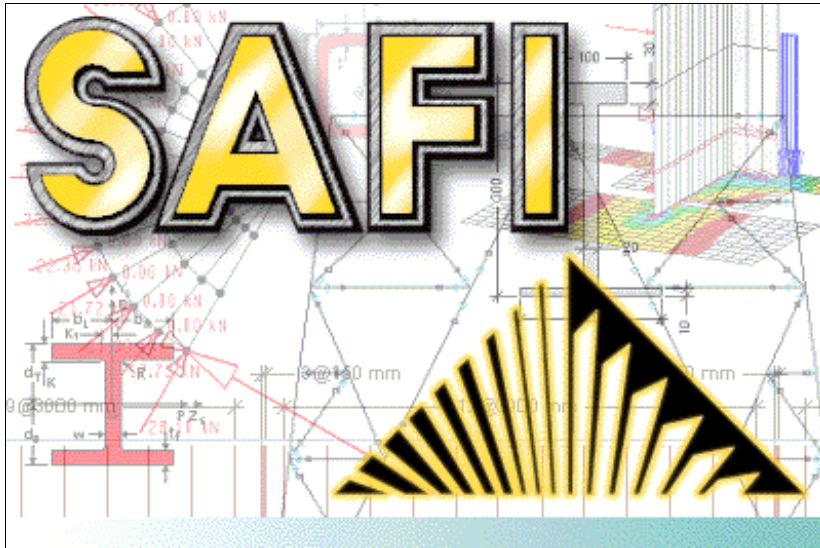




# Exemples de Projets SAFI

## Conception d'une poutre mixte

---



Société Informatique SAFI Inc.  
3393, chemin Sainte-Foy  
Ste-Foy, Québec, G1X 1S7  
Canada

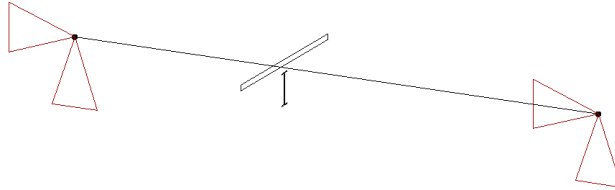
Contact: Rachik Elmaraghy, P.Eng., M.A.Sc.

Tél.: 1-418-654-9454  
1-800-810-9454  
Fax: 1-418-653-9475

Site Internet: <http://www.safi.com>  
Courriel: [info@safi.com](mailto:info@safi.com)

# Conception d'une poutre mixte

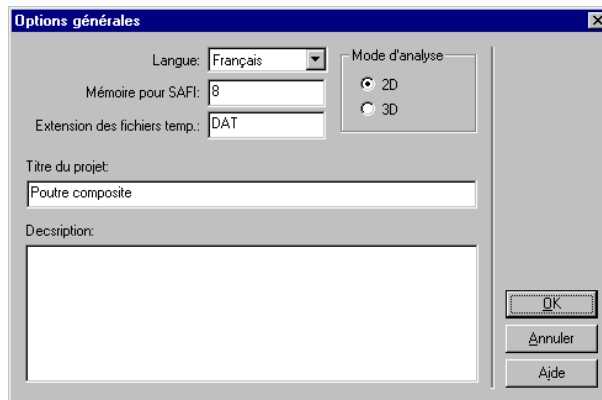
Cet exemple décrit la modélisation, l'analyse et le calcul de la résistance d'une poutre mixte acier-béton simplement supportée d'une longueur de 9.0 mètres.



Le profilé d'acier est profilé standard W360x33 de la base de données du CISC. La limite élastique de l'acier est de 300 MPa. Une dalle sur un tablier métallique est déposée sur la poutre. La connexion entre la poutre et la dalle est assurée par des goujons à tête.

## Création du projet

1. Pour créer un nouveau fichier lorsque SAFI est démarré, utiliser la commande **Nouveau** du menu **Fichier**.
2. Lorsque le nom et le répertoire de destination sont choisis, pressez le bouton **Enregistrer**.
3. La boîte de dialogue **Options générales** s'affiche ensuite. Vous pouvez ajuster les paramètres généraux du projets. Ces paramètres peuvent être modifiés ultérieurement. Pour ce modèle, vous devez choisir le **mode d'analyse 2D**.



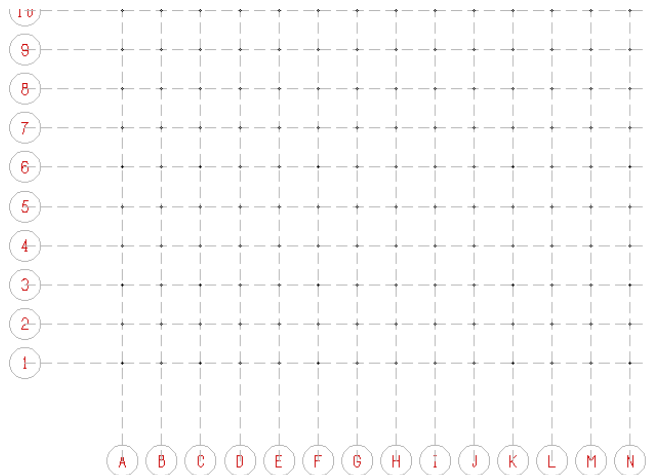
## Édition des matériaux

La limite élastique de l'acier est de 300 MPa et la contrainte de rupture du béton  $f_c$  est de 20 MPa.

## Création de la géométrie


### Édition des lignes de constructions


Puisque ce modèle est très simple, aucune modification au grillage de base n'est nécessaire. L'espacement par défaut entre les axes du grillage est de 1000.0 mm.



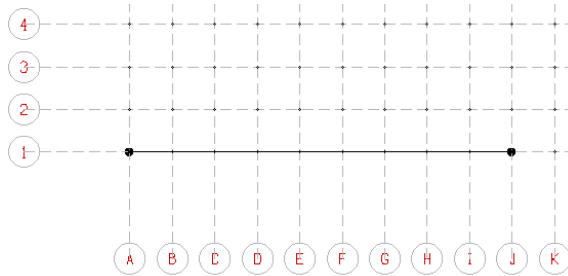
### Édition de la géométrie

Le modèle peut être généré de différentes manières selon vos techniques de travail et vos préférences. La manière la plus simple est d'utiliser les commandes d'édition graphique. Le modèle peut aussi être créé par l'intermédiaire de tables. Notez que le grillage n'est pas nécessaire si vous créez la géométrie à partir des tables. Ce grillage constitue néanmoins un bon système de repérage.

La commande **Ajouter** () du sous-menu **Joint** du menu **Édition** (cette commande est aussi accessible de la barre d'outils **Édition**) permet d'ajouter les joints un seul à la fois en cliquant aux intersections du grillage. Cependant, nous pouvons ajouter les joints et les membrures en une seule étape.

Activer la commande **Ajouter** () du sous-menu **Membrures** du menu **Édition** (cette commande est aussi accessible de la barre d'outils **Édition**). Vous pouvez créer rapidement les membrures en cliquant une première fois sur le premier joint (coordonnée  $x=0, y=0$ ). Ensuite, en déplaçant la


souris jusqu'à l'endroit désiré (coordonnée  $x=9000$ ,  $y=0$ ), cliquez une deuxième fois pour compléter l'édition de la membrure. Pour désactiver la commande d'ajout de membrure cliquez de nouveau sur le bouton **Ajouter** ou appuyez sur la touche **ESC** du clavier.




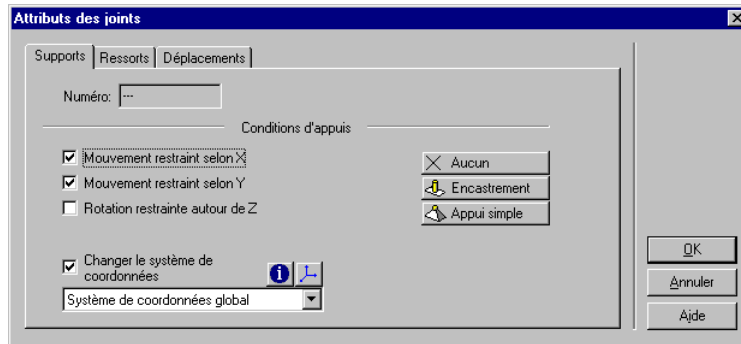
Activez la commande **Option du Grillage** du menu **Affichage**. Désactivez l'affichage du grillage en décochant l'option à gauche du nom du grillage, puis fermez la boîte de dialogue.

## Assignation des conditions d'appuis

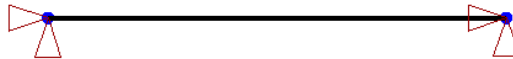
Pour assigner les supports ou d'autres attributs comme la section, les charges, les déplacements imposés, etc., vous devez premièrement sélectionner les objets auxquels seront assignés les attributs. Dans cet exemple, les supports seront assignés aux deux joints.

Pour sélectionner la membrure et ses joints, activez la commande **Sélectionner par fenêtre**  de la barre d'outils **Édition**. En maintenant le bouton de la souris enfoncé, créez une fenêtre autour de la membrure pour la sélectionner, puis relâchez le bouton de la souris.


Lorsque la sélection est complétée, les supports peuvent être assignés aux joints. Activez la commande **Attributs des joints** du sous-menu **Joint** du menu **Édition** ou le bouton **Attributs des joints**  sur la barre d'outils **Édition**. Modifiez la boîte de dialogue qui apparaît de la manière suivante:



Un symbole de support devrait apparaître sur chacun des joints.



## Assignation des propriétés des membrures

Pour ce modèle, nous assignerons une section W360x33 de la base de donnée du CISC. Puisque la membrure a déjà été sélectionnée à l'étape précédente, aucune sélection supplémentaire n'est requise pour assigner les attributs de membrures. Cliquez sur la commande **Attributs des membrures** du sous-menu **Membrure** du menu **Édition** ou le bouton **Attributs des membrures** () sur la barre d'outils **Édition**.


Attributs des membrures

Général

Numéro: ---

Nom: \_\_\_\_\_

Propriétés

Changer la section: 

Changer le type: Générique

Changer les paramètres d'analyse: Normal

Rotules

Rotule en MY au noeud i

Rotule en MZ au noeud i

Rotule en MY au noeud j

Rotule en MZ au noeud j

Fixités partielles (ratio)

1

1

1

1

Géométrie


Longueur: 0 mm

Changer l'angle bêta: 0 deg

OK

Annuler

Aide

Pour le moment aucune section n'est définie. Pour définir une section standard, cliquez sur le bouton  dans la partie supérieure droite de la liste des sections. Dans le menu qui apparaît, sélectionnez la commande **Bibliothèques de sections**.

Choix des sections standards et pré-définies

W360x33

348

127

5.8

8.5

Numéro de la section: 1

Matériau: 1 - Steel 300Mpa

Bibliothèque: CISC

Type de section: W

Nom de la section: W360x33

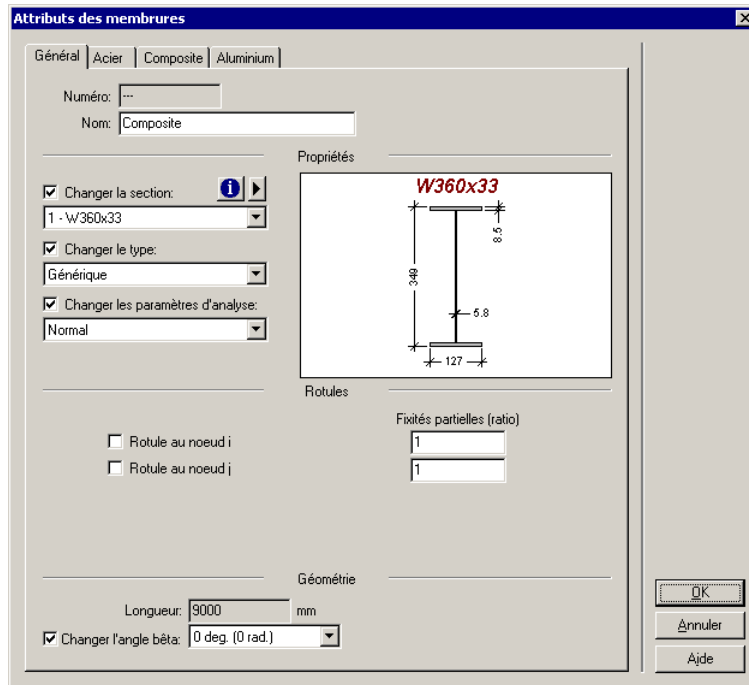
Ajouter

Fermer

Aide

La boîte de dialogue affichée permet d'insérer une section standard ou toute section enregistrée dans une bibliothèque personnalisée dans le fichier courant. Sélectionnez, le matériau *Steel 300MPa*. Sélectionnez la section W360x33 dans la liste **Nom de la section**. Ensuite, cliquez sur le bouton

**Ajouter**, puis ensuite sur le bouton **Fermer**. De retour dans la boîte de dialogue des **Attributs des membrures** sélectionnez cette section dans la liste des sections.



Assurez vous que l'option **Changer la section** est cochée et cliquez sur **OK** pour assigner la section à la membrure. Le bouton **i** permet d'afficher les dimensions et les propriétés de la section choisie dans la liste.

## Paramètres de la poutre composite


### Étape 1: Définition de la dalle de béton

Pour définir la dalle de béton vous devez spécifier les paramètres du béton et les paramètres de l'armature. Dans cet exemple, l'épaisseur de la dalle est de 65 mm et la résistance du béton est 20 MPa. L'armature n'est pas utilisée pour les besoins de cet exemple. Il est utile d'entrer les paramètres de l'armature uniquement lorsque l'on veut considérer l'effet de l'armature sur la résistance en flexion, soit en moment positif (dalle en compression) ou en moment négatif (dalle en tension). Lorsque vous spécifiez un **Espacement (s)** égal à zéro, l'aire totale d'armature est égale à la valeur entrée dans le champ **Aire (Ar)**. Lorsque la résistance de l'armature est négligée, les champs d'entrée de l'armature peuvent être zéro.

Pour une définition de chacun des champs de données d'entrée, veuillez vous référer à la section **Dalles** dans le chapitre correspondant à norme utilisée (chapitres 3 à 6).

Activez la commande **Dalle** du sous-menu **Application - Acier**. Ensuite, complétez les données d'entrées de la dalle telles que présentées ci-dessous.

The screenshot shows a software dialog box titled "Définition des dalles". It has a "No. de la dalle:" field with the value "1". Below this is a diagram of a slab cross-section with a label  $T_c$  for thickness. The "Matériau:" dropdown is set to "3 - Concete 20MPa". The "Épaisseur (Tc):" field is "65" mm. Below that is a diagram of the slab with reinforcement, with labels  $d$  for effective depth,  $s$  for spacing, and  $A_r$  for reinforcement area. The "Matériau:" dropdown is set to "1 - Steel 300Mpa". The "Aire (Ar):" field is "1000" mm.2. The "Position (d):" field is "25" mm. The "Espacement (s):" field is "0" mm. On the right side, there are buttons for "Table", "OK", "Annuler", and "Aide". At the bottom left, there is a small icon and the text "tc65\_20".

Le bouton  vous permet de renommer la dalle (*tc65,20*).

### Étape 2: Définition du pontage

La définition du pontage est optionnelle. Lorsqu'aucun pontage n'est défini, la dalle de béton est considérée comme une dalle pleine. Pour une définition de chacun des champs de données d'entrée, veuillez vous référer à la section **Pontages** dans le chapitre correspondant à norme utilisée (chapitres 3 à 6).

Activez la commande **Pontage** du sous-menu **Application - Acier**. Ensuite, complétez les données d'entrées du pontage telles que présentées ci-dessous.

Standard

No. du pontage: 1

Pontage

Type de pontage: Pontage nervuré

Dimensions

Épaisseur (Et): 1.2 mm

Hauteur des nervures (Hd): 75 mm

W1: 170 mm

W2: 190 mm

W3: 170 mm

Table

OK

Annuler

Aide

Deck 75

Notez que le poids propre de la dalle tient compte de la forme du pontage. La résistance des goujons est aussi influencée par les paramètres du pontage.

### Étape 3: Définition des connecteurs

La définition des connecteurs est optionnelle. Si les connecteurs ne sont pas définis, la résistance des connecteurs et le nombre de connecteurs nécessaires ne seront pas calculés. Les connecteurs utilisés dans cet exemple sont des goujons. Les goujons sont soudés sur l'aile supérieure de la poutre d'acier. Pour une définition de chacun des champs de données d'entrée, veuillez vous référer à la section **Connecteurs** dans le chapitre correspondant à norme utilisée (chapitres 3 à 6).

Activez la commande **Connecteurs** du sous-menu **Application - Acier**. Ensuite, complétez les données d'entrées des connecteurs telles que présentées ci-dessous.

No. Connecteur: 1

Connecteur

Type: Goujon

Contrainte de rupture (Fu): 415 MPa

Dimensions

Diamètre (d): 19 mm

Hauteur (H): 115 mm

Table


OK

Annuler

Aide

G19x115

#### Étape 4: Définition des poutres composites

Activez la commande **Éditer membrure** () du sous menu **Édition - Membrures**, sélectionnez l'onglet **Composite**. Notez que vous pouvez activer les poutres composites pour les types de profilés suivants: profilé en I à ailes égales ou inégales, profilé en C et profilés tubulaires carrés ou rectangulaires. Pour une définition de chacun des champs de données d'entrée, veuillez vous référer à la section **Poutres composites** dans le chapitre correspondant à norme utilisée (chapitres 3 à 6).

La largeur efficace (pour le calcul de la résistance) de la dalle est de 2000 mm. La largeur pour le calcul du poids propre est aussi de 2000 mm.

Dans la définition des poutres composites, vous devez spécifier si les nervures du pontage sont parallèles ou perpendiculaires à la poutre d'acier qui supporte la dalle. Lorsque les nervures du pontage sont parallèles, l'épaisseur du béton utilisée pour le calcul de la résistance est une épaisseur équivalente tenant compte des nervures.

Pour cet exemple, les nervures du tablier sont perpendiculaires à la poutre d'acier. Dans ce cas, uniquement l'épaisseur **tc** au-dessus des nervures est considéré pour le calcul de la résistance en flexion.

Un seul connecteur est utilisé par nervures. L'armature n'est pas considérée dans la résistance ni pour le moment positif, ni pour le moment négatif.

Dans cet exemple, on cherche à obtenir une action composite partielle (52 %). C'est-à-dire que le nombre de goujons à l'interface acier-béton sont réduits par rapport au nombre requis pour obtenir une action composite totale. Dans les tables de résultats, le nombre de goujons requis pour assurer l'action composite est imprimé.



Pour le calcul de la flèche à long terme, il est possible de diminuer la rigidité du béton pour tenir compte du fluage avec un facteur qui peut par exemple prendre les valeurs de 2 ou 3. Dans cet exemple, la valeur choisie pour le **Facteur de réduction de  $E_c$**  est de 1.0 (flèche à long terme non considérée).

**Attributs des membrures**

Général | Acier | Composite | Béton | Pont

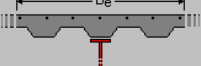
No.: ---  
Nom: C

**Dalle**



Changer la dalle    
1 - tc65,20

Changer la largeur efficace ( $B_e$ )  
2000 mm

Changer la largeur utilisée pour le calcul du poids propre  
2000 mm

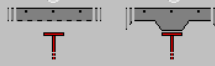


**Pontage**



Changer le pontage    
1 - Deck 75

Changer l'orientation du pontage

Changer le nombre de connecteurs par nervure  
1



**Connecteurs**

Changer les connecteurs    
1 - G19x115

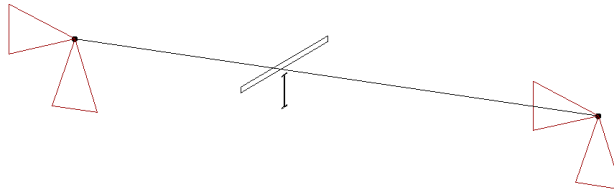
Changer le ratio de participation ( $\%Q_r$ )  
0,52

**Options de conception**

Utiliser les armatures en moment négatif  
 Utiliser les armatures en moment positif  
 Changer les options d'inertie efficace  
Inertie composite (M+)

Changer le facteur de réduction de  $E_c (>= 1,0)$   
1

OK  
Annuler  
Aide



Il est important de noter que même si la dalle de béton se retrouve en tension sur une partie de la poutre (poutre continue), les propriétés de la section telles que calculées par le logiciel sont homogènes sur toute la longueur d'une poutre. L'inertie calculée pour une poutre composite est celle correspondant à la section composite en zone de moment positif. L'aire de la section utilisée correspond à l'aire homogénéisée de la section. Les autres propriétés de rigidité (inertie sur l'axe faible, de torsion,...) sont celles de la section d'acier seule.

## Assignment des charges

### Étape 1: Création des charges de bases

Pour éditer les charges de bases, vous devez activer la commande **Charges de base** du menu **Tables**. Complétez la table de manière indiquée ci-dessous, puis pressez **OK**.

	Nom de la charge de base	Type de charge
1	Poids Propre	Charge morte
2	Surcharge	Charge vive
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		




OK  
Annuler  
Aide

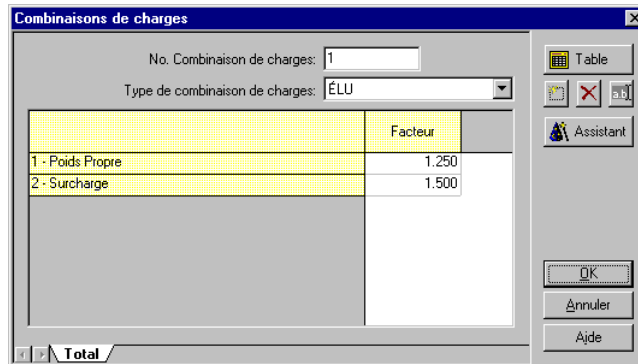
Toutes les charges à l'intérieur d'une même charge de base auront la même pondération dans les **combinaisons de charges** (voir étape suivante). Notez que des charges de bases peuvent être ajoutées à tout moment.

### Étape 2: Création des combinaisons de charges

Les combinaisons de charges permettent d'effectuer divers cas de chargement avec des pondération qui peuvent varier pour chaque combinaison. Pour cet exemple, une seule combinaison est créée.

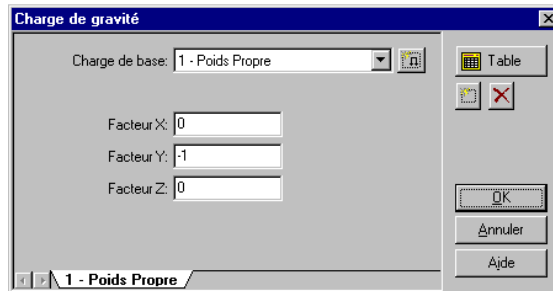
1.1.25 Poids Propre + 1.5 Surcharge

Sélectionnez la commande **Combinaisons de chargement** (  ) du menu **Tables**. Pour chaque nouvelle combinaison de chargement, vous devez presser sur la touche . Lorsque la table est visible, vous pouvez entrer les facteurs de pondération associés aux charges de bases. Pour modifier le nom de la combinaison de charge, double cliquez sur l'onglet correspondant ou cliquez sur le bouton . Lorsque l'entrée de la combinaison de charges est complétée, pressez **OK** pour quitter la boîte de dialogue.




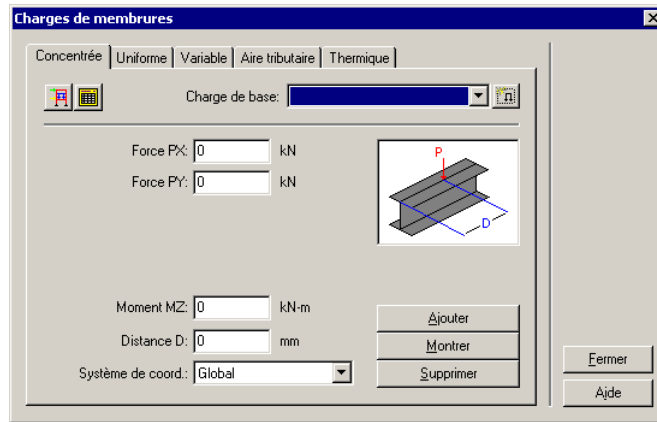
### Étape 3: Ajout des charges permanentes

La charge permanente ajoutée correspond au poids propre de chacun des éléments de la structure. Pour ajouter cette charge, sélectionnez la commande **Charge de gravité** du sous-menu **Charges générales** du menu **Tables**. Vous n'avez qu'à indiquer la charge de gravité, c'est-à-dire -1.0 dans la direction Y. La figure ci-dessous présente la boîte de dialogue une fois les données entrées.



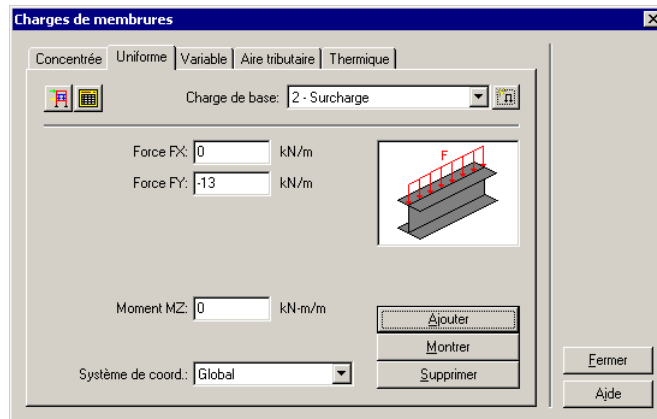
### Étape 4: Ajout des surcharges

Cliquez sur la commande **Charges de membrures** du sous menu **Édition** → **Charges**. Cette commande est aussi accessible par le bouton **Assigner une charge** (  ) de la barre d'outils **Édition**.

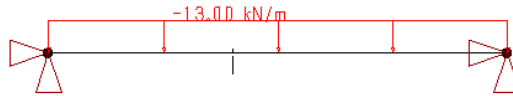


Chaque onglet de cette boîte de dialogue est divisé en deux parties. La partie supérieure est commune à tous les onglets, elle permet de sélectionner la charge de base dans laquelle les nouvelles charges seront ajoutées. La seconde partie permet de définir les paramètres requis pour définir une charge.

Cliquez sur l'onglet **Uniforme** pour afficher les données d'entrées pour les charges uniformes sur poutre, puis sélectionnez la charge de base *Surcharge*. Remplissez les données comme montré ci-dessous et cliquez sur le bouton **Ajouter** pour assigner cette charge à la membrure sélectionnée. L'intensité est négative pour indiquer que la charge agit dans la direction négative de l'axe Y.



Cliquez sur le bouton **Fermer**. La charge ajoutée devrait être visible à l'écran.



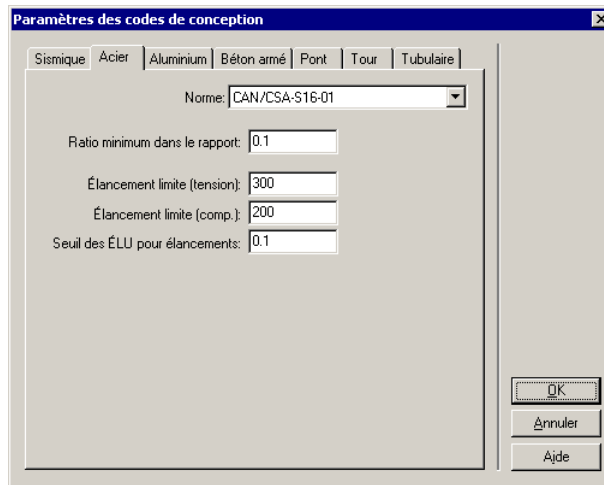
## Vérification des données d'entrées

Avant de procéder à l'analyse, il est d'usage de faire une vérification rapide du modèle. SAFI dispose de plusieurs outils pour vérifier et corriger le modèle. Un de ceux-ci est la commande **Vérification des données** (🔍) du menu **Analyse**. Cette commande vérifie les instabilités simples, les joints dédoublés ou orphelins, les attributs de membrures manquant, etc.

## Choix de la norme de vérification d'acier


La résistance des poutres mixtes est reliée à une norme d'acier correspondante. Pour l'exemple nous choisissons la norme CAN/CSA-S16-01. Le calcul de la résistance des poutres composites est couvert pour toutes les normes d'acier de SAFI sauf pour la norme AISC-ASD-89.

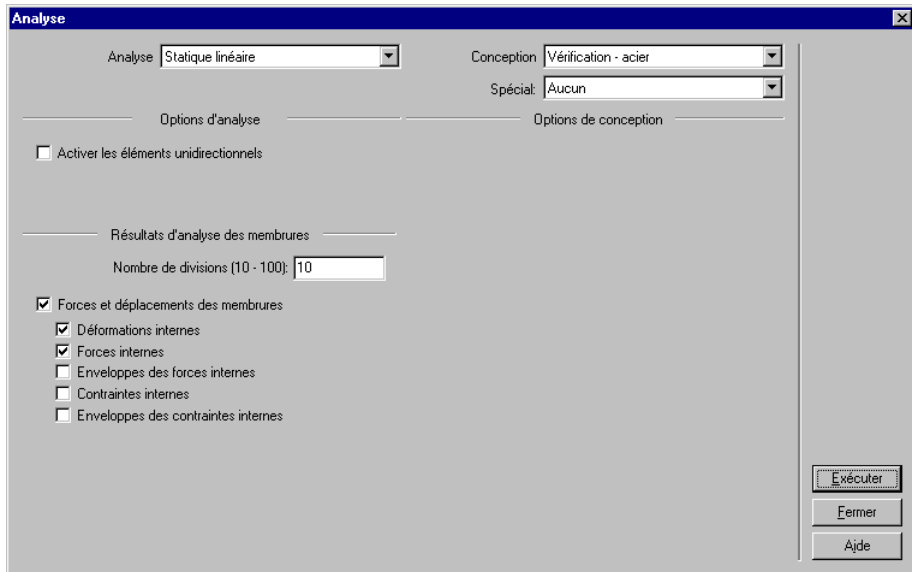
Pour choisir la norme, activez la commande **Paramètres** du sous-menu **Application - Acier**.



## Exécution de l'analyse

Nous sommes maintenant prêts à effectuer une analyse statique et la vérification de la résistance de la poutre mixte. Toutes les commandes d'analyses, de vérification et de conceptions sont concentrées à

la même place pour simplifier les opérations de solution. Pour afficher la boîte des solution, sélectionnez la commande **Exécuter** du menu **Analyse**. La commande de solution (  ) est aussi accessible de la barre d'outils **Principale**.



Les options d'analyses et de conceptions disponibles dépendent des modules activés de la version se trouvant sur votre ordinateur. Pour exécuter la solution, sélectionnez *statique linéaire* dans la liste **Analyse**, sélectionnez *Vérification - acier* dans la liste **Conception** puis cliquez sur le bouton **Exécuter**.

## Résultats et rapport

Les résultats spécifiques aux sections mixtes acier-béton sont:

- Propriétés des sections composites (disponible dans le rapport uniquement)
  - Inertie homogénéisée ( $k1 = 1N$ )
  - Position de l'axe neutre élastique ( $k1 = 1N$ )
  - Inertie homogénéisée ( $k2 = 3N$ )
  - Position de l'axe neutre élastique ( $k2 = 3N$ )
- Résistance au cisaillement (dans l'âme de la poutre d'acier seule)
- Flexion - Poutres mixtes
  - Résistance à la flexion de la poutre composite (moment positif)
  - Résistance à la flexion de la poutre composite ou acier seul (moment négatif)
  - Espacement entre supports latéraux et longueur critique (moment négatif)

- Résistance à la flexion de la poutre composite avec support latéral continu (moment négatif)
- Résultats additionnels - Poutres mixtes
  - Résistance à la flexion de la poutre d'acier seul (moment positif)
  - Espacement entre supports latéraux et longueur critique (moment positif)
  - Type de distribution utilisé dans le calcul de la résistance de la poutre composite
- Cisaillement horizontal - Poutres mixtes
  - Résistance des goujons
  - Cisaillement maximal à l'interface acier béton (moment positif et négatif)
  - Nombre de goujons "N" entre le moment maximal et le moment nul.

Les résultats de l'exemple présent peuvent être comparés avec ceux de la référence *Calcul des charpentes d'acier*, Picard et Beaulieu (1991).

**Résultats de la référence:**

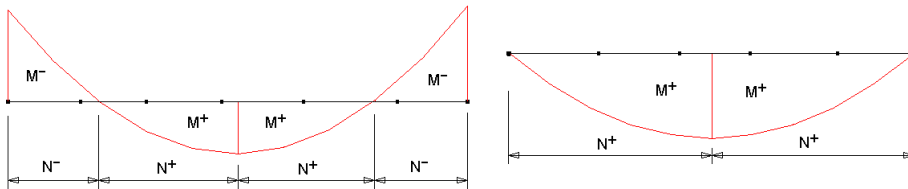
- Résistance des goujons (p. 714):	65.17 kN
- Résistance en flexion ( $M_r^+$ ) (p. 732)	268 kN
- Nombre de goujons requis (p. 731)	18
- Moment d'inertie composite (p. 753)	$342.16 \times 10^6 \text{ mm}^4$
- Moment d'inertie efficace (p. 753)	$269.5 \times 10^6 \text{ mm}^4$

Le nombre de goujons requis est celui correspondant à longueur totale de la poutre.

**Résultats de SAFI**

**Résistance - Flexion Sections Composites**

Résist. Flexion $M_r(+)$ kN-m	Résist. non sup. $M_r(-)$ kN-m	Résist. supportée $M_r(-)$ kN-m	--- Moment négatif ---		
			Support Ls mm	Limite Lu mm	Coef. $w_2$
267.99	22.31	146.39	9000.00	1720.77	1.00



Pour cet exemple, il n'y a pas de zone de moment négatif sur la poutre.

La **résistance en flexion  $M_r^{(+)}$**  correspond à la résistance de la poutre lorsque la dalle de béton est en compression. Pour cet exemple, le moment maximum positif est situé au centre de la poutre.

La **résistance en flexion  $M_r^{(-)}$**  tient compte du support latéral de l'aile inférieure au déversement. La résistance **non supportée** est imprimée en tenant compte des facteurs **Ls**, **Lu** et **w2** (ce paramètre diffère d'une norme à l'autre). La résistance **supportée** qui est imprimée à titre indicatif, correspond à la résistance en moment négatif dans le cas où l'aile inférieure est supportée de manière continue. Puisque dans les données d'entrées, nous avons spécifié que l'armature n'agissait pas en moment négatif, la résistance imprimée correspond à la résistance de la poutre d'acier seule.

#### Connecteurs de Cisaillement - Sections Composites

Résist. Goujon kN	Moment M(+)		Moment M(-)	
	Vh kN	N	Vh kN	N
65.17	585.47	9	.00	0

La distribution des goujons est montrée dans la figure montré ci-haut. La résistance des goujons tient compte de la résistance de la dalle de béton, de la résistance des goujons, de la géométrie des nervures et du nombre de goujons par nervure. Le nombre de goujons requis **N** est celui correspondant au cisaillement horizontal **Vh** à l'interface entre le béton et la poutre d'acier entre le moment nul et le moment maximal **M<sup>(+)</sup>**. Donc, pour cet exemple, le nombre **N** pour le moment **M<sup>(+)</sup>** est spécifié pour la demi-longueur de la poutre.

Dans les zones de moment négatif, la dalle de béton est en tension. Pour activer l'action composite en zones de moment négatif, des goujons doivent être ajoutés dans ces zones. Dans cet exemple, la poutre n'est soumise à aucun moment négatif et la coche pour activer l'action composite en zone de moment négatif n'est pas active.

#### Propriétés des Sections Composites

Section Nom	Mat. No.	Iner. k1	Ratio k1	Inertie k1 mm.4	Y élas. k1 mm	Ratio k2	Inertie k2 mm.4	Y élas. k2 mm
W360x33	1	M+	1.0	.34216E+09	391.01	3.0	.25817E+09	322.34

L'**inertie  $M^+$**  tient compte de la dalle de béton. Lorsque l'action composite n'est pas totale (moins de 100%), l'**inertie efficace  $M^+$**  est inférieure à l'**inertie  $M^+$** . Pour le calcul des propriétés en zone de moment négatif, la dalle de béton en tension est négligée. L'**inertie  $M^-$**  tient compte de l'inertie de la poutre d'acier et des paramètres de l'armature. La position de l'axe neutre élastique est imprimée pour le moment **M<sup>+</sup>** et **M<sup>-</sup>**. La valeur **Y** est calculée à partir de la base de la poutre d'acier.