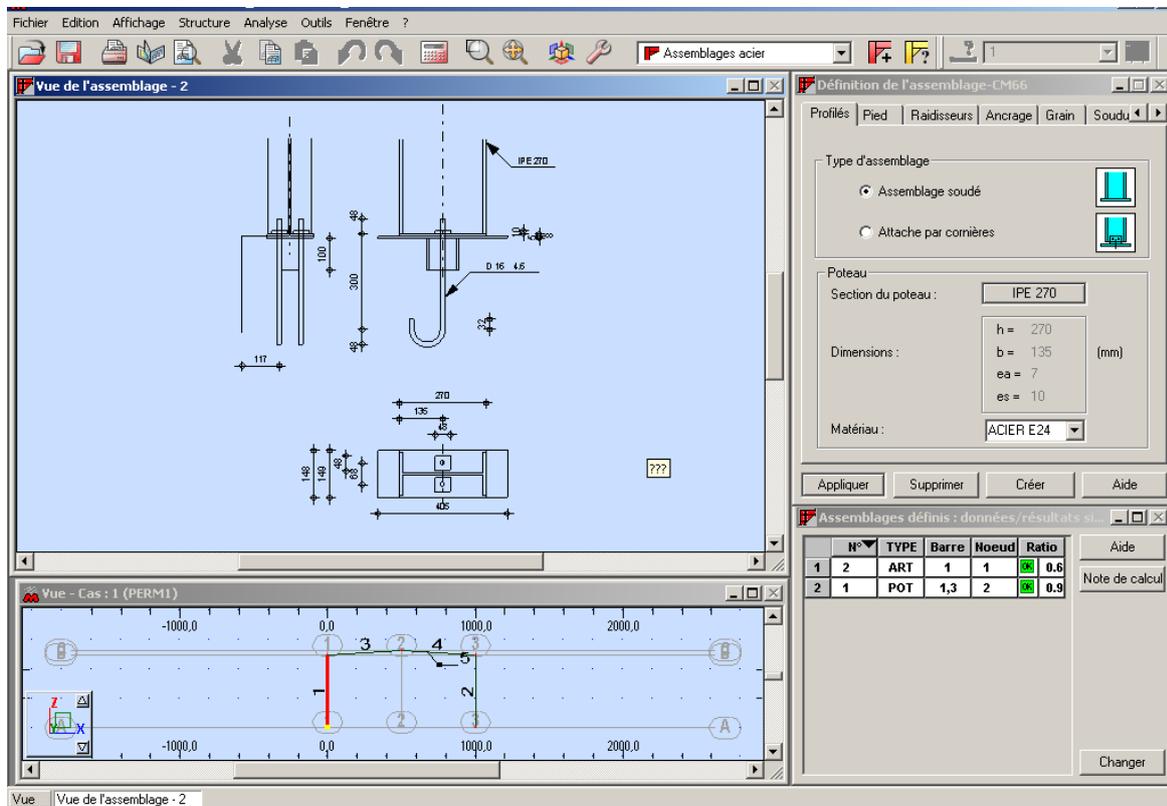


→ Dans le champ **Liste** relatif aux cas de charge, saisir Tout, puis **Calculs**.

→ Dans la fenêtre **Assemblages définis**, clic sur le bouton **Note de calculs** afin de récupérer les différents éléments de calculs relatifs à l'assemblage défini.

• **Assemblage Pied de poteau**

→ Pour l'assemblage pied de poteau, il s'agit de réaliser la même démarche que celle présentée précédemment, en sélectionnant maintenant un poteau et le noeud de pied associé. L'assemblage est présenté ci-dessous.



9.10. NOTE DE CALCUL

• Avant-propos

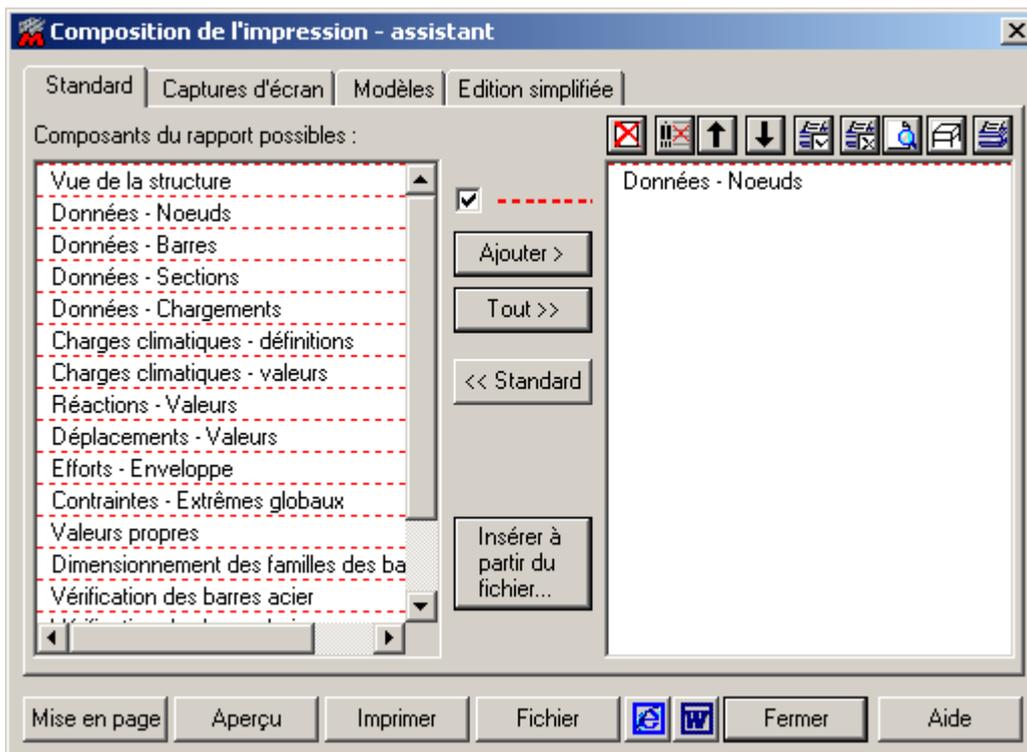
La création de la documentation pour le projet étudié est une étape importante. A l'issue de votre étude, **ROBOT** vous offre de nombreuses possibilités pour configurer la documentation afin qu'elle réponde à vos besoins.

Les notes de calcul regroupent toutes les informations saisies par l'utilisateur, les résultats des calculs ainsi que les résultats du dimensionnement. De plus, tous les graphiques, tableaux et vues issues de **ROBOT** peuvent être intégrés dans la note de calcul.

• Composition de l'impression

ROBOT vous permet de composer librement vos impressions.

→ Sélectionner la commande **Fichier/Composer impression**, le logiciel affiche la boîte de dialogue représentée sur la figure ci-dessous.



Dans cette boîte de dialogue, les éléments que vous avez créés en vue d'une impression future peuvent être utilisés pour composer une impression.

La boîte de dialogue **Composition de l'impression Assistant** comprend donc quatre onglets :

Standard

La boîte de dialogue correspondant à l'onglet Standard est présentée ci-dessus. Dans cette boîte, sont intégrées les données de base à propos de la structure (modèle de la structure, informations sur les noeuds et sur les barres formant la structure, charges appliquées), les résultats obtenus lors de l'analyse de la structure (réactions d'appuis, déplacements, les efforts internes, contraintes, valeurs propres pour l'analyse dynamique) et les informations concernant le dimensionnement et la vérification des éléments de la structure acier (barres et assemblages).

Ainsi, il est possible de composer son impression en sélectionnant les différents éléments de la fenêtre de gauche pour les amener dans la fenêtre de droite.

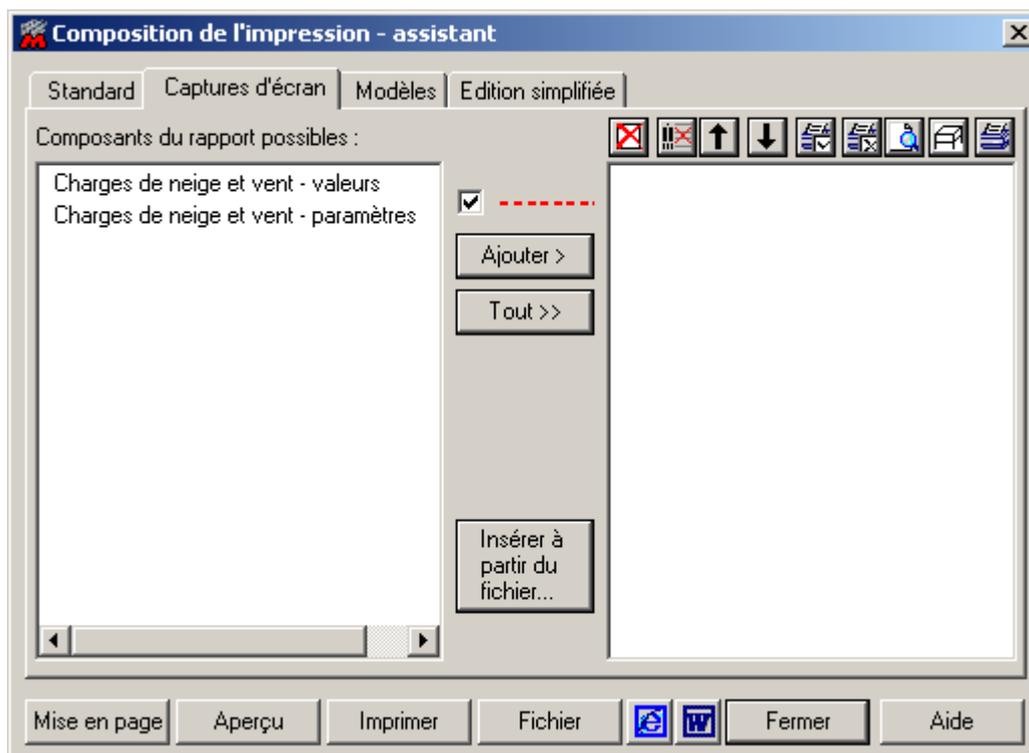
Captures d'écran

Au fur et à mesure de l'étude, il est possible d'effectuer une capture d'écran d'un tableau ou d'un diagramme.

→ Clic Droit dans la fenêtre que vous voulez capturer, puis **Capter écran**.

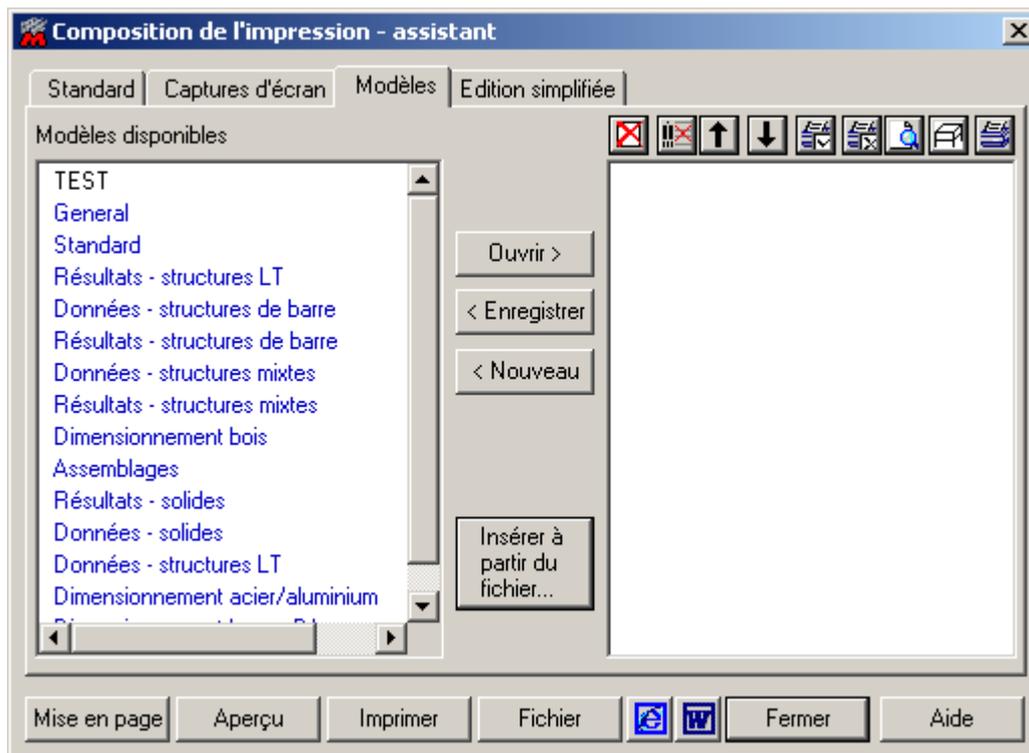
→ Affecter un nom à cette capture (ou laisser le nom par défaut).

La capture est alors stockée provisoirement pour une utilisation ultérieure dans la composition d'impression.



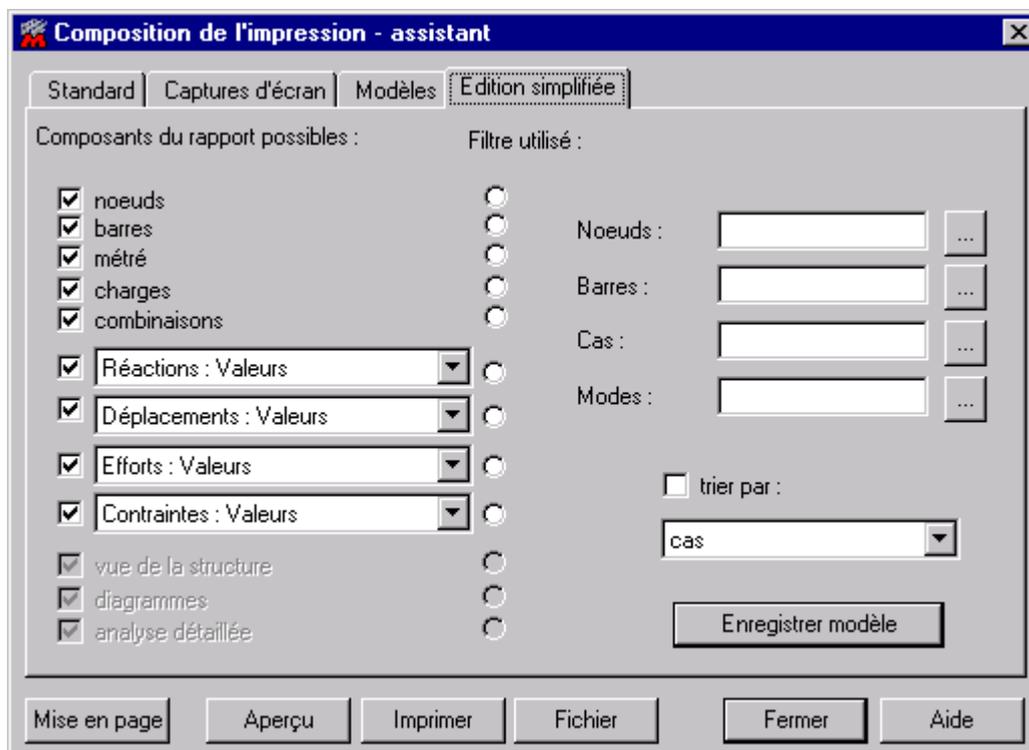
Modèles

Dans cet onglet, il est possible d'accéder à des compositions d'impressions prédéfinies, mais aussi de créer des nouveaux modèles utilisateur.



Edition simplifiée

Dans cet onglet, il est possible de composer une simple impression contenant les données et les résultats des calculs.



10. TUTORIELS VIDEO

Semelle rigide sur groupe de pieux en élastique

<https://vimeo.com/151534681>

Modélisation du sol en élasto-plastique

<https://vimeo.com/151560219>

Intégration d'un effet Gz sur des pieux

<https://vimeo.com/151563085>

Fonction surface d'influence

<https://vimeo.com/151564333>