Mechanical Calculation of Fuel Assemblies for Pressurized Water Reactors: COCASSE Code

R. Limon

C.E.A., CEN Saclay, Département de Technologie, F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

ABSTRACT

The COCASSE code aims at studying the mechanical behaviour of a fuel assembly for pressurized water reactor. It enables to study not only classical structures with grids rigidly bound to guide tubes, but also new structures.

The code calculates the thermal expansions and the growth under irradiation of all the elements, and the creep, the plastic and the elastic strains of guide tubes, fuel rods and the other elements wich can be considered as beams.

The forces between elements or their variations are determined by the resolution of a system of equations resulting from equilibrium, elongation force, geometrical and binding relations.

An axial compression test on an assembly has been performed : results of measurments and calculations are in good agreement.

1. INTRODUCTION

Le code COCASSE est destiné à étudier le comportement mécanique d'un assemblage de réacteur à eau sous pression. Il calcule, en fonction des sollicitations subies par l'assemblage, les forces d'interaction entre ses éléments, leurs déplacements relatifs, les contraintes et les déformations dans les tubes guides et les gaines des crayons combustibles au cours du temps.

Les structures d'assemblages étudiées dans la version actuelle du code (voir schéma de principe, figure 1) sont constituées d'éléments verticaux : crayons combustibles, tubes guides et autres, et d'éléments horizontaux : grilles et embouts. La liaison entre un élément horizontal et un élément vertical, si elle existe, est rigide, un frottement ou un appui.

Dans sa version actuelle, le code n'étudie que le comportement axial de l'assemblage.

2. RELATIONS FONDAMENTALES

2.1. Relations entre allongements et forces

Les déformations de tous les éléments de l'assemblage sont supposées petites. Les éléments horizontaux, notés G_j en commençant par le bas, sont supposés subir uniquement de la croissance sous irradiation et des dilatations thermiques. Les éléments verticaux, notés T_i, subissent de la croissance et du fluage sous irradiation, des déformations plastiques, des dilatations thermiques et des déformations élastiques. Ces dernières peuvent être décomposées en deux termes : l'un dû aux forces F_{GTij} exercées par les éléments G_j sur l'élément T_i considéré, et l'autre dû aux autres forces sur T_i, qui sont connues.

L'allongement de la partie j de T_i (de la gaine si c'est un crayon) comprise entre G_j et G_{j+1} est donc :

$$\Delta l_{ij} = \Delta l_{ij}^{cr} + \Delta l_{ij}^{fl} + \Delta l_{ij}^{pl} + \Delta l_{ij}^{th} + \Delta l_{ij}^{eaf} + \zeta_{ij} \cdot SF_{GTij}$$

- les cinq premiers termes étant respectivement les allongements liés à la croissance, au fluage, aux déformations plastiques, aux dilatations thermiques et aux déformations élastiques dues aux autres forces que les F_{GTij},

- SF_{GTij} étant la somme des forces exercées sur T_i par les éléments G_j, situés au-dessus de la partie j,

- ζ_{ij} étant la souplesse de la partie j de T_i.

En différentiant cette expression de l'allongement et en décomposant la variation de déformation plastique en deux termes dont l'un dépend des variations des F_{GTij} et dont l'autre est connu, on obtient la variation d'allongement au cours d'un petit pas de temps :

$$\delta\Delta l_{ij} = \delta\Delta l_{ij}^{\circ} + (\zeta_{ij} + \zeta_{ij}^{pl}) \cdot \delta SF_{GTij}$$

- ζ_{ij}^{pl} étant la souplesse supplémentaire due aux déformations plastiques,
- les seuls termes inconnus étant $\delta\Delta l_{ij}$ et δSF_{GTij}.

2.2. Equations d'équilibre

L'assemblage étant à l'équilibre, la somme des forces exercées sur chacun de ses éléments est nulle, ce qui donne les relations qui suivent.

Pour chaque élément G_j, F_{Gj} étant la force extérieure à l'assemblage exercée sur cet élément, I étant le nombre de types différents d'éléments verticaux et n_i étant le nombre d'éléments de type i :

$$\sum_{i=1}^{I} n_i \; F_{GTij} = F_{Gj}$$

Pour un élément T_i, F_{Ti} étant la force extérieure à l'assemblage exercée sur T_i et j étant le nombre d'éléments G_j :

$$\sum_{j=1}^{J} F_{GTij} + F_{Ti} = 0$$

2.3. Relations géométriques

La distance entre deux éléments horizontaux consécutifs s'exprime en fonction de la longueur de la partie comprise entre ceux-ci de tout élément vertical lié à ces deux éléments. Ceci fournit des relations entre les allongements des parties des différents éléments verticaux situées aux mêmes niveaux.

2.4. Relations de liaison

Les lois de comportement des liaisons entre éléments se traduisent sous forme de relations sur le déplacement relatif de deux éléments liés ou sur leur force d'interaction.

S'il n'y a pas de liaison entre deux éléments, la force exercée par l'un sur l'autre est nulle.

S'il existe une liaison rigide entre deux éléments, leur déplacement relatif au niveau de cette liaison est nul.

Si la liaison est un frottement : ou bien le déplacement relatif des deux éléments au niveau de leur liaison est nul ou bien leur force d'interaction a une valeur absolue égale à la force limite de glissement et un sens qui s'oppose au glissement.

Si la liaison est un appui : ou bien la distance entre les points d'appui est nulle, ou bien la force exercée par un élément sur l'autre est nulle.

3. SOLLICITATIONS SUR L'ASSEMBLAGE

3.1. Cas étudiés par le code

Afin d'étudier le comportement de l'assemblage en réacteur, le code prend en compte les variations de température, l'irradiation et les forces auxquelles est soumis

l'assemblage dans le coeur. D'autres forces sont aussi envisagées afin de pouvoir analyser des essais mécaniques, des accélérations ou certaines phases de la fabrication.

3.2. Forces extérieures exercées sur l'assemblage

Les forces extérieures exercées sur l'assemblage sont les suivantes.

- Le poids dans un champs de pesanteur pouvant varier ce qui permet d'étudier les accélérations.

- Les forces exercées par un fluide en mouvement vers le haut : poussées d'Archimède et hydraulique, liées à la pression, et la force de frottement.

- La force sur l'embout inférieur due au support de l'assemblage qui est la plaque inférieure du coeur en réacteur ou le bâti d'essai lors d'un essai mécanique. La liaison est rigide ou un appui.

- Si l'embout supérieur est muni de ressorts, on considère la force exercée sur ceux-ci par la plaque supérieure du coeur ou, éventuellement, le bâti d'essai.

- Des forces connues sur les grilles et embouts permettant d'analyser des essais mécaniques ou de prendre en compte la force exercée par une grappe sur l'embout supérieur.

- Des forces connues sur les extrémités des éléments verticaux permettant d'estimer les précontraintes introduites lors du crayonnage de l'assemblage.

3.3. Forces de liaison avec le coeur

Parmi les forces subies par l'assemblage, il en existe deux inconnues a priori : la force exercée par la plaque supérieure du coeur sur les ressorts et celle exercée par la plaque inférieure du coeur sur l'embout inférieur. Ces forces sont déterminées par les équations de liaison entre l'assemblage et le coeur, la relation entre la distance entre plaques du coeur et la hauteur de l'assemblage, déterminant la flèche des ressorts, et enfin la relation d'équilibre de l'assemblage.

3.4. Sollicitations intérieures aux crayons combustibles

Pour le calcul des contraintes dans la gaine d'un crayon et donc de ses déformations, le code prend en compte la pression intérieure, due aux gaz, la force exercée par le ressort interne sur le haut du crayon, et des contraintes dues au combustible. Ces sollicitations sur la gaine, d'origine interne au crayon, doivent être déterminées par un code de calcul de crayons combustibles.

4. DESCRIPTION DU PROGRAMME

4.1. Calcul de l'état initial

Etant donné que le code peut prendre en compte des structures assez complexes, il vérifie avant de commencer les calculs, que les liaisons entre les éléments de l'assemblage permettent d'assurer sa cohérence. Ensuite, le code calcule les sollicitations sur l'assemblage et établit les équations. Etant donné que la relation entre les déformations plastiques et les contraintes n'est pas linéaire, les équations sont résolues par approximations successives. A la première itération, les déformations plastiques sont supposées nulles, on résoud les équations linéaires liant les autres inconnues et on recalcule, en fonction des contraintes obtenues, les déformations plastiques à partir desquelles on va recommencer la même séquence de calcul, et ainsi de suite jusqu'à obtention de la précision voulue. S'il n'y a pas de déformations plastiques, la solution est obtenue à la première itération.

4.2. Calcul de l'évolution

Les données sont lues à des instants discrets et supposées varier linéairement ou selon un polynôme du second degré entre deux instants consécutifs. Les périodes entre ces instants sont découpées en pas de temps suffisamment petits pour pouvoir considérer les variations de toutes les fonctions comme linéaires. Pour chaque pas de temps, le code calcule les variations des sollicitations et établit les équations sur les variations des grandeurs calculées. Les équations étant linéaires, elles sont résolues par une méthode exacte. Les valeurs des grandeurs à la fin du pas de temps sont alors calculées à partir de leurs valeurs au début et de leurs variations ainsi obtenues.

Les forces limites de glissement des crayons dans les grilles diminuant sous irradiation, ceux-ci peuvent glisser par rapport au reste de la structure si la relaxation est suffisamment importante. C'est pourquoi le code vérifie à chaque pas de temps si la structure se tient en un seul bloc ou si une partie de l'assemblage se déplace par rapport à l'autre. Dans ce cas, le déplacement est supposé instantané.

5. VERIFICATION EXPERIMENTALE

5.1. Définition du cas étudié

On examine ici un essai mécanique de compression axiale réalisé au CEA sur une maquette d'assemblage combustible de géométrie 17 x 17 à 8 grilles liées rigidement aux tubes guides. La force de compression exercée sur l'embout supérieur varie de 0 à 5000 daN et rediminue jusqu'à 0 puis recommence le même cycle une seconde fois. Les déplacements axiaux des grilles et de l'embout supérieur sont mesurés en quatre points afin de vérifier que leurs rotations sont faibles et d'améliorer la précision sur la mesure de leurs translations.

5.2. Etat initial

Pour calculer la répartition des forces dans l'assemblage, il est nécessaire de connaître les longueurs des crayons à tous les niveaux intergrilles dans l'état initial pour l'essai. Certes, la longueur des crayons entre deux grilles consécutives est liée simplement à celle des tubes guides entre les deux mêmes grilles mais c'est la longueur incluant les déformations élastiques introduites lors de la fabrication et non la longueur à l'état libre. Les longueurs initiales des crayons à tous les niveaux, qui sont celles obtenues à la fin de leur glissement lors du crayonnage, sont calculées en considérant de façon schématique que tous les crayons sont introduits simultanément dans l'assemblage.

5.3. Résultats des calculs et des mesures

Les résultats des calculs et des mesures sont représentés sur la figure 2, en ce qui concerne le déplacement de la grille inférieure, et sur la figure 3, en ce qui concerne celui de l'embout supérieur. Le déplacement mesuré de la grille inférieure, au maximum 0,3 mm, est double du déplacement calculé qui prend uniquement en compte la déformation des tubes guides. Ceci peut s'expliquer par une flexion de l'embout inférieur et surtout par une déformation des liaisons entre les tubes guides et la grille inférieure qui sont relativement souples dans cet assemblage. Cette différence se retrouve pour le déplacement de l'embout supérieur pour lequel les pentes calculées et mesurées des droites dans les domaines où il n'y a pas de glissement des crayons dans les grilles sont différentes mais, excepté cela, il y a un bon accord entre le calcul et la mesure puisque le déplacement maximal de l'embout supérieur est 1,9 mm, dans le premier cas, et 2,1 mm, dans le second.

6 - CONCLUSION

La version actuelle du code COCASSE permet d'étudier de façon analytique le comportement mécanique axial d'une assez grande variété de structures susceptibles de constituer des assemblages de réacteurs à eau sous pression.

Les résultats d'un essai de compression axiale d'un assemblage confirment de façon satisfaisante les calculs et montrent ainsi que le code traite correctement le glissement des crayons dans les grilles.

Il est néanmoins nécessaire de comparer les prédictions du code à des résultats d'examens d'assemblages caractérisés irradiés en réacteur de puissance afin de s'assurer qu'aucun phénomène sensible n'est négligé.

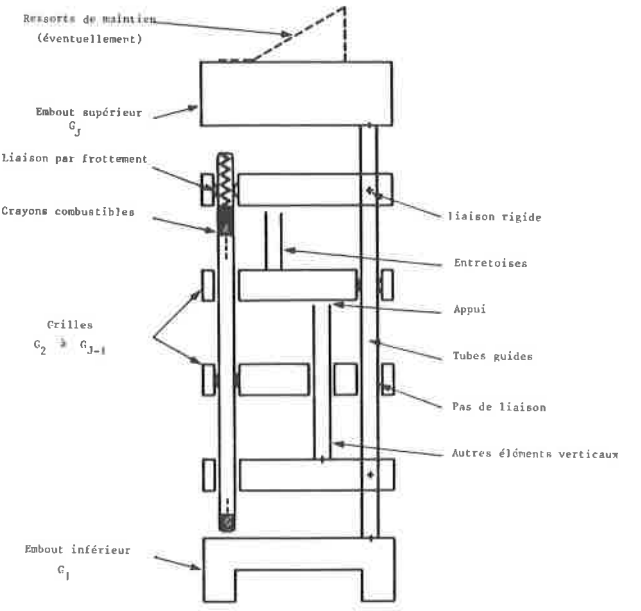

Figure 1 : Schéma de principe des structures étudiées par COCASSE

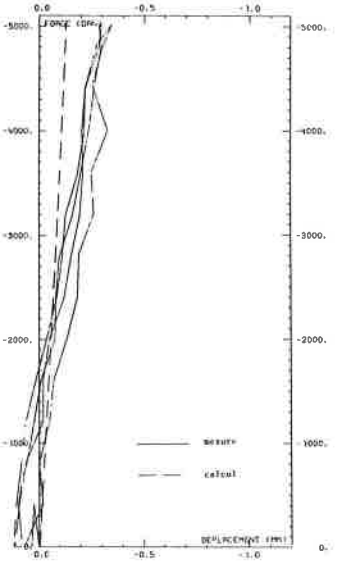

Figure 2 : Compression axiale de l'assemblage : déplacement de la grille inférieure en fonction de la force sur l'embout supérieur.

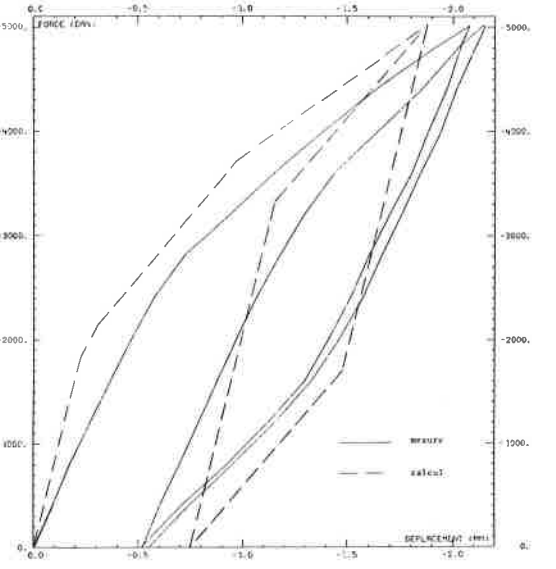

Figure 3 : Compression axiale de l'assemblage : déplacement de l'embout supérieur en fonction de la force exercée dessus.