Application of RCC-MR Code to Pre-Design of Class 1 Components for Fast Breeder Reactor

J.C. Semedard, B. Daron

Stein Industrie, Département Nucléaire, B.P. No. 74, F-78140 Vélizy-Villacoublay, France

ABSTRACT : This paper describes a simplified method of calculation of the creep-fatigue damage on an elastic basis according to the rules of the french code RCC-MR for Fast Breeder Reactor components. Based upon some hypothesis satisfied in most cases, this method is applicable by the design engineer in order to assess whether his design has any chance of being satisfactory in terms of creep-fatigue damage or whether geometrical, mechanical or thermal measure must be taken to improve it.

NOTATIONS EMPLOYEES (Reprises du RCC-MR § RB 3260).

$\overline{\Delta\sigma}_{tot}$ variation des contraintes totales (primaires + secondaires + pic) au cours d'un cycle.

Moy P contrainte primaire moyenne au cours d'un cycle.

$\overline{\Delta\varepsilon}_{el + pl}$ variation de déformation "réelle" calculée sans fluage.

$\overline{\Delta\varepsilon}_{fl}$ supplément de déformation dû au fluage.

Ks coefficient de symétrisation du cycle.

$\Delta\sigma^*$ variation de contrainte lue sur la courbe cyclique pour la variation de déformation $\overline{\Delta\varepsilon}_{el + pl}$.

σ_k = Moy P + Ks $\Delta\sigma^*$ contrainte de fluage du cycle.

1. - INTRODUCTION

Confronté à une structure complexe fonctionnant dans le domaine de fluage de son matériau constitutif et sollicitée à la fois par des chargements mécaniques et des chargements thermiques, l'ingénieur concepteur est le plus souvent soucieux, avant d'entreprendre une vérification complète de la tenue mécanique, souvent longue et difficile, d'estimer si sa conception a des chances d'être satisfaisante ou si des dispositions géométriques, mécaniques ou thermiques doivent être prises pour l'améliorer.

Lorsque les règles de dimensionnement imposées sont celles du code RCC-MR, le nombre et le type de vérifications mécaniques à effectuer ainsi que la sophistication des calculs de contraintes requis pour l'application de ces règles, sont tels qu'il est assez difficile de s'assigner des objectifs propres à assurer une conception correcte et économique.

L'expérience des calculs effectués par STEIN INDUSTRIE sur des structures en acier du type 316-SPH travaillant dans le domaine de fluage a montré la nécessité de procéder, dès le stade de la conception, à une analyse systématique - au moins simplifiée - de la satisfaction de la totalité des critères imposés par le Code :

- limitation des contraintes primaires,
- limitation des sollicitations pouvant entraîner des instabilités élastiques et inélastiques,
- limitation des risques de déformation excessive,
- limitation des risques de ruine par fatigue-fluage.

Si l'examen de la validité d'une conception vis-à-vis des 3 premiers types de limites se révèle généralement aisé, il n'en va pas de même vis-à-vis des risques de ruine par fatigue-fluage dont les limites ne peuvent être généralement vérifiées qu'après un calcul détaillé des contraintes. Or la fatigue-fluage est le plus souvent le mode de ruine dimensionnant et pouvoir estimer dès le stade de la conception si la tenue à ce mode de ruine a de bonnes chances d'être vérifiée devient un atout de première importance.

On expose ici une méthode simplifiée permettant par l'usage d'abaques, une évaluation rapide des taux d'usage de fatigue-fluage présentés par une structure, utilisable avec les données succintes dont on dispose au stade de la conception. Ces abaques en permettant de visualiser l'influence des différents paramètres, ont de plus l'avantage de constituer un guide pour orienter l'amélioration de la conception.

Cette méthode repose sur quelques hypothèses simplificatrices, vérifiées dans la grande majorité des cas, permettant de réduire le nombre de paramètres.

2.-HYPOTHESES

Le fonctionnement à chaud pendant lequel la structure peut fluer, se limite à un régime permanent unique (généralement le fonctionnement à pleine puissance) de durée totale T heures. Il est interrompu par N transitoires conduisant à un arrêt froid si bien que la durée moyenne de fonctionnement à chaud par cycle est égale à $\Delta T = T/N$, la température du régime permanent étant égale à θ . On suppose également que ces seuls cycles importants sont les N passages du régime permanent aux états d'arrêt froids. Ils peuvent être de différents types.

En conséquence de cette hypothèse on peut prendre pour la contrainte primaire moyenne au cours du temps à chaud, Moy P, la contrainte équivalente $\overline{P_L + P_b}$ du régime permanent qu'on notera par la suite Moy P.

En ce qui concerne les caractéristiques du cycle, on fait les hypothèses suivantes dont le domaine de validité est assez général :

- la température maximale au cours du cycle est voisine de la température du régime permanent, si bien qu'on peut poser $T_{maxi} = \theta$.
- la variation des contraintes primaires au cours du cycle est suffisamment faible pour que le terme $\overline{\Delta\varepsilon_2}$ (majoration plastique due à la variation des contraintes primaires) intervenant dans le calcul de la variation de déformation élastique + plastique puisse être considéré comme nul.

3.-PARAMETRES UTILES

Les hypothèses du § 2 étant supposées vérifiées, 4 paramètres suffisent au calcul des taux d'usage causéspar un cycle donné se reproduisant n fois, dans le cas d'une analyse

détaillée selon RCC-MR RB 3260 :

a) la variation maximale des contraintes totales, notée $\overline{\Delta\sigma}$tot, au cours de ce cycle,

b) la contrainte primaire moyenne notée Moy P,

c) la température du régime permanent à chaud : θ ,

d) la durée de ce régime permanent par cycle : ΔT.

Les taux d'usage de ces n cycles seront :

Fatigue : V ($\overline{\Delta\sigma}$tot , Moy P, θ , n)

calculé à partir de la déformation ,

$\overline{\Delta\varepsilon} = \overline{\Delta\varepsilon}_{el+pl}$ ($\overline{\Delta\sigma}$tot, θ) + $\overline{\Delta\varepsilon}$fl ($\sigma$k , ΔT , θ) où σk = Moy P + Ks $\Delta\sigma$*

Fluage : W (σk/0,9 , θ , n ΔT)

Il est parfois possible de modifier les cyclages de fonctionnement ou de choisir des conceptions permettant d'abaisser les températures des structures. Cependant, plus fréquemment, les paramètres θ et ΔT sont difficiles à remettre en cause de sorte que le concepteur est le plus souvent amené à définir la structure en fonction des valeurs de Moy P et de $\overline{\Delta\sigma}$tot.

Si Moy P est une valeur facilement estimable dès le stade de la conception, $\overline{\Delta\sigma}$tot est par contre une valeur dont l'obtention précise nécessite généralement le recours à des calculs par éléments finis dans les zones de discontinuité géométrique où se rencontrent habituellement les taux d'usage de fatigue-fluage dimensionnants.

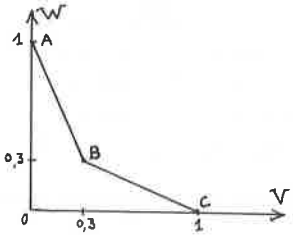
Afin de limiter les itérations d'analyse de contraintes entre plusieurs conceptions il est économique de connaître avant toute analyse détaillée de contraintes, les limites admissibles pour $\overline{\Delta\sigma}$tot. En effet l'ordre de grandeur des contraintes thermomécaniques résultant du fonctionnement est le plus souvent aisé à appréhender de façon rapide en utilisant la théorie des coques minces (soit analytiquement, soit par programme de calcul peu coûteux) et en appliquant des facteurs de concentration de contraintes appropriés.

Le concepteur est ainsi mieux à même de décider des aménagements éventuels à apporter à sa conception initiale avant de procéder à une analyse détaillée.

4.-ETABLISSEMENT DES ABAQUES PERMETTANT LA VERIFICATION A PRIORI DE L'ACCEPTABILITE DES TAUX D'USAGES DE FATIGUE-FLUAGE.

Il est donc intéressant de tracer des courbes limites dans un repère (Moy P, $\overline{\Delta\sigma}$tot), ΔT et θ étant fixés. Ces courbes peuvent être paramétrées en nombre de cycles admissible Nd.

En traçant pour diverses valeurs de Nd, les courbes $\overline{\Delta\sigma}_{\text{tot admissible}}$ = f (Moy P) telles que V et W se trouvent sur la frontière ABC du domaine d'admissibilité présenté ci-dessous. On obtient un réseau de courbes permettant d'estimer, connaissant $\overline{\Delta\sigma}$tot et Moy P, combien de cycles d'amplitude $\overline{\Delta\sigma}$tot sont nécessaires pour atteindre cette frontière.



Ainsi, lorsqu'on a évalué pour les différents cyclage d'occurence ni, par lesquels on passe du régime permanent chaud à un état d'arrêt froid (Σni = N), les valeurs des variations de contraintes totales $\overline{\Delta\sigma}$tot(i) associées, il suffit de reporter sur ce réseau de courbes les points de coordonnées (Moy P, $\overline{\Delta\sigma}$tot(i)) pour en déduire par

interpolation les nombres Ndi de cycles admissibles et de calculer $\sum_i$ ni/Ndi, taux d'endommagement global prévisible.

Alors si,

$\sum_i$ ni/Ndi < 1 : la conception a de bonnes chances de se révéler satisfaisante au terme d'une analyse détaillée.

et si $\sum_i$ ni/Ndi > 1 : il faut autant que possible améliorer la conception en cherchant à abaisser Moy P et/ou $\overline{\Delta\sigma}$tot des différents cyclages afin de se ramener au premier cas, car la conception initiale n'a que peu de chances de se révéler satisfaisante au terme d'une analyse détaillée.

L'application de cette méthode est réalisée par programme Fortran BD 18 qui permet pour 10 valeurs différentes de Nd nombre de cycles admissibles, θ et ΔT étant fixés, de tracer les courbes $\overline{\Delta\sigma}_{tot\ admissible}$ = f (Moy P).

En plus de ces courbes "isocycliques", le programme permet également de tracer les courbes $\overline{\Delta\sigma}_{tot\ admissible}$ = f (Moy P) telles que N cycles présentent des taux d'usage V et W juste admissibles :

- pour 10 valeurs différentes de θ , T étant fixé (courbes isothermes),
- pour 10 valeurs différentes de T, θ étant fixé (courbes isochrones).

Ces courbes permettent de voir l'influence de la température et de la durée à chaud sur les limites de contraintes. Elles sont utilisables lorsqu'il est possible par modification de la conception d'abaisser la température de fonctionnement ou de limiter la durée à haute température.

5.-RESULTATS

On présente en figure :

1a et 1b : les courbes "isocycliques" à θ = 525 et 545°C (977 et 1013°F) pour une durée à chaud par cycle ΔT = 180 Heures et Nd valant 10,20,50,100,200,500,1000, 2000,5000 et 10000 cycles.

1c : les courbes "isothermes" pour 1000 cycles répartis sur 180.000 Heures aux températures de 500 à 545°C (932 et 1013°F) par pas de 5°C (9°F).

1d : les courbes "isochrones" pour 1000 cycles à 525°C, la durée totale à cette température valant 1000, 1800,3000,6000,10000,18000,30000,60000,100000 et 180.000 Heures.

Ces courbes montrent la réduction importante des limites admissibles lorsque la température s'élève (fig. 1c) et lorsque la contrainte primaire Moy P atteint des valeurs élevées.

Exemple d'utilisation de la méthode

La structure à concevoir doit travailler 180.000 Heures à θ = 525°C et subir 1.000 transitoires conduisant à des états d'arrêt.

Ces 1.000 transitoires se décomposent en :	$\overline{\Delta\sigma}$tot estimé
- 60 transitoires s'accompagnant d'un choc thermique très important :	420 MPa
- 240 transitoires s'assompagnant d'un choc thermique important :	280 MPa
- 700 transitoires s'accompagnant d'un choc thermique peu important :	210 MPa

L'ingénieur concepteur a évalué par ailleurs, la contrainte primaire lors du régime permanent à Moy P = 25 MPa.

Il fait donc tracer les courbes isocycliques $\overline{\Delta\sigma}_{tot\ admissible}$ = f (Moy P) pour

θ = 525°C et ΔT = 180.000/1.000 = 180 Heures (figure 1a) et il reporte les points correspondant à Moy P = 25 MPa et $\overline{\Delta\sigma}$tot = 420, 280 et 210 MPa. Par interpolation entre les courbes il constate que le nombre de cycles admissibles pour ses 3 types de cycles sont respectivement 120, 420 et 850 conduisant ainsi à un taux d'endommagement global valant 60/120 + 240/420 + 700/850 = 1,90 $>$ 1.

Il lui faut donc améliorer sa conception (par augmentation des congés de raccordement, diminution de Moy P ou des variations de contraintes primaires + secondaires ...) avant de passer à l'analyse détaillée.

6.-CONCLUSION

On a pu formaliser une méthode simplifiée de vérification de l'admissibilité des taux d'usage de fatigue et de fluage selon les règles du code RCC-MR RB 3260 applicables à l'analyse élastique, utilisable dès le stade de la conception.

Elle permet de décider, avant la mise en oeuvre de la totalité des calculs thermomécaniques nécessaires au dimensionnement définitif de l'appareil, des modifications éventuelles de la conception initiale ou de juger à priori de la nécessité de recourir à une analyse inélastique, pour permettre à l'appareil de satisfaire les critères de tenue à la ruine par fatigue-fluage, critères souvent dimensionnants pour les structures devant travailler à chaud.

Toutefois, cette analyse simplifiée ne saurait se substituer à l'analyse détaillée telle que prévue par le code RCC-MR, pour justifier la tenue à la ruine par fatigue-fluage d'un appareil.

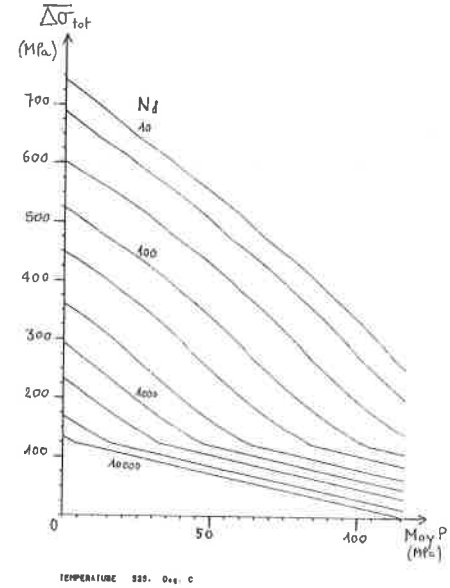
La méthode présentée s'applique aux appareils en acier type Z4 CND 17-12 dont les caractéristiques sont celles tabulées dans l'annexe A3-1S du RCC-MR.

Cette méthode peut être étendue à d'autres types d'aciers austénitiques.

§

§ §

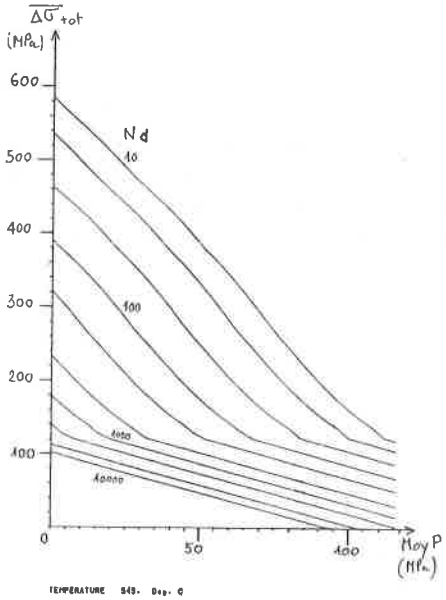
§



TEMPERATURE 325. Deg. C

DUREE A CHAUD PAR CYCLE 180. heures

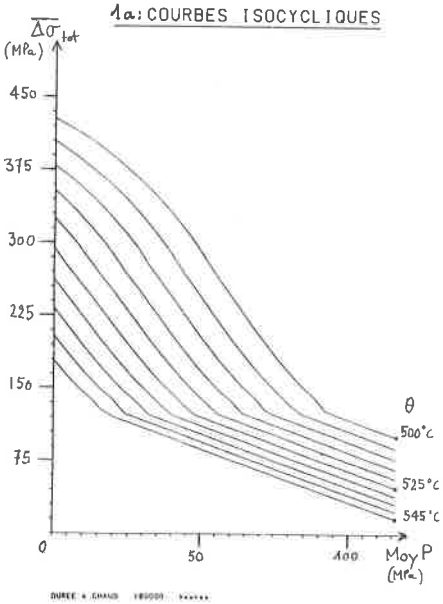
1a: COURBES ISOCYCLIQUES



TEMPERATURE 545. Deg. C

DUREE A CHAUD PAR CYCLE 180. heures

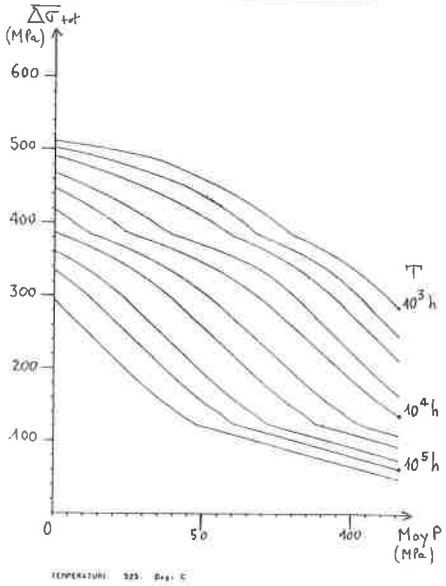
1b: COURBES ISOCYCLIQUES



DUREE A CHAUD 180000 heures

NOMBRE DE CYCLES 1000

1c: COURBES ISOTHERMES



TEMPERATURE 325. Deg. C

NOMBRE DE CYCLES 1000.

1d: COURBES ISOCHRONES

FIGURE 1 : EXEMPLES D'ABAQUES OBTENUS PAR APPLICATION DE LA METHODE SIMPLIFIEE.