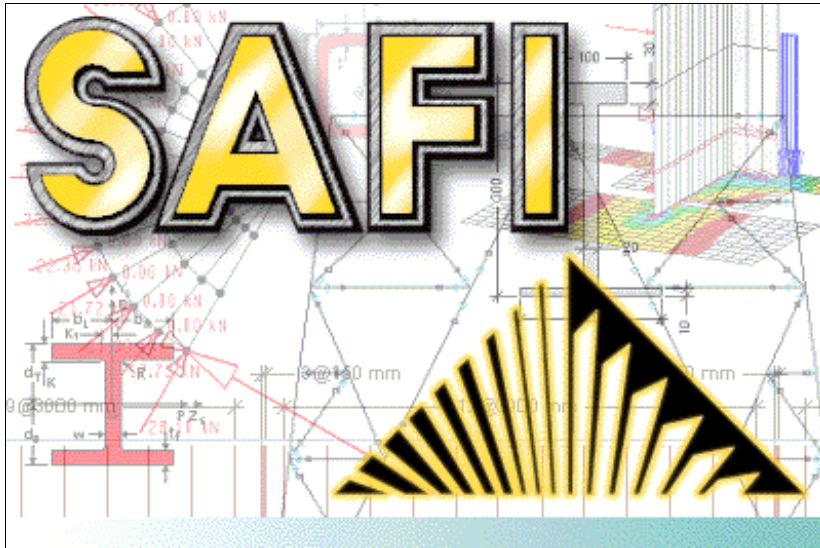




# Exemples de Projets SAFI

Analyse par éléments finis

---



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

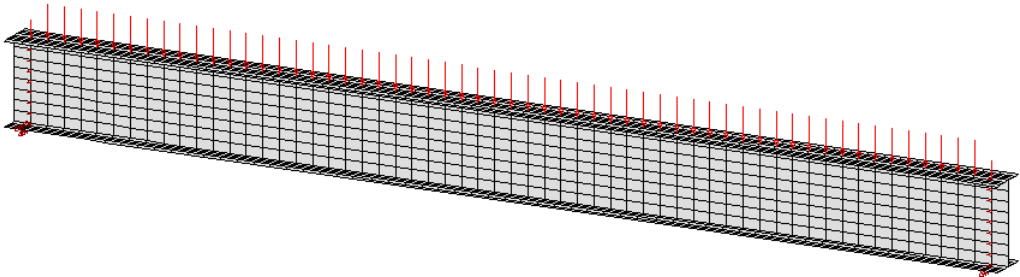
Contact: Rachik Elmaraghy, P.Eng., M.A.Sc.

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)

# Analyse par éléments finis

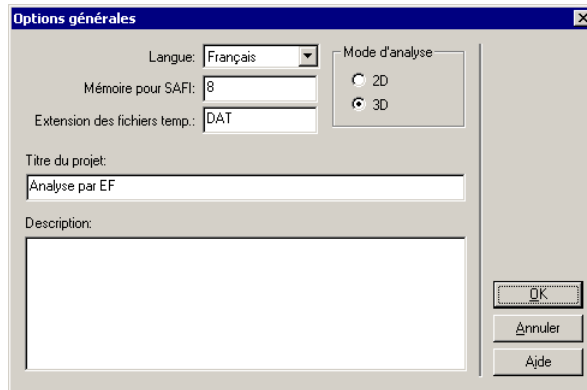
Cet exemple décrit la modélisation et l'analyse d'une poutre simplement supportée d'une longueur de 4.8 mètres dont les supports sont disposés à 80 mm des extrémités.



Le profilé d'acier utilisé a 200 mm de largeur, 400 mm de hauteur et est formé de plaques de 10 mm d'épaisseurs. La limite élastique de l'acier est de 350 MPa. Une charge uniforme de 50 kN/m est appliquée à la poutre sur son aile supérieure. La poutre est déposée sur les appuis, c'est-à-dire que les supports verticaux ne s'appliquent qu'à l'aile inférieure. Un support latéral supporte l'âme sur toute sa hauteur aux appuis.

## 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 3D**.

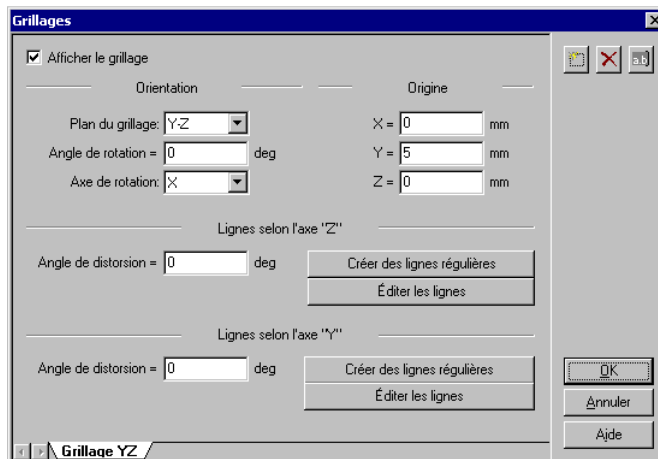


## Création de la géométrie

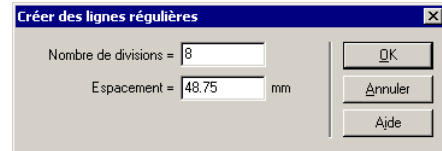
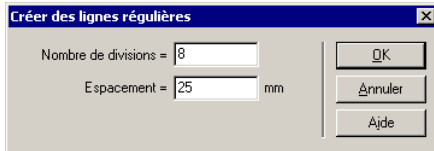
### Édition des lignes de constructions


Le modèle peut être généré de différentes manières selon vos techniques de travail et vos préférences. 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.

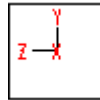
Pour créer ce modèle, il est pratique de créer la section à  $X=0$ , dans le plan  $Y-Z$ , à l'aide du grillage. Le grillage utilisé pour la section passe par le centre de gravité des plaques. La hauteur de la section est de 400 mm et les plaques des ailes ont 10 mm d'épaisseur. Ainsi, le point inférieure de la section sera à la hauteur  $Y=5$  mm et le point supérieur de la section sera à  $Y=395$  mm.





Modifiez les paramètres du grillage en fonction du modèle actuel. D'abord il faut changer le plan pour obtenir un plan horizontal **Y-Z**. Changez le nom du grillage pour *Plan YZ*. Huit lignes de constructions espacés également de 25 mm sont requises dans la direction **Z**. Cliquez sur la commande **Créer des lignes régulières** dans la section **Lignes selon l'axe "Z"** et spécifiez un **Nombre de division** égal à 8 et un **Espacement** de 25 mm. Ensuite, cliquez sur la commande **Créer des lignes régulières** dans la section **Lignes selon l'axe "Y"** et spécifiez un **Nombre de division** égal à 8 et un **Espacement** de  $(400-10) / 8=48.75$  mm.




Ce nouveau grillage n'est pas dans le même plan que le précédent. D'abord pressez sur le bouton **Vue de droite** () de la barre d'outils **Caméra**. Remarquez dans la partie inférieure gauche de l'écran les axes globaux X, Y et Z. L'axe X sort de l'écran.

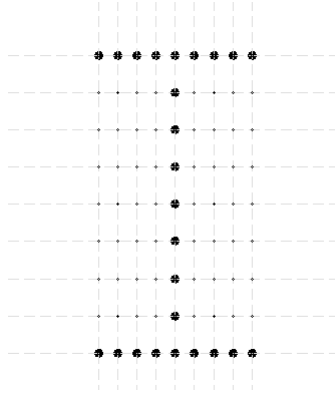


Pour ajuster la taille visible et la position du grillage, utilisez la commande **Ajuster à l'écran** () de la barre d'outils **Caméra**. Vous pouvez aussi utiliser la commande **Zoom par région** ()

## Création des joints de la section

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.


Vous pouvez créer rapidement les joints en faisant une fenêtre, tout en maintenant le bouton de la souris enfoncé, autour des points du grillage où des joints doivent être créés. Lorsque vous avez terminé, pour désactiver la commande d'ajout de joint cliquez de nouveau sur le bouton **Ajouter** ou appuyez sur la touche **ESC** du clavier.

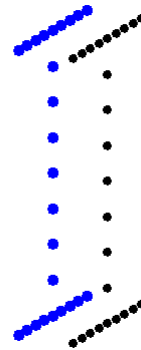
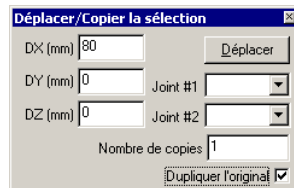



Activez la commande **Option du Grillage** du menu **Affichage**. Désactivez l'affichage du grillage en décochant l'option afficher le grillage, puis fermez la boîte de dialogue.

### Création des plaques d'éléments finis

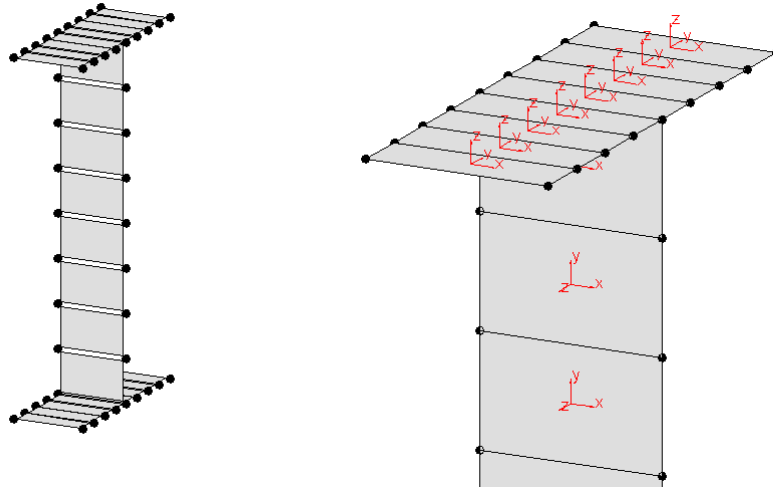
D'abord pressez sur le bouton **Vue isométrique** () de la barre d'outils **Caméra**. Pour sélectionner tous les joints, activez la commande **Sélectionner tout** () de la barre d'outils **Édition**.

Ouvrez la boîte de dialogue **Déplacer/copier** () du sous menu **Edition** → **Opérations** (cette commande est aussi accessible de la barre d'outils **Édition**). Remplissez la boîte telle que celle ci-dessous, puis pressez sur le bouton **Déplacer**. Le résultat obtenu devrait ressembler à l'image ci-dessous.

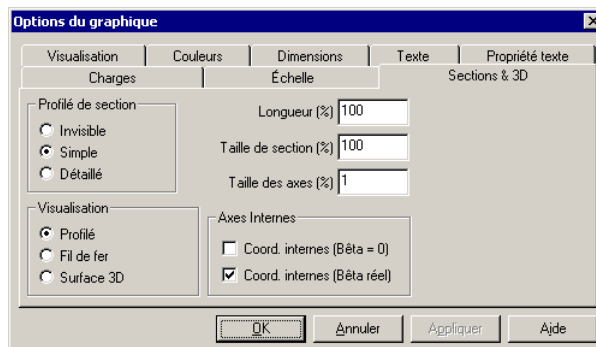




Ensuite activez la commande **Ajouter** () du sous menu **Edition** → **Plaques** (cette commande est aussi accessible de la barre d'outils **Édition**). En utilisant cette commande, cliquez successivement

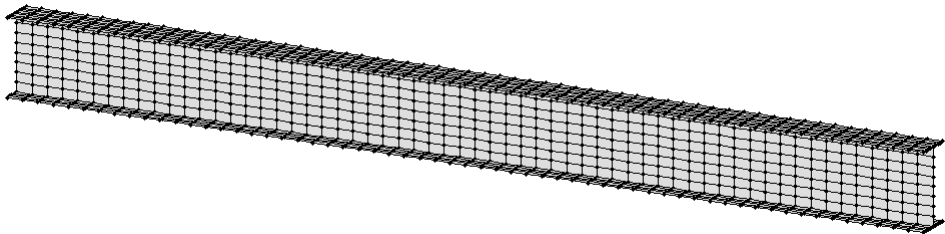
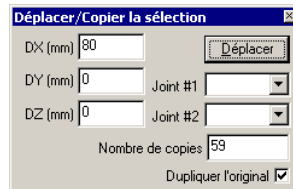
sur quatre noeuds pour créer chaque plaque. Notez que l'ordre de création joints des plaques est très important puisque les résultats devront être interprétés selon ces axes. Un ordre de création logique consiste à cliquer sur les deux premiers noeuds de la plaque pour créer une ligne dans la direction X globale positive et à compléter la plaque en cliquant sur les deux joints suivants tout en tournant dans le sens anti-horaire. La figure ci-dessous présente la section de poutre lorsque toutes les plaques sont créées.



Pour visualiser les axes internes des plaques ouvrez la boîte de dialogue **Options du graphique** du sous menu **Affichage**. Modifiez les données d'entrées de l'onglet **Sections & 3D** de la manière suivante.




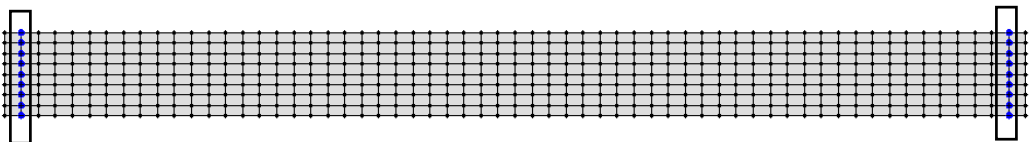
L'étape suivante consiste à effectuer une copie de la section de poutre créer pour créer la poutre sur toute sa longueur. D'abord, sélectionnez toutes les plaques, activez la commande **Sélectionner tout**  de la barre d'outils **Édition**. Ensuite, ouvrez la boîte de dialogue **Déplacer/copier**  du sous menu **Edition** → **Opérations** (cette commande est aussi accessible de la barre d'outils **Édition**). Remplissez la boîte telle que celle ci-dessous, puis pressez sur le bouton **Déplacer**. Le résultat obtenu devrait ressembler à l'image ci-dessous. Notez que vous pouvez diminuer la taille de l'affichage des joints en utilisant l'onglet *Dimensions* de la boîte de dialogue **Options du graphique** du sous menu **Affichage**.




## 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.

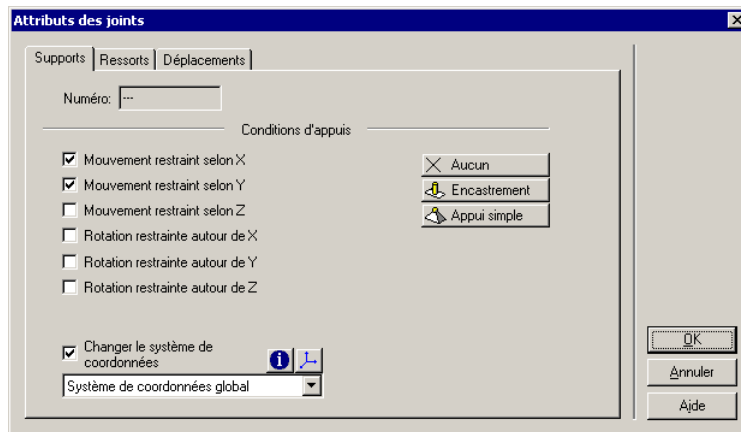
Pour sélectionner les joints où il y aura des appuis, activez la commande **Sélectionner par fenêtre**  de la barre d'outils **Édition**. En maintenant le bouton de la souris enfoncé, créez une fenêtre autour des joints pour les sélectionner, puis relâchez le bouton de la souris. Pour effectuer une deuxième sélection tout en évitant de perdre la première sélection, utiliser la même procédure, mais cette fois en maintenant la touche MAJ du clavier.



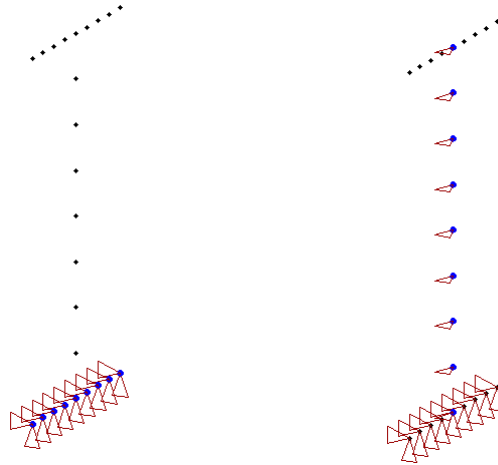
Ensuite, activez la commande **Afficher/Masquer** en enfonçant le bouton  de la barre d'outil **Caméra**. De retour en vue isométrique, vous pouvez visualiser les deux sections où sont appliqué les supports.



Ensuite, sélectionnez les joints de l'aile inférieure du supports de gauche pour appliquer les conditions d'appuis. 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'utils **Édition**. Modifiez la boîte de dialogue qui apparaît de la manière suivante:

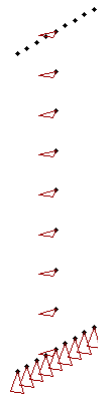



Un symbole de support devrait apparaître sur chacun des joints sélectionnés.





Complétez ensuite les conditions d'appuis pour le support latéral de l'âme en utilisant la même procédure, mais cette fois en bloquant les déplacements dans la direction Z.

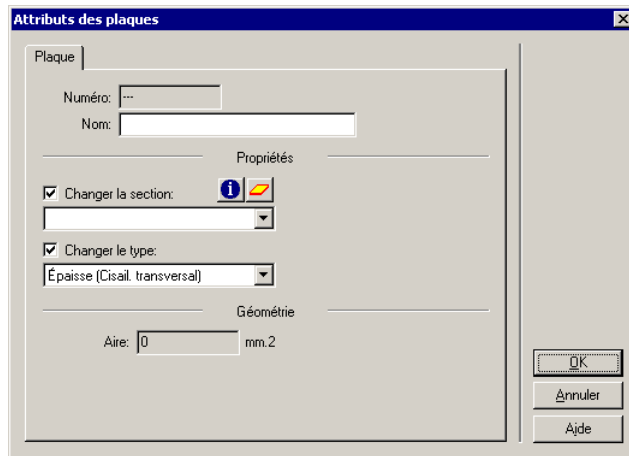
Pour finaliser les conditions d'appuis, sélectionnez les joints supports de droite et en utilisant la même procédure, appliquez les conditions d'appuis. Pour le deuxième appui, l'aile inférieure n'est soutenue que dans la direction Y et l'âme est retenue dans la direction Z.




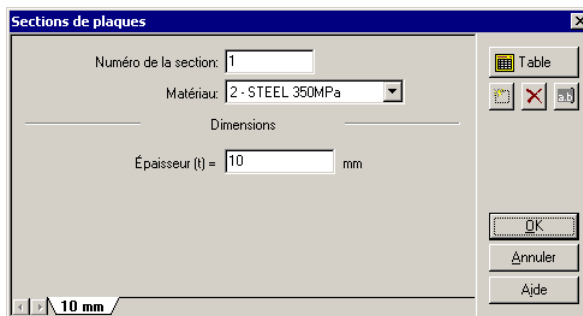
Cliquez sur le bouton **Afficher/Masquer**  pour désactiver le masque, la structure redevient alors visible.

## Assignation des propriétés des plaques

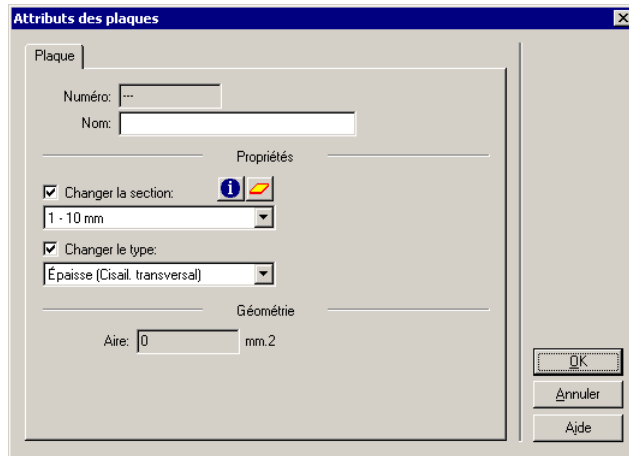
Pour ce modèle, nous assignerons une plaque de 10 mm à toutes les plaques. D'abord, sélectionnez toutes les plaques, activez la commande **Sélectionner tout**  de la barre d'outils **Édition**. Cliquez sur la commande **Attributs des plaques** du sous-menu **Plaques** du menu **Édition** ou le bouton **Attributs des plaques**  sur la barre d'outils **Édition**.



Pour le moment aucune section n'est définie. Pour définir une section, cliquez sur le bouton  dans la partie supérieure droite de la liste des sections. Compléter les données telles que présentées dans la boîte de dialogue ci-dessous, puis pressez **OK**.



De retour dans la boîte de dialogue des **Attributs des plaques** sélectionnez cette section dans la liste des sections.

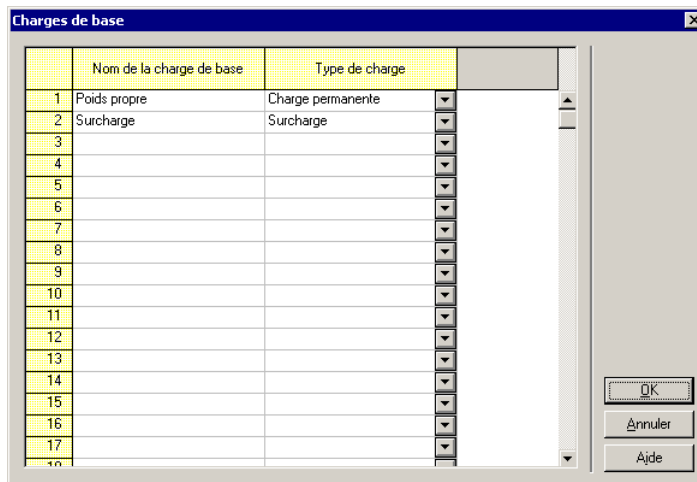


Assurez vous que l'option **Changer la section** est cochée et cliquez sur **OK** pour assigner la section aux plaques sélectionnées. Le bouton ⓘ permet d'afficher les dimensions et les propriétés de la section choisie dans la liste.

## 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**.






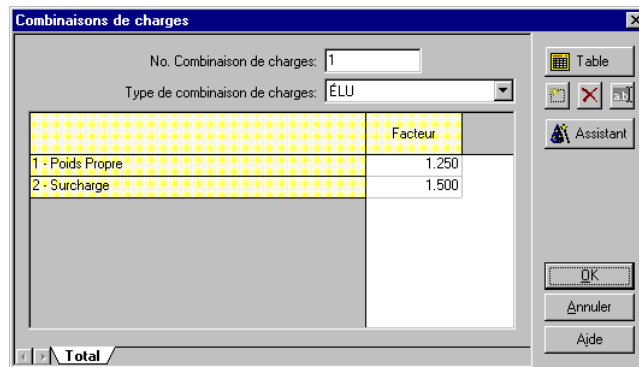
Toutes les charges à l'intérieure d'une même charge de base auront la même pondération dans les **combinaisons de charges** (voir étape suivante). Notez que des charges de bases peuvent être ajoutées à tout moment.

### 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.

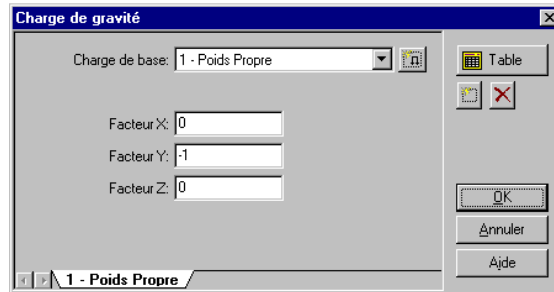
#### 1.25 Poids Propre + 1.5 Surcharge

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 fermer la boîte de dialogue.




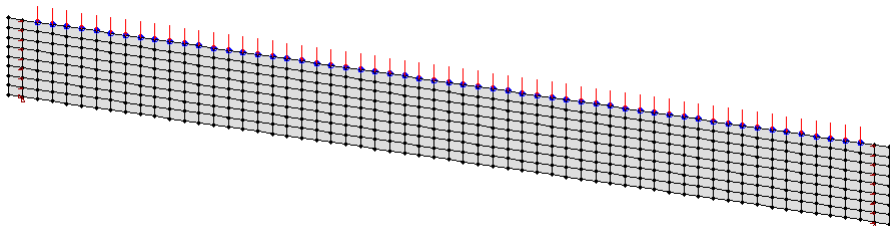
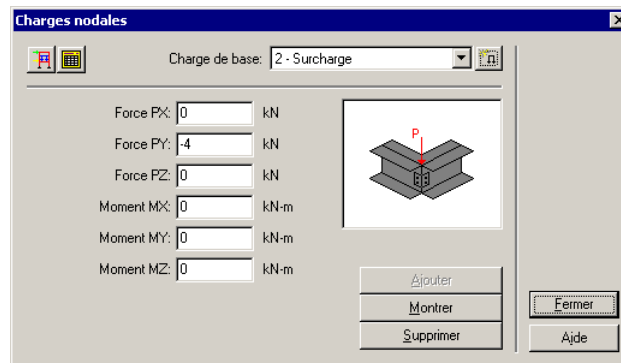
### Étape 3: Ajout des charges permanentes

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 direction de 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.

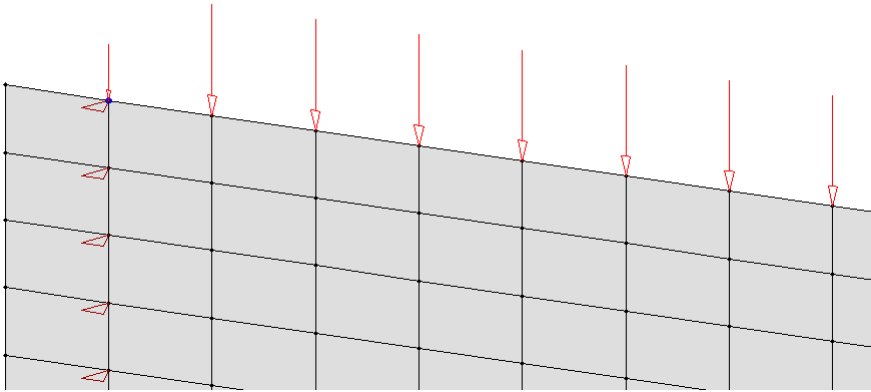


#### Étape 4: Ajout des surcharges

En utilisant la commande **Afficher/Masquer** et en utilisant la commande de sélection par fenêtre, sélectionnez tous les joints à l'intersection de l'aile supérieure et de l'âme se situant entre les deux appuis. Cliquez sur la commande **Charges nodales** du sous menu **Édition** → **Charges**. Cette commande est aussi accessible par le bouton **Assigner une charge** (  ) de la barre d'outils **Édition**).



Attention, la charge appliquée aux noeuds situés aux extrémités de la charge uniforme doit être égale à la demie de la charge aux autres noeuds, la surface tributaire étant divisée par deux.

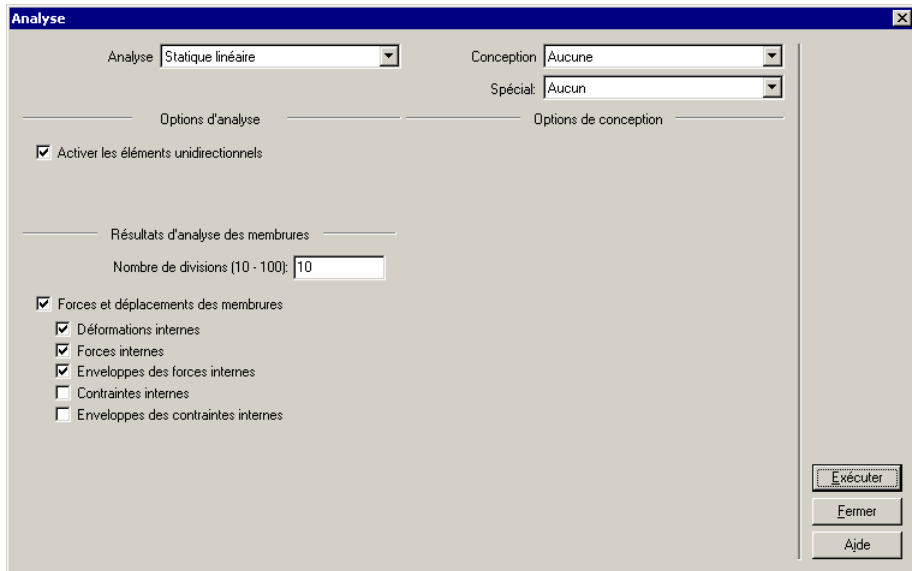


## Vérification des données d'entrées

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.

## Exécution de l'analyse

Nous sommes maintenant prêt à effectuer une analyse statique de la poutre. 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 de 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 *Aucune* dans la liste **Conception** puis cliquez sur le bouton **Exécuter**.

## Résultats et rapport

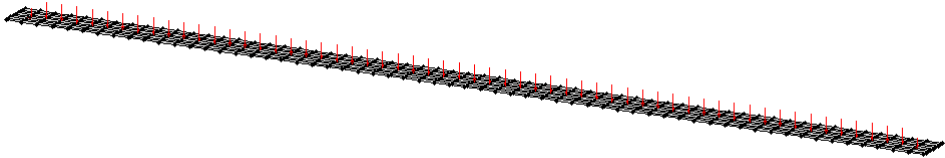
Les résultats spécifiques aux éléments finis sont:


- Déplacements
- Forces nodales sur les plaques ( $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_{xy}$ )
- Cisaillement transversal ( $V_{xz}$ ,  $V_{yz}$ )
- Moments ( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_{xy}$ )
- Les contraintes de Von Mises

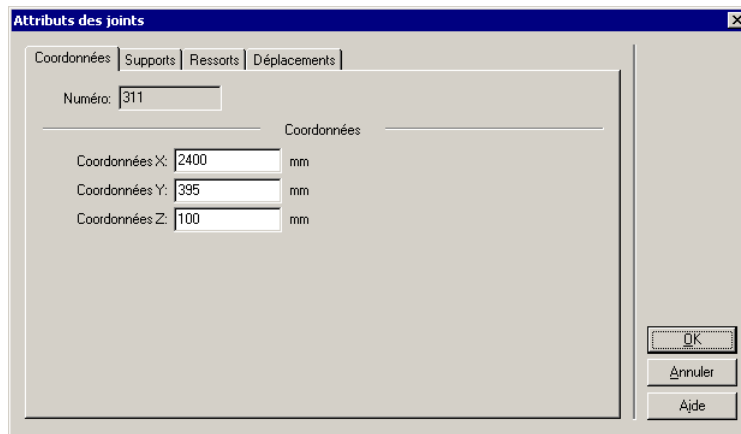
Ces résultats peuvent être visualisés dans les tables numériques ou sous forme d'iso-couleurs. Les résultats des iso-couleurs sont disponibles par le bouton **Contour** sur la barre de résultats.

Déterminons la contrainte de Von-Mises à l'aile supérieure de la poutre au centre de la travée. La contrainte de Von-Mises est une contrainte équivalente en un point qui peut être comparée à la limite élastique du matériau (350 MPa) pour déterminer s'il y a plastification.

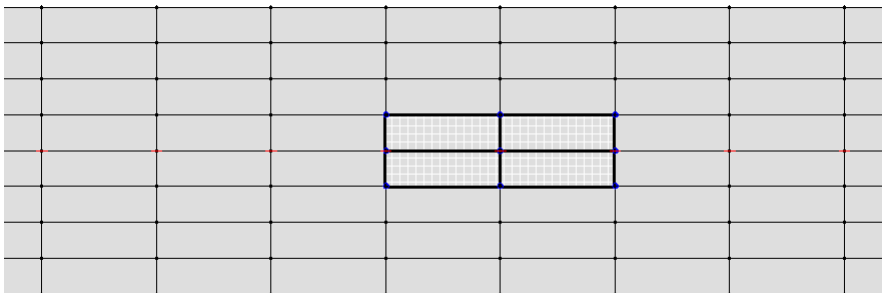
En utilisant la commande **Afficher/Masquer** et en utilisant la commande de sélection par fenêtre, isolez les plaques de l'aile supérieure de la poutre.



Activez la commande **Éditer un joint** du sous-menu **Joint** du menu **Édition** ou le bouton **Éditer un joint** () sur la barre d'outils **Édition**. Cette commande vous permet facilement de déterminer le joint central de l'aile supérieure de la poutre par sa coordonnée X=2400 mm.



Notez que les résultats numériques sont obtenus par la méthode des éléments finis sont disponibles sur les plaques autour de ce joints. Sélectionnez les plaques tout autour du joint central.



Ensuite, activez la commande **Contrainte de Von-Mises nodales** sur la barre d'outils des résultats dans la section **Analyse - Résultats numériques**.

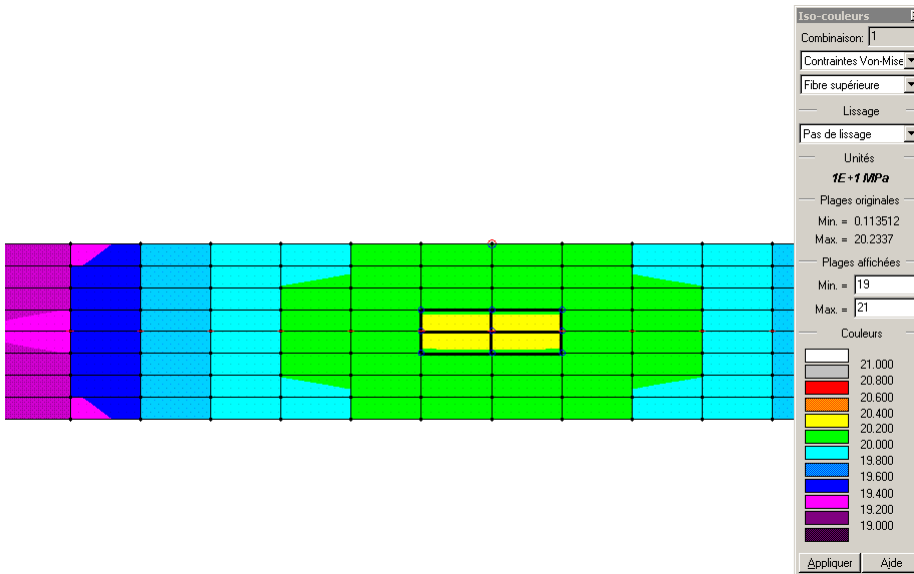
No Plaque	No Combinaison	No Joint	Fibre sup MPa	Centre MPa	Fibre inf MPa
1174	1	310	202.3161	196.9559	191.5960
1174	1	311	202.3372	196.9697	191.6024
1174	1	253	201.9240	196.5844	191.2449
1174	1	252	201.9037	196.5706	191.2376
1174	1	0	202.1198	196.7696	191.4198
1175	1	311	202.3374	196.9699	191.6027
1175	1	312	202.3165	196.9562	191.5963
1175	1	254	201.9037	196.5706	191.2376
1175	1	253	201.9240	196.5844	191.2449
1175	1	0	202.1199	196.7698	191.4198
1233	1	368	201.9037	196.5706	191.2376
1233	1	369	201.9240	196.5844	191.2449
1233	1	311	202.3372	196.9697	191.6024
1233	1	310	202.3161	196.9559	191.5960
1233	1	0	202.1198	196.7696	191.4197
1234	1	369	201.9240	196.5844	191.2449
1234	1	370	201.9037	196.5706	191.2376
1234	1	312	202.3165	196.9562	191.5963
1234	1	311	202.3374	196.9699	191.6027
1234	1	0	202.1199	196.7698	191.4198

La contrainte à la fibre supérieure de la plaque est de 202.3 MPa. Pour trier les résultats en fonction du numéro de joint, cliquez sur l'en-tête *No Joint* dans la table. Notez, que les résultats sur un même noeud appartenant à plusieurs plaques n'est pas nécessairement le même. Ce phénomène est normal et provient des techniques utilisées par la méthode des éléments finis pour extrapoler les contraintes, du modèle de l'élément et de la précision du maillage. Plus le maillage est grossier, plus les résultats seront différents d'un élément à l'autre surtout dans les zones de forts gradients. Dans cet exemple, ce phénomène est amplifié près des appuis où la différence atteint presque 25%. Lorsque ce problème survient, il peut en général être réglé par un maillage plus raffiné.

Les mêmes résultats peuvent être visualisés à l'aide des iso-couleurs. Activez les résultats des iso-couleurs par le bouton **Contour** sur la barre de résultats. Sélectionnez les options suivantes de la boîte des iso-couleurs. Sélection dans la première liste *Contraintes de Von-Mises*, puis dans la deuxième liste *Fibre supérieure*.

La section **Unités** de la barre de résultat contient l'unité d'affichage et son facteur de multiplication. L'option de lissage n'est pas activée ici. Cette option, lorsqu'elle est activée, permet d'effectuer la moyenne à un noeud de toutes les valeurs provenant des plaques qui y sont connectés. Les plages affichées vous permettent d'obtenir plus de précision sur les valeurs des contraintes en un point donné.

Sur la figure présentée ci-dessous on peut interpréter la contrainte de Von-Mises dans la région centrale (en jaune). Cette couleur correspond à une valeur se situant entre 20.2 et 20.4 multiplié par l'unité "10 MPa", ce qui donne une valeur se situant entre 202 MPa et 204 MPa.



Vous remarquerez les saut de couleurs entre les éléments adjacents. Si vous activez l'option Lissage pour les *Éléments visibles seulement* et en réajustant la plage de valeur, vous pouvez comparer la différence.

