

## CHAPITRE 1

### REVUE DE LA LITTÉRATURE

La prédiction des effets du soudage sur les matériaux étant difficilement réalisable mathématiquement, plusieurs chercheurs ont tenté d'effectuer cette prédiction à l'aide de modèles numériques. Différents modèles mathématiques ont été développés afin de déterminer soit la température, soit l'apport de chaleur à l'intérieur du bain de fusion. Ces modèles mathématiques sont ensuite incorporés aux modèles par éléments finis afin de calculer les contraintes résiduelles engendrées par le procédé de soudage.

Ce chapitre présente tout d'abord un aperçu du procédé de soudage « gas metal arc welding » (GMAW) et des contraintes résiduelles qui en résultent. Les modèles mathématiques sont ensuite exposés, ainsi que les différentes méthodes de modélisation par éléments finis. Pour conclure, la problématique de recherche est présentée afin d'expliquer les buts et objectifs de ce projet de recherche.

#### 1.1 Le soudage GMAW

Le procédé de soudage GMAW utilise une électrode continue. Le bain de fusion est protégé de l'air ambiant par un gaz (hélium, argon, dioxyde de carbone). La sortie de l'électrode est automatique, alors que le déplacement de la torche peut être fait manuellement ou automatisé. La figure 1 présente un schéma du procédé de soudage GMAW.

Il y a deux méthodes de transfert du métal d'apport avec le soudage GMAW : le transfert par pulvérisation et le transfert par court-circuit. Lors du transfert par pulvérisation, le métal fondu se détache de l'électrode, se déplace à travers l'arc

électrique pour se déposer sur le métal de base. Lors du transfert par court-circuit, c'est par le contact entre l'électrode et le métal de base que le métal d'apport se dépose sur ce dernier. Le transfert par court-circuit est obtenu à basse tension et faible courant, alors que le transfert par pulvérisation s'obtient à haute tension et à courant élevé. Le transfert par pulvérisation permet d'obtenir un taux de dépôt plus élevé que le court-circuit.

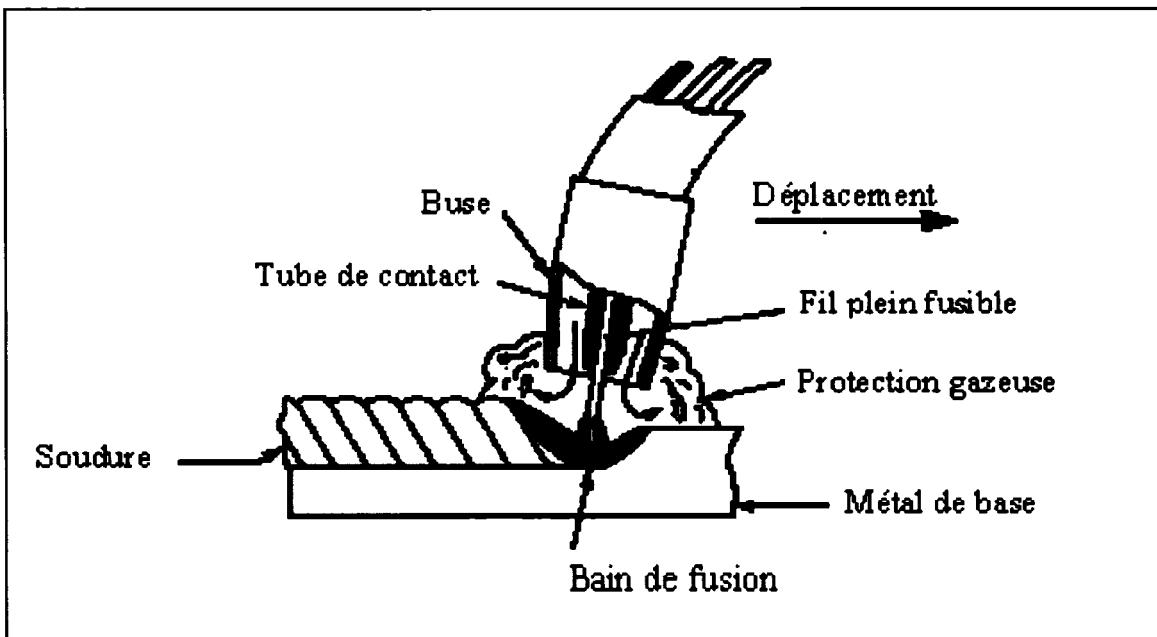


Figure 1 Schéma du soudage GMAW  
(Adapté de Galopin, Michel, 2003 [1])

## 1.2 Contraintes et déformations résiduelles

Lorsqu'une partie d'une pièce est soumise à une distribution de contrainte non-uniforme et supérieure à la limite d'écoulement du matériau, celle-ci devient déformée plastiquement. Au relâchement de la charge, le retour élastique fait apparaître les contraintes résiduelles : ceci est dû au fait que la partie de la pièce déformée de façon élastique tend à reprendre sa forme initiale alors que la partie déformée plastiquement conserve sa déformation plastique. La figure 2 démontre l'évolution des contraintes dans une pièce déformée plastiquement.

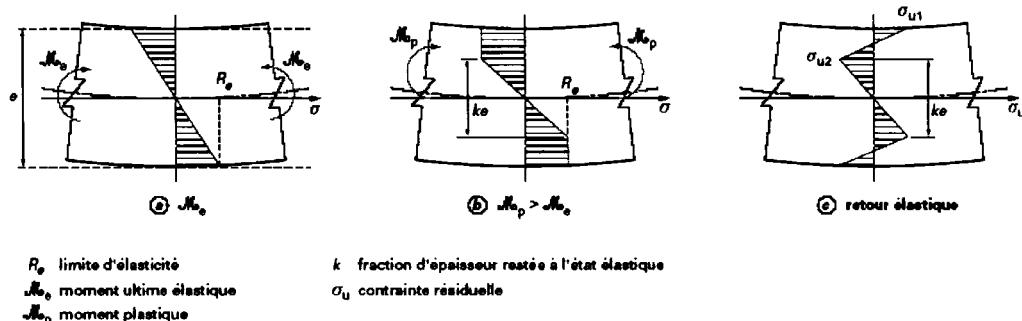


Figure 2 Évolution des contraintes par plasticité de déformation mécaniques  
 (Adapté de Michel, Alain, 1999 [2])

La figure 3 montre l'évolution des contraintes pour un matériau élastique parfaitement plastique, dans une pièce qui subit un cycle thermique et dont les déplacements sont restreints. Ces restrictions peuvent être obtenues en bridant solidement la pièce ou en imposant le cycle thermique localement comme c'est le cas pour le soudage. Lors du chauffage, le matériau subit une contrainte de compression qui atteint la limite d'écoulement si la température est suffisamment élevée. Cette limite d'écoulement est fonction de la température. Lors du refroidissement, les contraintes s'inversent pour laisser des contraintes résiduelles en tension à la température ambiante.

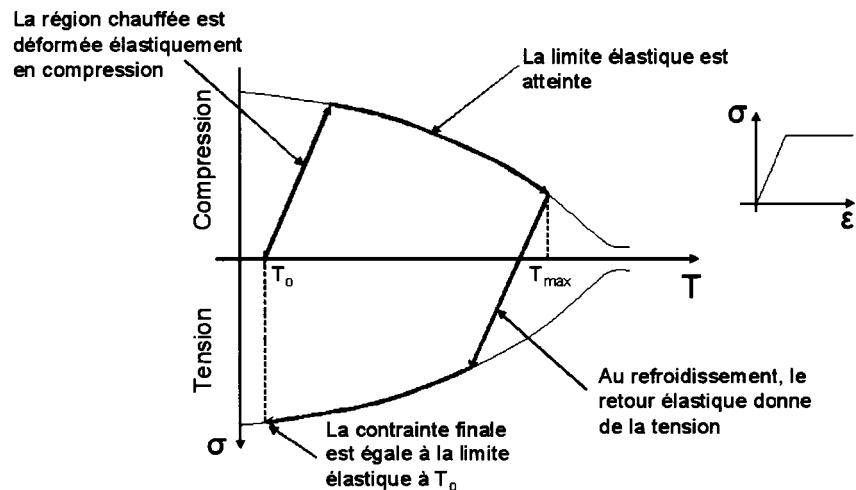


Figure 3 Évolution de la contrainte lors d'un cycle thermique (comportement élastique parfaitement plastique)  
 (Adapté de Michel, Alain, 1999 [2])

Le profil des contraintes résiduelles dans les pièces soudées varie en fonction du type de matériau utilisé. La figure 4 montre les profils des contraintes résiduelles longitudinales pour trois différents matériaux. La courbe a), qui représente l'acier doux, démontre une contrainte en tension égale à la limite d'écoulement du matériau au centre de la soudure, et qui diminue jusqu'à l'obtention d'une contrainte de compression loin de la soudure. Les courbes b) et c) montrent que la distribution des contraintes est très différente lorsqu'il s'agit d'acières fortement alliés. Par exemple, dans le cas b), la transformation martensitique du métal d'apport 410 Ni-Mo est à l'origine de la compression observée au centre de la soudure.

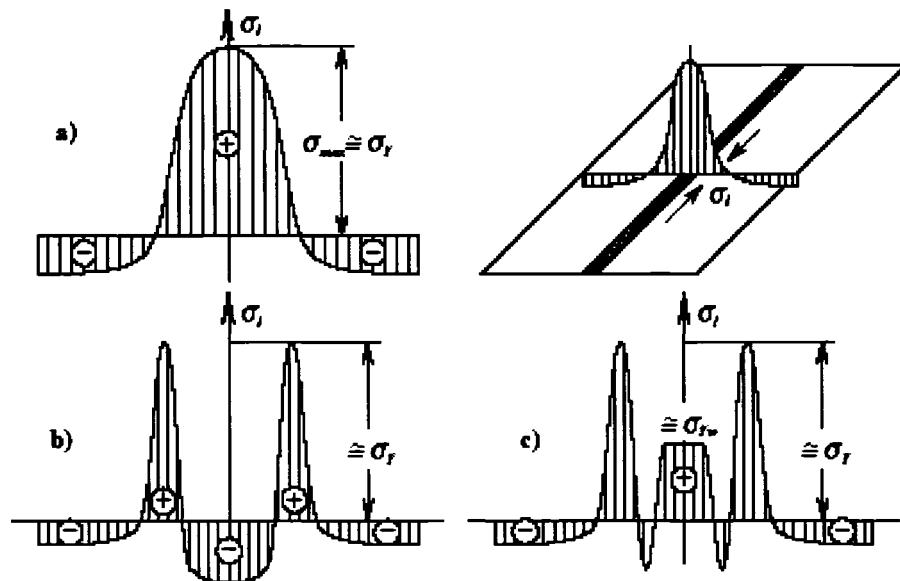


Figure 4 Contrainte résiduelle longitudinale  
 a) acier doux; b) acier fortement allié avec matériel d'apport martensitique; c) acier fortement allié avec matériel d'apport austénitique.  
 (Adapté de Pilipenko, Artem, 2001 [3])

La contrainte résiduelle longitudinale, qui est orientée dans la direction parallèle à la soudure, est générée par la rétractation du matériau au refroidissement. La contrainte transversale est orientée dans la direction perpendiculaire à la soudure, et est générée principalement par le bridage de la pièce. La contrainte suivant la direction normale au plan de soudure peut être considérée négligeable comparativement aux deux premières contraintes.

### 1.3 La modélisation de la source de chaleur

Une des parties les plus importantes et les plus complexes de la modélisation d'une soudure est l'apport de chaleur fourni à la pièce étudiée. Les contraintes dépendent des distributions de température dans la pièce, qui, elles-mêmes, dépendent du modèle utilisé pour la source. Plusieurs modèles ont été développés pour représenter l'apport de chaleur lors du soudage. Deux méthodes principales sont utilisées par ces modèles : la représentation d'une source comme un flux de chaleur imposé sur une surface donnée, et la représentation sous forme de génération de chaleur à l'intérieur d'un volume donné.

La première modélisation mathématique d'une source de chaleur a été présentée par Rosenthal [4] en 1941. À partir du développement de Fourier de l'équation de la chaleur et en supposant un état quasi-stationnaire, il obtient la distribution de la température dans une plaque en représentant la source ponctuellement. L'équation 1.1 représente la distribution de la température dans une plaque tridimensionnelle semi-infinie.

$$T - T_o = \frac{Q}{2\pi k} e^{-\lambda v \xi} \frac{e^{-\lambda v r}}{r} \quad (1.1)$$

Où :

T = température en un point donné;

$T_o$  = température initiale;

Q = chaleur totale appliquée à la plaque;

k = coefficient de conductivité thermique;

$\lambda$  = diffusivité thermique du matériau;

v = vitesse de la soudure;

$\xi$  = coordonnée parallèle à la direction de la soudure;

r = position radiale.

Il a été démontré que cette méthode est fiable pour les températures éloignées de la source de chaleur, mais très peu efficace près de la zone de fusion et de la zone affectée thermiquement. Un disque à distribution gaussienne d'un flux thermique a été proposé par Pavelic [5] pour enrayer ce problème (figure 5). Ce modèle a été adapté par Friedman [6] pour la méthode des éléments finis. L'impossibilité de représenter la pénétration de l'arc électrique dans le bain de fusion par les modèles surfaciques a incité les chercheurs à développer des modèles tridimensionnels. Goldak [7] propose en 1984 le modèle du double ellipsoïde (figure 6). Ce modèle est défini selon une distribution gaussienne de la chaleur à l'intérieur de deux demi-ellipsoïdes, représentant l'avant et l'arrière de l'arc électrique. Les dimensions des demi-axes représentent le volume du bain de fusion. Ce modèle est très utilisé de nos jours pour la modélisation du procédé de soudage.

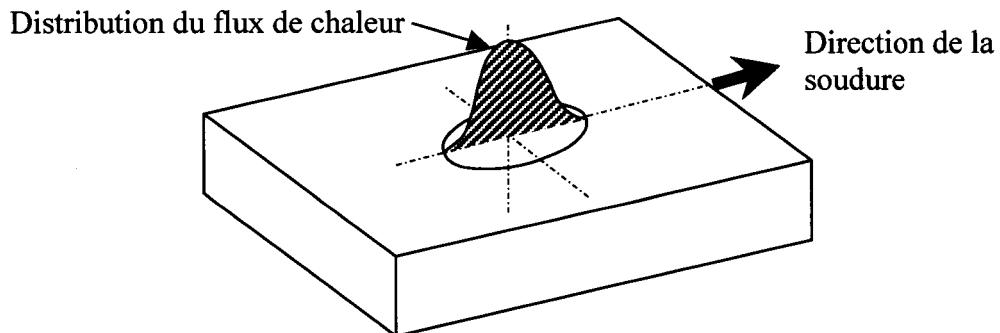


Figure 5 Flux surfacique de chaleur

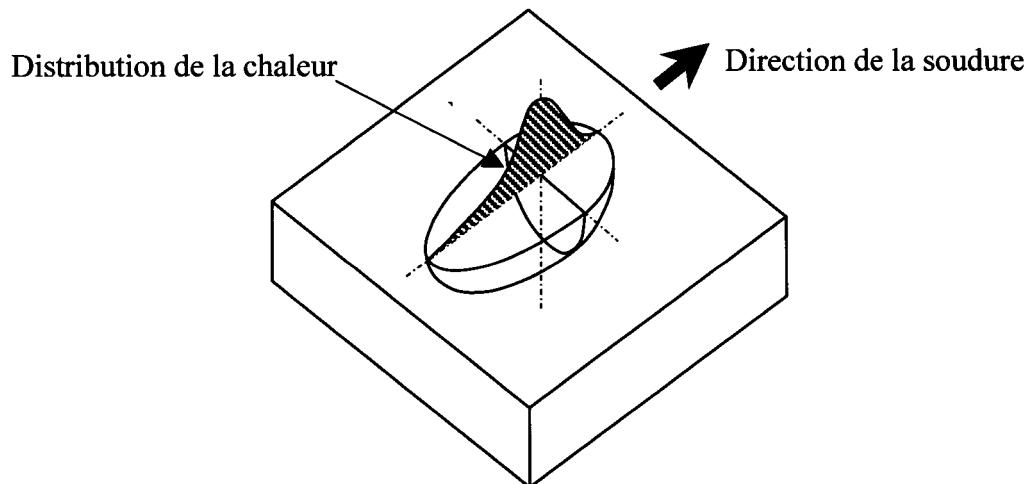


Figure 6 Génération volumique de chaleur

Wahab [8] propose une amélioration du modèle du double ellipsoïde en divisant la chaleur en deux parties : une générée à l'intérieur du double ellipsoïde et l'autre induite dans le métal d'apport, en ajoutant des éléments à une température de 2400 °C, soit la température de vaporisation de l'acier.

Un modèle plus simple est utilisé par Lindgren [9]. Il représente l'apport de chaleur en imposant la température de fusion aux éléments de la soudure. Free [10] avait utilisé la même méthode auparavant, mais en ajoutant une correction afin que le modèle représente mieux la réalité : il ajuste la chaleur spécifique du matériau afin que son modèle respecte l'équation de la chaleur.

#### 1.4 Le modèle des éléments finis

Le procédé de soudage étant un problème transitoire et hautement non linéaire, le temps de résolution par la méthode des éléments finis est très élevé; c'est pourquoi le recours aux hypothèses simplificatrices est très utile. La plus utilisée de ces hypothèses est la supposition d'une vitesse de soudage infinie, ce qui implique que le cordon de soudure est déposé d'un seul coup. Cette hypothèse permet de réduire un problème tridimensionnel à un problème bidimensionnel. Ce problème peut être solutionné par les éléments iso-paramétriques, soit en état plan de contrainte ou de déformation pour les plaques, et en état axisymétrique pour les cylindres et réservoirs. Les ordinateurs, toujours de plus en plus puissants, permettent maintenant de résoudre les problèmes en 3-D. Les temps de calculs sont par contre encore très élevés, surtout pour la simulation d'une soudure comportant plusieurs passes. Certains chercheurs ont donc tenté de trouver des méthodes pour réduire le temps de résolution, sans pour autant réduire significativement la précision des résultats. Leurs théories sont présentées ci-après.

### 1.4.1 L'utilisation des éléments coques

En raison des gradients de température très élevés dans la région de la soudure, un maillage raffiné composé d'éléments volumiques est requis pour l'analyse 3-D. L'utilisation d'éléments surfaciques, dont la variation des résultats est approximée linéairement sur l'épaisseur, engendrerait une erreur considérable. Näsström [11] présente un modèle combiné d'éléments briques et coques. Les éléments briques sont utilisés dans les régions fusionnée et affectée thermiquement, et les éléments coques partout ailleurs. Ce modèle donne des résultats similaires à ceux d'un modèle composé uniquement d'éléments briques, mais permet de réduire significativement le nombre de degrés de liberté, donc le temps de résolution.

### 1.4.2 L'élément hexaédrique échelonné

Lindgren [12] propose l'utilisation d'un élément hexaédrique comportant de 8 à 26 nœuds (figure 7). Il utilise une interpolation linéaire, mais l'élément peut également être défini sous forme quadratique. Les huit premiers nœuds sont disposés aux coins de l'élément. Les nœuds 9 à 20 sont optionnels et disposés au milieu des arêtes. Les nœuds 21 à 26 sont également optionnels et disposés au centre des faces de l'élément.

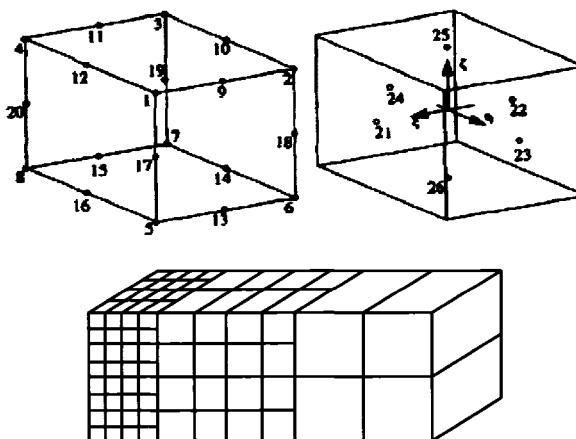


Figure 7 L'élément hexaédrique échelonné

Ce type d'élément permet de faciliter l'obtention d'un maillage structuré avec raffinement localisé puisque les coins des éléments ne sont pas obligatoirement coïncidents.

#### 1.4.3 Le remaillage

Le raffinement du maillage dans la région de la soudure entraîne une augmentation considérable du nombre de degrés de liberté. Afin de limiter cette augmentation, la technique du remaillage peut être utilisée. Elle consiste à raffiner uniquement le maillage aux environs de la source de chaleur, et non plus sur toute la longueur de la soudure (figure 8). La zone raffinée se déplace à la même vitesse que la source de chaleur. Cette méthode est utilisée, entre autres, par Shi [13] et Lindgren [12]. Ce dernier mentionne qu'il faut être prudent lors du transfert des données de l'ancien modèle vers le nouveau, opération qui diffère s'il s'agit d'un raffinement ou d'un grossissement de la taille des éléments, et s'il s'agit des valeurs aux nœuds ou aux points de Gauss. Pour un raffinement, il utilise une interpolation peu importe le type de point. Pour un grossissement, il utilise la méthode des moindres carrés pour le transfert des valeurs aux nœuds, et l'interpolation pour les valeurs aux points de Gauss. En comparaison avec un maillage dont toute la zone de la soudure est raffinée, Lindgren détermine que le temps de calcul est réduit de 60 % avec des résultats similaires pour le modèle étudié.

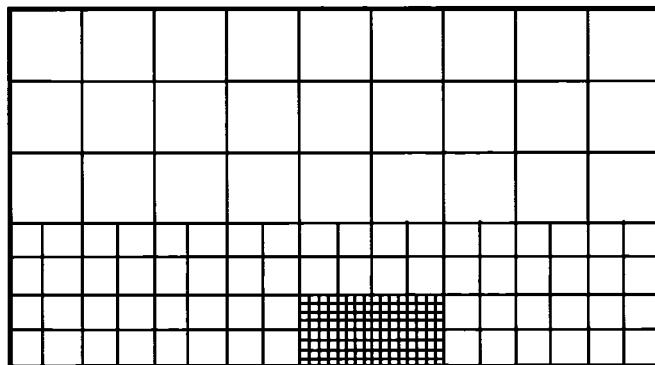


Figure 8 Le remaillage

## 1.5 L'ajout du matériel de la soudure

### 1.5.1 La méthode du « birth and death »

La méthode la plus utilisée pour la modélisation du matériel d'apport est la méthode d'activation et de désactivation des éléments, ou « birth and death ». Cette méthode consiste à créer tous les éléments de la soudure au départ. Ces éléments sont ensuite désactivés, en multipliant leurs propriétés physiques par un coefficient très petit. Ils sont finalement réactivés au fur et à mesure que la source de chaleur se déplace le long de la soudure.

Cette méthode est utilisée entre autres par Brickstad [14]. Il fait remarquer que les éléments désactivés dont une face touche aux éléments actifs peuvent être très distordus, ce qui peut engendrer des contraintes importantes. Afin de réduire ce problème, il suggère de conserver les éléments inactifs à une température élevée, où ces éléments seront « mous ». Il suggère également de prendre cette température élevée comme température de référence pour la dilatation thermique. La température de référence pour les éléments du métal de base est la température ambiante.

### 1.5.2 Le « birth and death » modifié

Berglund [15] utilise une combinaison des éléments désactivés et discrets. Les éléments désactivés n'ont aucune rigidité mais sont actifs au niveau thermique. Les éléments discrets sont les éléments qui viennent d'être réactivés. Ils ont une limite d'élasticité faible et un coefficient d'expansion thermique nul. Ils ne reprennent leurs propriétés que lorsqu'ils passent sous la température de fusion.

### 1.5.3 Le déplacement des éléments

Fanous [16] a développé la méthode du déplacement des éléments afin de modéliser l'ajout de matière. Au début de la simulation, les éléments de la soudure sont séparés des éléments du métal de base par des éléments d'espacement (« gap »). Les propriétés de ces éléments sont initialisées à une valeur nulle. Au fur et à mesure que la source de chaleur se déplace, la longueur des éléments « gap » diminue jusqu'à ce que les nœuds des éléments de la soudure et du métal de base soient superposés. Pendant ce rétrécissement, les propriétés des éléments « gap » augmentent graduellement jusqu'à la valeur des propriétés du métal de base. Il conclut que cette méthode donne des résultats comparables à la méthode du « birth and death », mais que le temps de calcul est réduit significativement.

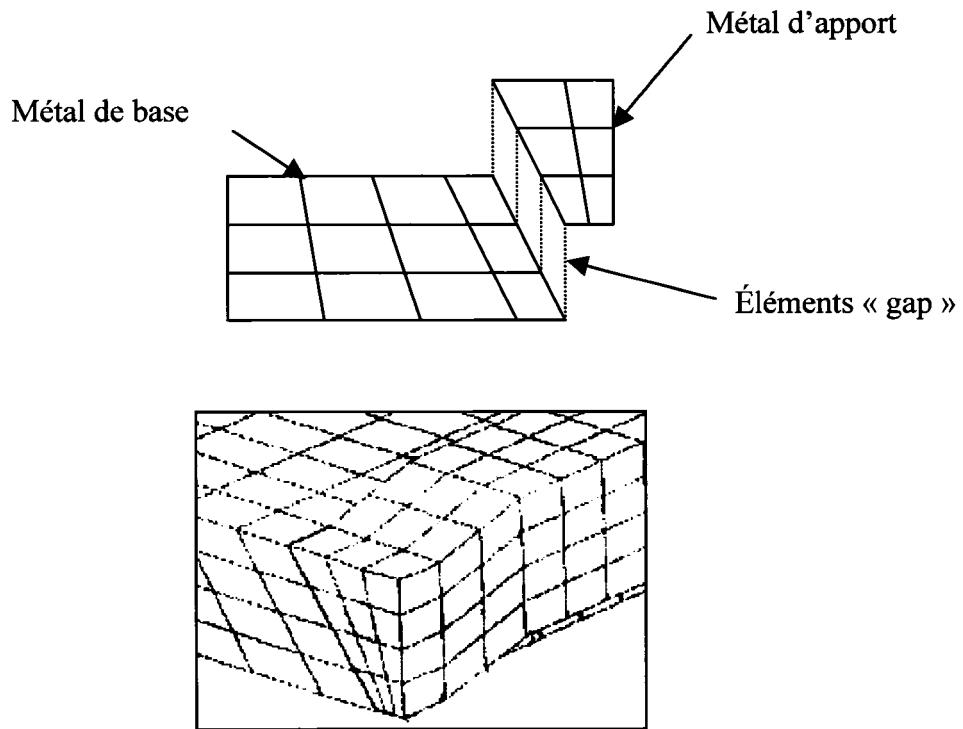


Figure 9 Le déplacement des éléments  
(Adapté de Fanous, Ihab, 2003)

### 1.5.4 L'ajout d'éléments

Lindgren [9] présente une autre méthode alternative : l'ajout des éléments. Cette méthode ressemble beaucoup au « birth and death ». Les éléments de la soudure sont entièrement créés avant le début des calculs. Lors de la solution, les nœuds et éléments du métal d'apport qui n'a pas encore été déposé sont exclus de la sélection. Ils ne sont donc pas assemblés à l'intérieur des matrices de calculs. Cette méthode fait en sorte qu'au début de la solution, les matrices sont de dimensions plus petites, ce qui réduit le temps de calcul. Il conclut que cette méthode donne des résultats similaires à la méthode du « birth and death », mais que le temps de calcul est réduit d'environ 5 %.

## 1.6 Problématique de recherche

Le projet de recherche a pour but le développement d'un modèle par éléments finis permettant le calcul des contraintes résiduelles produites par la soudure des aubes des turbines hydroélectriques de type « Francis ». La géométrie de la turbine étant très complexe, les éléments bidimensionnels ne pourront pas être utilisés. Le projet est réalisé pour le compte de la compagnie GE Hydro. À la demande des représentants de la compagnie, le modèle devra être développé à l'aide du logiciel Ansys® 8.1. Ce logiciel a déjà été utilisé pour la modélisation du procédé de soudage par différents auteurs, tels que Frewin [17] et Wu [18].

Tel que le démontre la figure 10, la géométrie d'une aube est très complexe. De plus, l'assemblage de l'aube avec la couronne et la ceinture comporte un nombre très élevé de passes de soudure. Afin de faciliter le développement de l'outil de calcul, le modèle est développé à partir d'un problème simple, soit une plaque rectangulaire avec un cordon de soudure déposé en son centre. Des essais expérimentaux permettront de déterminer la validité du modèle. Le modèle devra être suffisamment optimisé pour permettre une simulation rapide tout en donnant des résultats suffisamment représentatifs.

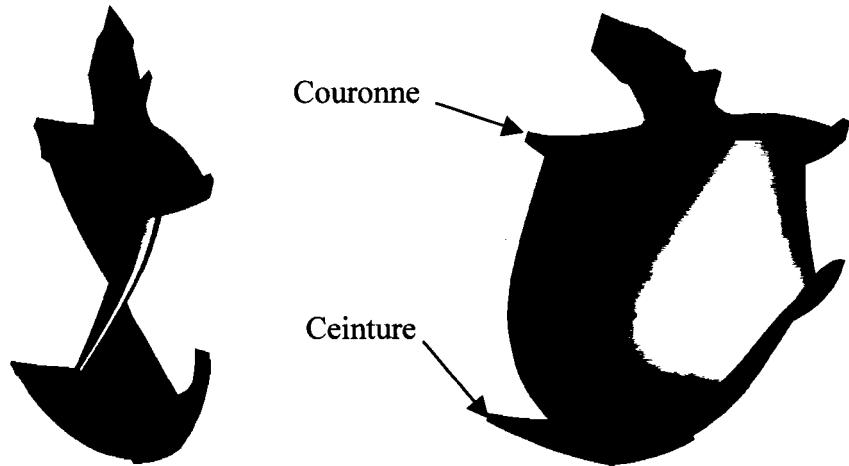


Figure 10 Géométrie de l'aube