

CHAPITRE 3

PROGRAMMATION DE LA SIMULATION

La simulation du procédé de soudage a été réalisée en langage « APDL » (ANSYS Parametric Design Language). Le programme est divisé en plusieurs fichiers, tel que montré par l'organigramme de la figure 24, afin d'en augmenter la flexibilité.

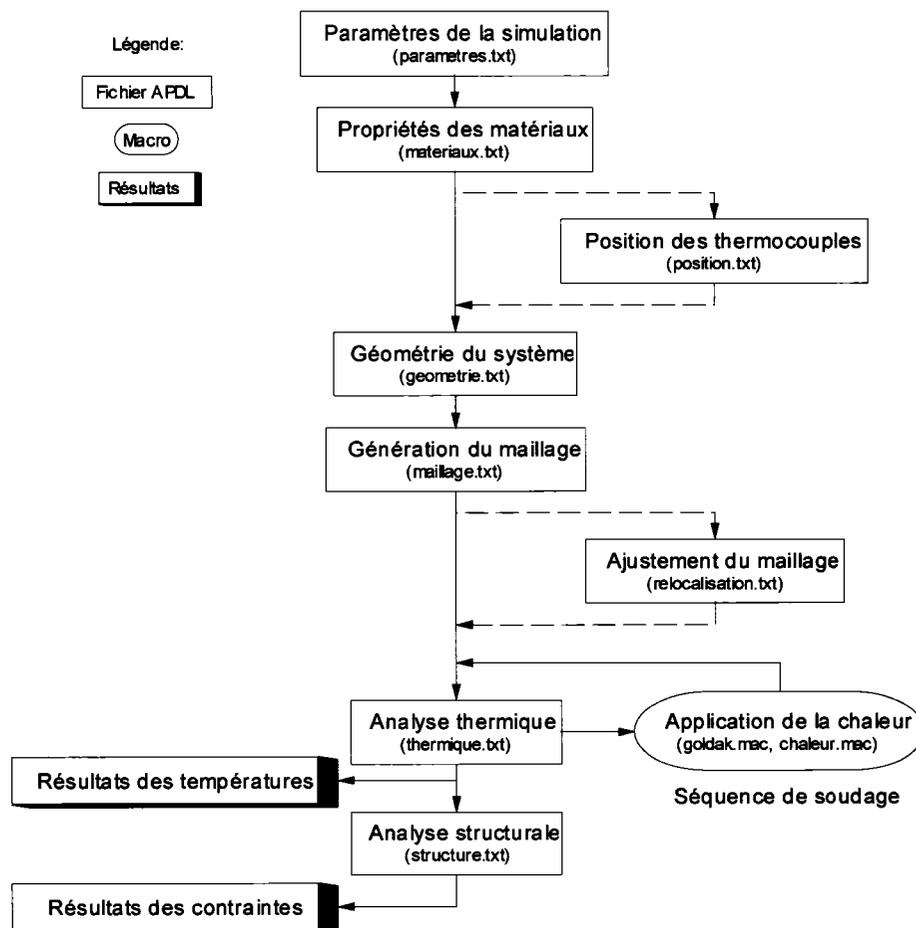


Figure 24 Organigramme séquentiel de la programmation

Deux macros ont également été programmées pour l'application de la chaleur par la méthode du double ellipsoïde. Ces macros rendent le programme simple à adapter pour différentes formes de structure et de soudure. La méthodologie utilisée pour la programmation est ici présentée; les programmes complets se trouvent en annexe 1.

3.1 Fichier « principal.txt »

Ce fichier a pour unique fonction l'appel des différents fichiers de la simulation. Les fichiers appelés sont :

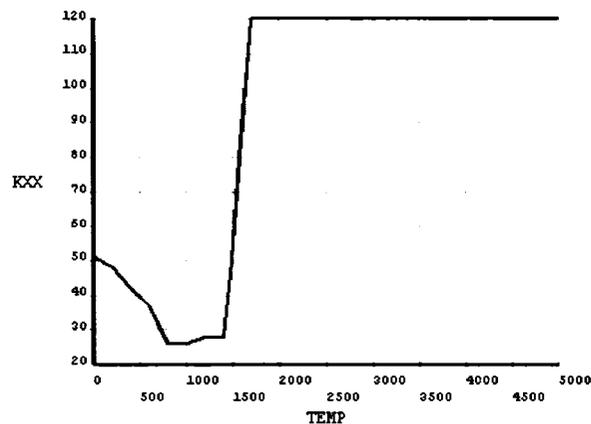
- le fichier des paramètres de la simulation;
- le fichier des propriétés des matériaux;
- le fichier des points d'acquisition de données (facultatif);
- le fichier de la géométrie du modèle;
- le fichier de génération du maillage;
- le fichier de déplacement des nœuds (facultatif);
- le fichier de la simulation thermique et
- le fichier de la simulation structurale.

3.2 Fichier « parametres.txt »

Le fichier des paramètres contient l'initialisation des variables de toutes les données de la simulation. Tout d'abord, les dimensions de la pièce sont définies. Ensuite, on retrouve les paramètres du soudage : l'intensité du courant, la tension, le facteur de rendement, la vitesse d'avance de la torche et la température ambiante. Suivent les dimensions du maillage et des sections, si nécessaires, puis les incréments de temps utilisés pour chaque analyse et les paramètres de la source de chaleur relative au modèle choisi.

3.3 Fichier « materiaux.txt »

Le fichier « matériaux » contient toutes les propriétés thermiques et structurales du ou des matériaux. Un tableau des températures est d'abord initialisé. Les propriétés sont ensuite évaluées à ces températures afin de déterminer le comportement du matériau, tel que l'exemple présenté sur le graphique 8. Lors de la simulation, le logiciel effectue une interpolation linéaire entre deux points pour obtenir la valeur de la propriété à une température donnée.



Graphique 8 Conductivité thermique du matériau

3.4 Fichier « position.txt »

Ce fichier sert à créer un tableau contenant la position de tous les points d'acquisition qui doivent être comparés avec l'expérimentation. Ce tableau aidera à définir la disposition des volumes dans le fichier « géométrie », ainsi qu'à sélectionner les nœuds dont les résultats seront exportés dans un fichier de données.

3.5 Fichier « geometrie.txt »

Le fichier « géométrie » contient la génération des volumes et surfaces nécessaires à la génération du maillage. Si la géométrie est fonction des points d'acquisition de données,

le tableau défini dans le fichier « acquisition » est réordonné pour que les positions des points suivent un ordre logique, et il est utilisé à l'intérieur d'une boucle pour générer automatiquement tous les volumes. Ces volumes sont ensuite fusionnés par la commande « NUMMRG », qui permet d'éliminer le dédoublement des points-clés.

L'utilisation de la méthode de maillage par sections nécessite la création de volumes supplémentaires, mais les volumes des différentes sections ne doivent pas être fusionnés sinon il sera impossible de générer des maillages différents pour chaque section. La méthode mixte utilise la même démarche que la méthode des sections, mis à part le fait que certaines sections sont des surfaces plutôt que des volumes. Peu importe la méthode utilisée, chaque volume et chaque surface sont associés à un type d'élément et un matériau.

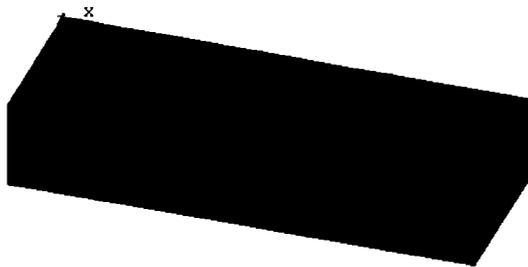


Figure 25 Géométrie de la méthode par sections



Figure 26 Géométrie de la méthode mixte

3.6 Fichier « maillage.txt »

Tout d'abord, les types d'éléments sont définis. Puisque l'analyse thermique vient en premier lieu, ce sont les éléments thermiques uniquement qui sont définis. Ils seront échangés par les éléments de structure dans le fichier « structure ». La commande « ETCHG » permet de faire la conversion des éléments automatiquement en choisissant l'élément de structure associé à l'élément thermique. Si l'élément associé n'est pas jugé

satisfaisant pour l'application, la commande « ET » peut être utilisée pour effectuer manuellement la conversion. Les éléments thermiques utilisés sont :

- SOLID70 : élément brique thermique à huit nœuds;
- SHELL57 : élément coque thermique à quatre nœuds.

La taille des éléments désirée est ensuite associée à la géométrie, et le maillage est effectué.

3.7 Fichier « relocalisation.txt »

Ce fichier est utile seulement si les résultats doivent être comparés avec l'expérimentation. Le modèle est d'abord détaché de la géométrie afin de rendre possible le déplacement des nœuds. Ensuite, le tableau créé dans le fichier « acquisition » est utilisé pour lire la position des points d'acquisition. À l'intérieur d'une boucle, le nœud le plus près de chaque point est sélectionné. Pour chaque direction « i » du déplacement, tous les nœuds se trouvant à la même coordonnée « i » sont sélectionnés et déplacés dans cette direction. Les nœuds étant déplacés un à un, il est possible que le déplacement engendre une trop grande distorsion des éléments. Afin d'éviter que le logiciel génère des messages d'erreurs et arrête la simulation, le déplacement est réalisé graduellement à l'intérieur d'une seconde boucle. Une géométrie réalisée en fonction de la position des points d'acquisition permet d'éviter de devoir déplacer les nœuds dans les trois directions, ce qui permet d'obtenir un maillage plus régulier.

3.8 Fichier « thermique.txt »

Ce fichier contient toute la procédure de la simulation thermique. La première étape est la définition des équations de couplage, si nécessaire. Si la méthode des sections est utilisée, les équations reliant les nœuds des différentes sections sont générées à l'aide de

la commande « CEINTF » (coupling equations at an interface). Cette commande génère automatiquement les équations de couplage à l'interface de deux portions d'un modèle dont les maillages ne sont pas similaires. L'utilisation de la méthode mixte ne nécessite pas d'équations de couplage. L'interface où le changement de type d'éléments se produit étant relativement loin de la soudure, la température peut être supposée constante à travers l'épaisseur de la plaque. Afin de ne pas ajouter d'équations inutilement, les nœuds des éléments coques sont tout simplement confondus avec ceux des éléments briques. Des équations reliant les degrés de liberté des nœuds des deux types d'éléments sont toutefois nécessaires pour la partie structurale de l'analyse.

L'étape suivante est l'imposition des conditions initiales et frontières. La température initiale de la pièce est imposée à tous les nœuds, et la convection (combinée à la radiation) est appliquée sur toutes les surfaces, sauf au plan de symétrie ainsi qu'à la surface où la chaleur est appliquée. La convection sera appliquée sur cette surface uniquement à l'extérieur de la surface délimitant la source de chaleur, tel que montré sur la figure 27.

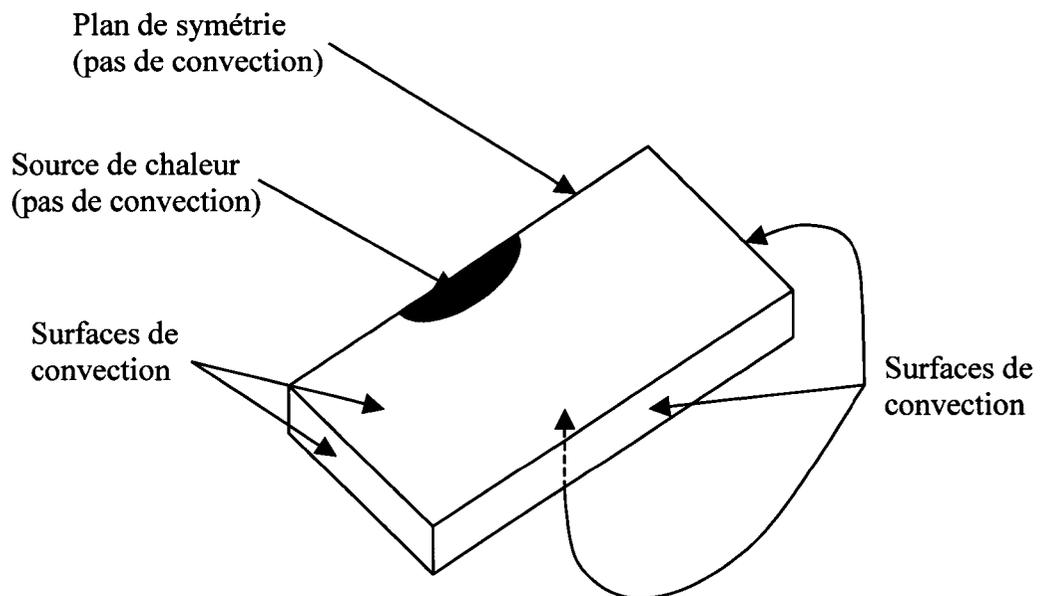


Figure 27 Surfaces de convection

Vient alors la simulation de la soudure proprement dite. Une boucle fait varier le temps de calcul à partir des conditions initiales jusqu'au temps total nécessaire à la soudure, par incrément de temps défini au préalable. Les étapes suivantes sont définies à l'intérieur de cette boucle. Tout d'abord, la convection à la surface supérieure de la plaque est supprimée afin qu'elle n'entre pas en contradiction avec la nouvelle position de la source de chaleur. Ensuite, la position centrale de la source est calculée et un système local de coordonnées y est créé. Ce système local de coordonnées cartésiennes définit la position de la source et l'orientation de la soudure, comme le montre la figure 28 à l'aide de soudures bout à bout et en T. Le plan X-Z est parallèle au plan de soudure, et l'axe Z^+ est orienté dans la direction du déplacement de la soudure. Une fois le système local défini, la chaleur peut être appliquée dans les éléments. Cette opération se fait en appelant la macro « Goldak », qui gère l'application de la chaleur automatiquement. Enfin, la convection est appliquée à la surface supérieure de la plaque. Deux systèmes de coordonnées elliptiques permettent de ne pas appliquer la convection aux éléments situés sous la source de chaleur. La boucle se termine par la commande « solve », qui démarre les calculs. La figure 29 présente un exemple de distribution de la température obtenue par la simulation.

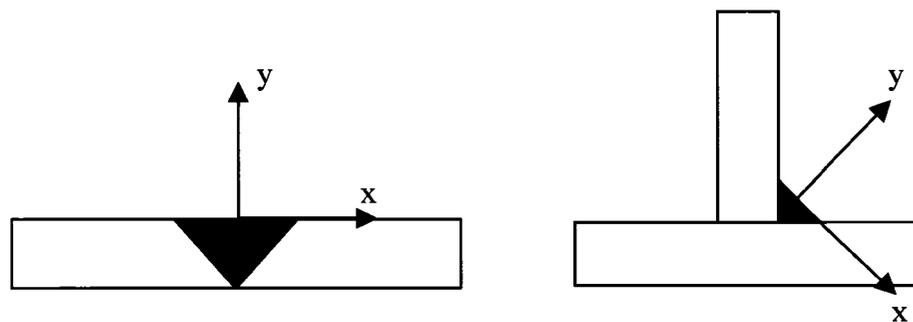


Figure 28 Orientation du système local de coordonnées

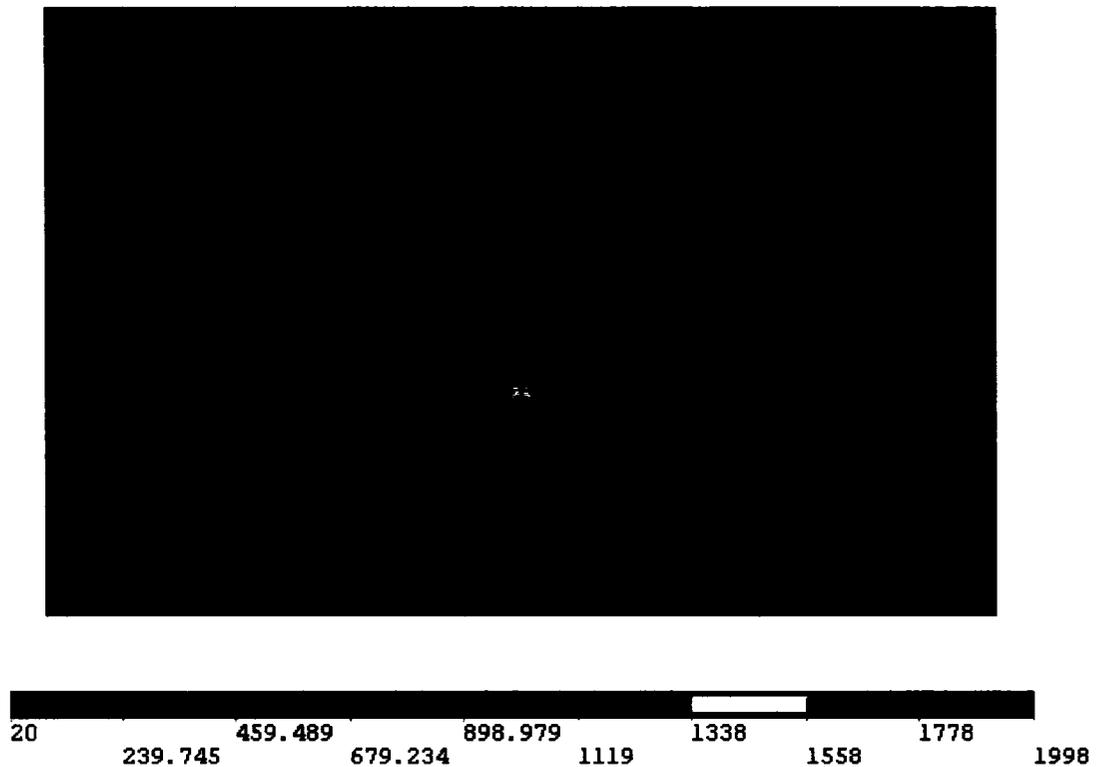
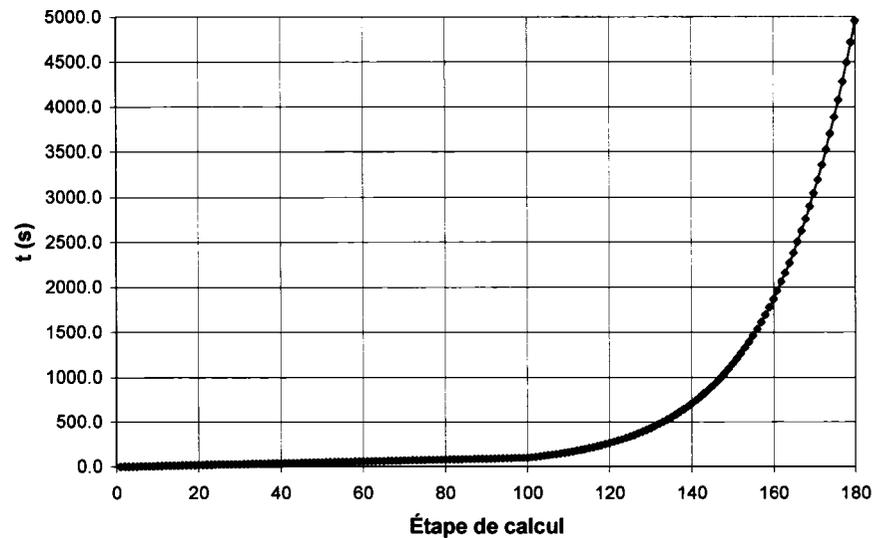


Figure 29 Exemple de résultats des températures

La dernière étape de la simulation thermique est le refroidissement de la pièce. La convection est appliquée uniformément sur toutes les surfaces, et la solution est calculée à un intervalle de temps qui augmente proportionnellement avec le temps, ce qui permet d'avoir un incrément de temps court lorsque la pièce est chaude, et qui s'allonge avec le refroidissement de la plaque. Le graphique 9 montre que l'intervalle de temps augmente à chaque étape de calcul.

$$\Delta t_{i+1} = \Delta t_i (1 + k_i) \quad (3.1)$$



Graphique 9 Exemple de temps de calculs pour une simulation

3.9 Macro « chaleur.mac »

La macro « chaleur » sert à appliquer la chaleur à l'intérieur des éléments. Pour chaque élément sélectionné, elle calcule la position de son centroïde par rapport au centre du double ellipsoïde. Elle calcule ensuite la chaleur à appliquer à l'élément à partir des formules de Goldak [7] et elle l'applique à l'élément. Elle additionne finalement la chaleur au compteur de chaleur qui est utilisé par la macro « goldak ».

La macro « chaleur » est appelée de la façon suivante :

chaleur,a,b,cf,cr,ff,fr,Q

où :

a,b,cf,cr : dimensions du double ellipsoïde;

ff,fr : fractions de la puissance à l'avant et à l'arrière de la source;

Q : puissance totale générée lors de la soudure.

3.10 Macro « goldak.mac »

La macro « Goldak » sert à gérer la sélection des éléments situés à l'intérieur du double ellipsoïde et à appliquer la chaleur en appelant la macro « chaleur ». Elle est appelée de la façon suivante :

goldak,a,b,cf,cr,ff,fr,Q

La première opération effectuée par la macro est la lecture de la position et de l'orientation du système de coordonnées actif. Deux systèmes ellipsoïdaux locaux sont ensuite créés à la même position et suivant la même orientation. Ces deux systèmes permettent la sélection des nœuds à l'avant et à l'arrière de la position centrale. Les éléments sont par la suite sélectionnés à partir des nœuds. L'étape suivante est l'application de la chaleur aux éléments. Cette opération est effectuée en appelant la macro « chaleur ». Elle est appelée une première fois avec la puissance demandée, puis la valeur contenue dans le compteur de chaleur permet d'effectuer une interpolation linéaire de la puissance avant d'appeler une seconde fois la macro « chaleur ».

La méthode de programmation des macros est un peu particulière. Tous les paramètres définis à l'intérieur d'une macro sont des paramètres globaux. Ils peuvent donc interférer avec les paramètres des différents fichiers. Afin de remédier à ce problème, la macro est programmée avec les paramètres locaux définis par « Ansys ». Ces paramètres sont définis de « ARG1 » à « AR19 » pour les paramètres passés à la macro, et de « AR20 » à « AR99 » pour les variables locales. Ce type de programmation rend la lecture du code plus difficile, mais évite que les paramètres définis dans les fichiers soient écrasés par la macro.

Exemple de programmation :

CSYS,100 Activation du système de coordonnées local 100

NSEL,S,LOC,X,0,ARG1 Sélection des nœuds selon la direction « X »

NSEL,R,LOC,Y,0,-90	Sélection des nœuds selon la direction « Y »
NSEL,R,LOC,Z,0,180	Sélection des nœuds selon la direction « Z »
ESLN,S,0	Sélection des éléments à partir des noeuds
CSYS,101	Activation du système de coordonnées local 101
NSEL,S,LOC,X,0,ARG1	Sélection des nœuds selon la direction « X »
NSEL,R,LOC,Y,0,-90	Sélection des nœuds selon la direction « Y »
NSEL,R,LOC,Z,0,-180	Sélection des nœuds selon la direction « Z »
ESLN,A,0	Sélection des éléments à partir des noeuds
CM,AR30,ELEM	Création d'une composante nommée « AR30 »

L'utilité de la programmation à l'aide de macros est principalement la versatilité procurée au programme. À l'aide des deux macros présentées précédemment, n'importe quelle géométrie de soudure peut être simulée simplement en créant un système local perpendiculaire à la soudure, tel que présenté à la figure 28.

3.11 Fichier « structure.txt »

Le dernier fichier de la simulation est le fichier « structure ». Il sert à utiliser les résultats des températures afin de calculer les contraintes résiduelles. Tout d'abord, les types d'éléments sont transformés pour devenir des éléments de structure.

- SOLID45 : élément brique structural à huit nœuds ;
- SHELL43 : élément coque structural à quatre nœuds.

Les équations de couplages sont ensuite effacées pour être réécrites avec les degrés de liberté de translation et de rotation. Le couplage des différentes sections se fait à l'aide de la commande « CEINTF », et le couplage des éléments briques et coques à l'aide de la commande « CERIG », qui définit un plan rigide.

L'étape suivante est l'imposition des conditions frontières. Un plan de symétrie est imposé au centre de la plaque, et deux nœuds sont bloqués pour compléter l'isostatisme de la pièce (voir figure 30).

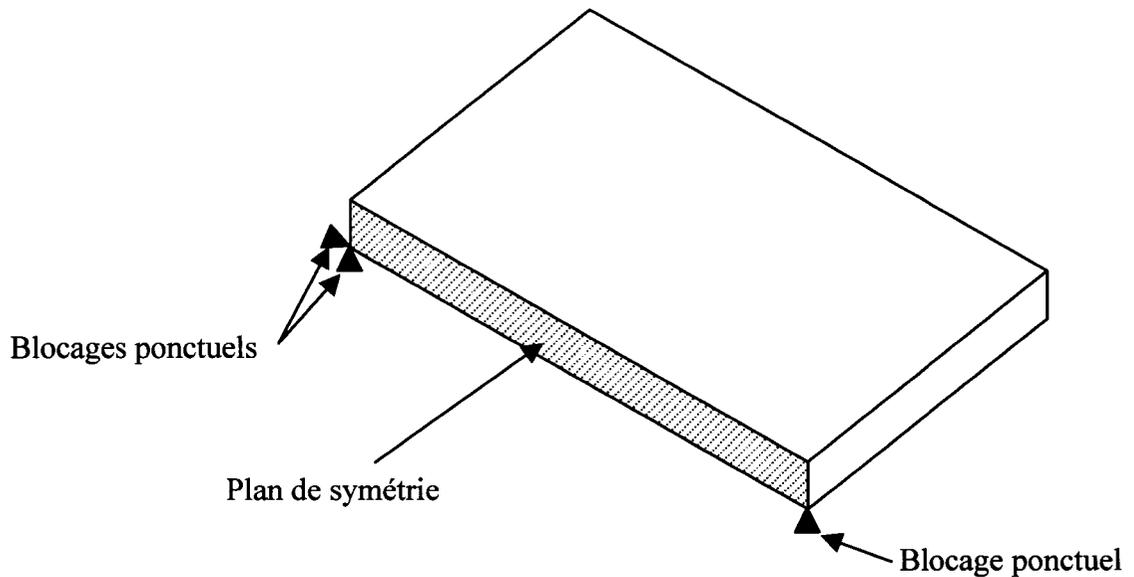


Figure 30 Conditions frontières

L'analyse structurale proprement dite est réalisée à l'intérieur de boucles similaires à celles de l'analyse thermique, mais où l'unique chargement est la lecture du fichier des résultats des températures à chaque temps donné. La figure 31 présente un exemple de résultats structuraux obtenus par la simulation.

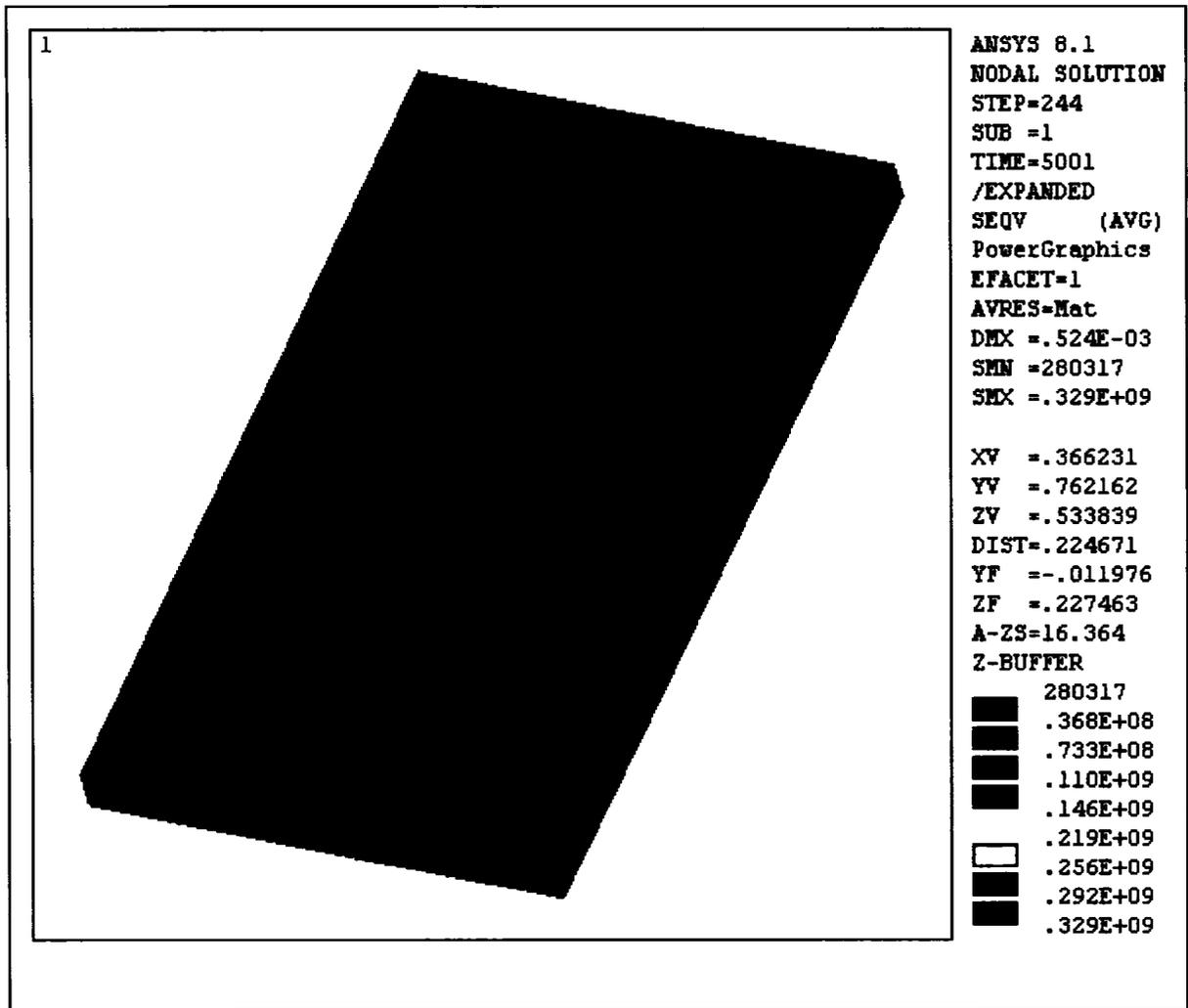


Figure 31 Exemple de résultats des contraintes