Application of ASME Code Case N47 to Pre-Design of Structures of Steel AISI 316

(Application du code case N47 de l'ASME à la conception et au prédimensionnement de structures en acier AISI 316)

J.C. Semedard, B. Daron, Y. Renault

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

Summary :

Faced with a complex structure operating in the creep field of its constituent matérial and subjected both to mechanical and thermal loads, the design engineer is usually concerned, before undertaking a full mechanical analysis which is often long and difficult, to assess whether his design has any chance of being satisfactory or whether geometrical, mechanical or thermal measures (generally more costly) must be taken to improve it.

When the calculation rules laid down are those of ASME code case N47, the number and type of mechanical checks to be carried out as well as the number of compromises possible between the various parameters enabling these requirements to be satisfied are such that it is difficult to set oneself objectives suitable for ensuring a correct and economical design.

Stein Industrie's experience in performing calculations for various components of a fast breeder reactor has resulted in the development of a method of preliminary structure design analysis ; this method is described together with the list of checks to be carried out.

Although there is generally no particular difficulty in evaluating primary stresses and checking whether they are permissible, the same is not true of secondary and peak stresses. This paper defines the parameters (operating cycle occurrence, duration, temperatures) and the values (important types of stresses) which must at least be taken into consideration, and their choice is discussed. The relation between the permissible values and the various parameters is obtained from the checking methods indicated in appendix T of code case N47 for an elastic analysis.

The permissible values are presented in the form of calculation charts for steel AISI 316. A general calculation chart is presented which gives, as a function of the level of primary stresses, the sizing Ruin method and the sensitivity of the limits obtained in terms of the softening of the structure forms and of the cycle's temperature.

1 - INTRODUCTION

Etant donné 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 mécanique complète souvent longue et difficile, d'estimer si sa conception a des chances d'être satisfaisante, ou si des dispositions géométriques, mécaniques ou thermiques (généralement plus coûteuses) doivent être prises pour l'améliorer.

Lorsque les règles de calcul imposées sont celles du code case N47 de l'ASME, Réf. (1) le nombre et le type de vérifications mécaniques à effectuer ainsi que le nombre de compromis possibles entre les divers paramètres permettant de satisfaire à ces exigences 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 AISI 316 travaillant dans le domaine de fluage a montré la nécessité, dès le stade de la conception, de procéder à une analyse systématique - au moins simplifiée - de la satisfaction de la totalité des critères imposés par le code :

- limitation des contraintes primaires de membrane,
- limitation des contraintes primaires locales et de flexion,
- limitation des sollicitations pouvant entraîner des instabilités élastiques et inélastiques
- limitations des risques liés à l'analyse cyclique :
  . limites de déformation,
  . limites pour la ruine par fatigue - fluage.

Si l'examen de la validité d'une conception vis à vis des 3 premiers types de limites se révèle relativement aisé, il n'en va pas de même vis à vis des sollicitations cycliques, dont les limites ne sont généralement vérifiées qu'a posteriori.

Pour l'acier AISI 316 utilisé à température élevée, il s'avère le plus souvent que les sollicitations cycliques sont dimensionnantes de sorte que l'orientation de la conception nécessite la connaissance de la variation des limites liées à ce mode de ruine avec les différents paramètres laissés au choix du concepteur.

On expose ici une méthode permettant de définir à priori les limites basses de contraintes en-dessous desquelles, la conception a de bonnes chances de se révéler satisfaisante au terme d'une analyse élastique détaillée et les limites hautes dont le franchissement conduit presque certainement à une analyse inélastique et/ou à une modification de la conception initiale.

2 - HYPOTHESES GENERALES

2.1 - Hypothèses de fonctionnement - histogramme :

La méthode proposée s'appuie sur les cas de fonctionnement couramment rencontrés dans le dimensionnement de composants d'une Centrale Nucléaire à Neutrons rapides.

Les structures sont supposées conçues pour supporter 180.000 h de fonctionnement en régime permanent à la température chaude T. En pratique cette température est située dans la gamme 510 - 550°.

Différentes catégories d'états d'arrêt sont possibles pour la Centrale, les arrêts les plus fréquents sont des arrêts à 250° que, pour simplifier, nous prendrons pour état froid unique.

Nous faisons l'hypothèse généralement réaliste que pour les structures chaudes qui nous intéressent, les chocs chauds subis sont négligeables tant du point de vue de leur intensité que de leur occurrence Par ailleurs, les chocs thermiques froids principaux sont consécutifs à des incidents impliquant l'arrêt rapide ou d'urgence de la Centrale ce qui définit une occurrence de base N1 = 475 incidents. On admet que la procédure d'arrêt normal est suffisamment lente pour que les températures et contraintes dans les structures varient, au cours de la procédure, par un passage graduel de leur état du régime nominal à leur état à l'arrêt.

Ces hypothèses conduisent à distinguer les 2 types de cycles principaux schématisés sur le diagramme temps-contrainte de la fig. 1 :

Cycle A : démarrage, maintien au régime nominal, transitoire froid, état d'arrêt.

Cycle B : démarrage, maintien au régime nominal, passage progressif à l'état d'arrêt.

On fait l'hypothèse statistique d'une durée de maintien à la température chaude T identique pour chaque cycle et on définit les occurrences des cycles comme suit :

- Cycle A : le nombre de cycles est pris égal au nombre N1 d'arrêts rapides ou d'urgence de la Centrale, majoré pour prise en compte des transitoires négligés.

En première approximation, on prend $N = N1 + r_i^5 N_i$

Dans lequel r_i est une estimation du rapport des contraintes entre le transitoire négligé (d'occurrence N_i) et le transitoire froid de référence.

En pratique, on choisit le plus pénalisant des transitoires normaux et incidentels pour transitoire de référence de sorte que le terme correctif $r_i^5 N_i$ est faible par rapport à N1

- soit parce qu'il est fait par un transitoire accidentel qui produit des contraintes élevées mais a une occurrence faible
- soit parce qu'il est fait par les transitoires négligés qui ne conduisent pas à un arrêt et produisent peu de contraintes de sorte que r_i^5 est très faible (exemple : $r_i = 0,5$ donne $r_i^5 = 0,03$).

Pour la suite, nous adoptons N = 500.

- Cycle B : le nombre de cycles N' correspond au nombre d'arrêts normaux, nous adoptons N' = 400.

2.2 - Paramètres utilisés pour une analyse cyclique simplifiée :

Les cycles sont caractérisés par les différents types de contraintes - calculées élastiquement - qui sont résumés dans le tableau de la fig. 2. On notera :

- que l'on assimile de façon pessimiste, les contraintes primaires locales et de flexion notées P aux contraintes primaires de membrane et que l'on admet que ces contraintes ne varient pas lors du passage du régime permanent au transitoire rapide.

Par ailleurs, pour une définition (pessimiste) de limites basses, nous faisons l'hypothèse que ces contraintes sont cyclées (en l'occurrence qu'elles s'annulent pour l'état d'arrêt). Pour une définition de limites hautes, nous supposons à l'opposé que ces contraintes ne sont pas cyclées ce qui se révèle assez réaliste lorsque les effets hydrostatiques sont prépondérants dans la définition des pressions de fonctionnement.

- que l'on distingue parmi les contraintes secondaires notées Q :

. les contraintes Qp pouvant résulter du chargement primaire qui sont supposées cyclées dans l'hypothèse basse et négligeables dans l'hypothèse haute.

. les contraintes d'origine thermique notées Qo en régime permanent et Qt en régime transitoire rapide.

- que l'on définit à l'aide d'un facteur d'intensification k unique, les contraintes de pointe. Ces contraintes résultent essentiellement de 2 phénomènes :

. Un effet géométrique d'intensification des contraintes primaires et secondaires (P+Q) assurant l'équilibre de la structure, dû à la plus ou moins grande brutalité des discontinuités de formes.

De nombreux documents tels que la Réf. (2) permettent de quantifier cet effet, qu'il est également possible d'évaluer à l'aide d'un modèle aux éléments finis. Dans tous les cas, on définit généralement un tenseur d'intensification de contraintes k_{ij} tel que les différentes composantes des contraintes totales s'expriment en fonction des contraintes primaires et secondaires par σ_{ij} totales = k_{ij} σ_{ij} primaires + secondaires.

. Un effet de pic thermique dû à la fraction du chargement thermique n'intervenant pas dans l'équilibre de la structure.

En pratique, pour des chocs thermiques présentant une décélération du choc avec le temps, il apparaît que les contraintes de pic thermique représentent une fraction faible et souvent négligeable des contraintes secondaires d'origine thermique. Dans le cas où le concepteur ne peut faire cette simplification, il lui appartient d'évaluer le supplément relatif de contraintes ainsi apporté et de corriger le tenseur d'intensification de contraintes défini plus haut pour tenir compte de ces effets de pic thermique.

Dans ces conditions, le coefficient k défini plus haut s'exprime par $k = \max(k_{ij})$ et caractérise à la fois la brutalité des transitions de forme géométrique de la structure et la présence et l'intensité des pics thermiques résultant du transitoire rapide.

Nota : Dans ce qui suit, on désignera indifféremment par la même lettre majuscule le tenseur de contraintes et l'intensité de contraintes correspondante.

3 - EXAMEN DES DIFFERENTS MODES DE RUINE SOUS L'EFFET DE SOLLICITATIONS CYCLIQUES

3.1 - Déformation excessive :

Les limites de déformation ε spécifiées par le code case N47 sont de 0,5 % pour les soudures et de 1 % pour le métal de base. A partir des travaux de O'Donnell § Porowski Réf.(3) le code a introduit dans son test T1324, une méthode permettant d'évaluer l'accumulation des déformations dûes à un cyclage de contraintes avec prise en compte du fluage. Des précautions particulières (en particulier dans le classement des contraintes pour prise en compte de l'effet "ressort") conditionnent l'utilisation conservative de cette méthode établie pour des structures axisymétriques.

Pour un acier du type 316 avec les hypothèses du paragraphe 2 et en admettant qu'il n'y a pas de risques d'effet ressort, il est possible de tracer les réseaux de courbes donnant la contrainte secondaire admissible Q au cours du régime transitoire selon la valeur de la contrainte primaire P.

Si σ désigne la contrainte lue sur les courbes isochrones qui maintenue durant un temps t à la température chaude T provoque une déformation ε (due au fluage) si Sy (250) désigne la limite élastique du matériau à 250° et que l'on pose

$$X = \frac{P}{Sy(250)} \quad \text{et} \quad Z = \inf.\left(1, \frac{\sigma}{1{,}25\ Sy\ (250)}\right) \qquad Y = \frac{Q}{Sy\ (250)}$$

On déduit Q à l'aide de

$$Y = \frac{Z}{X} \qquad \text{pour } X < \frac{Z}{Z+1}$$

$$Y = 1 + Z - 2X + 2\sqrt{(1-X)\ (Z-X)} \qquad \text{pour } \frac{Z}{Z+1} < X < Z$$

$$Y = 1 - X \qquad \text{pour } Z < X < 1$$

On trouve en partie droite des fig. (6) et (7) le réseau de courbes obtenu pour $\varepsilon = 0{,}005$ $t = 180.000$ h paramétré avec la température chaude T.

3.2 - Dommage de fluage - fatigue :

3.2.1 - Dommage de fluage

Pour une analyse élastique, le code case N47 donne au paragraphe T1433 une méthode d'évaluation du dommage de fluage Dc excluant le dommage dû aux contraintes de pic. Avec les notations et les hypothèses précédentes et en posant $Sy = 0{,}5\ (Sy\ (T) + Sy\ (250))$, on calcule la loi de variation du dommage de fluage Dc pour une contrainte σc

$$Dc\ (T,\ t,\ \sigma c) = \frac{t}{Td\ \left(\frac{1}{0{,}9}\ \inf\ (1{,}25\ Sy,\ \sigma c)\right)}$$

Où Td (x) est le temps, lu sur les courbes de rupture pour la contrainte x.

On donne en fig. (3) les réseaux de courbes donnant la variation de Dc avec c paramétrés en température chaude T pour un temps de maintien t de 180.000 h et 2 températures froides (180° et 250°).

3.2.2 - Dommage de fatigue

Dans son paragraphe T1432 le code case N47 propose 2 méthodes pour la définition à partir d'une analyse élastique, des intervalles de variation des déformations totales t servant au calcul du dommage de fatigue.

La méthode 1 calcule l'intervalle de déformation équivalente dû aux contraintes primaires plus secondaires, puis à l'aide d'un coefficient d'intensification de contraintes k (enveloppe pour toutes les composantes) et en tenant compte d'un recentrage du domaine élastique, définit l'intervalle de déformation équivalente $\Delta\varepsilon t$ à entrer dans les courbes de fatigue.

La méthode 2 calcule pour tous les états, les déformations totales propres à chaque composante de contrainte (en tenant compte du coefficient d'intensification particulier à la composante, mais sans recentrage du domaine élastique) et en déduit l'intervalle de déformation totale équivalente $\Delta\varepsilon t$.

Pour l'acier AISI 316 utilisé à des températures inférieures à 550°, il s'avère que la déformation dûe au fluage sur la durée d'un cycle est négligeable dans la mesure où les contraintes primaires sont inférieures à la limite de proportionnalité. Dans ces conditions, seule la somme P + Q des contraintes primaires et secondaires intervient dans le calcul de $\Delta\varepsilon t$ et en utilisant l'équation de Neuber, la méthode 1 permet de définir, pour un cycle entre l'état de contraintes P + Q et l'état de contraintes nulles, un coefficient α tel que

$$\Delta\varepsilon_t = \alpha\ k\ \frac{P + Q}{E} \qquad \text{(E module élastique).}$$

α est une fonction de k et P + Q, qui dépend de la température et du degré de triaxialité des contraintes. On peut montrer que la déformation calculée pour tout état triaxial est inférieure ou égale à la déformation calculée pour un état uniaxial ayant la même intensité de contraintes et que cette déformation est une fonction modérément croissante de la température.

On donne en fig. (4) les valeurs enveloppes de α pour des températures inférieures à 545° en fonction de l'intensité de contraintes P + Q et du coefficient k. Il est possible d'étendre la validité de ces résultats aux cycles revenant à un état de contraintes non nul.

Dans ce qui suit, nous utiliserons la méthode ainsi décrite en tenant compte de la valeur réelle de la température maximale du cycle. Dans ces conditions, le dommage de fatigue Df résultant de l'application de N cycles sous une variation d'intensité de contraintes σf se déduit donc des courbes de fatigue T1430 avec

$$\Delta\varepsilon_t = \alpha\ (T,\ k,\ \sigma f)\ k\ \frac{\sigma f}{E} \qquad \text{Soit } Df = Df\ (N,\ k,\ \sigma f,\ T).$$

A titre comparatif, on montre en fig. (5) l'évaluation d'un facteur α' défini de façon analogue au facteur α mais calculé à l'aide de la méthode 2 en faisant l'hypothèse d'uniaxialité des contraintes.

4 - DEFINITION DE LIMITES POUR L'ANALYSE CYCLIQUE SIMPLIFIEE

4.1 - Déformation excessive :

On adopte les limites définies au paragraphe 3.1 pour une soudure ($\varepsilon = 0{,}005$) et un temps de maintien de 180.000 h. Le programme Stein-Industrie YR 05 permet de tracer le réseau de courbes situé dans la partie droite des fig. (6) et (7), définissant l'acceptabilité des contraintes secondaires en fonction des contraintes primaires. L'attention du concepteur doit être attirée pour la satisfaction de ces limites sur la nécessité de prendre en compte les risques d'effet ressort.

Dans l'hypothèse où ces risques n'existent pas, on pourra assimiler la contrainte secondaire à Qp + Qt ou Qt respectivement pour les hypothèses basse et haute définies au paragraphe 2.

4.2 - Fatigue - fluage :

Le faisceau de courbes situées à gauche de la fig. (6) représente les limites basses de contraintes secondaires dont le respect garantit presque à coup sûr la satisfaction des critères du code case N47 après une analyse élastique détaillée.

Ces courbes sont définies à partir des hypothèses du paragraphe 2 à l'aide du programme Stein-Industrie BD 11 qui résoud l'équation (1) et donnent la contrainte Q, limite de Qp+Qt telle que

$$Dc\,(T, t = 180.000\text{ h}, \sigma c) + Df\,(T, k, \sigma f, N = 500) = 1 \quad \text{équation (1)}$$

Dans lequel, on prend :

$$\begin{cases} \sigma c = \inf\,(1{,}5\,P + 0{,}5\,Q,\ P + Q) \\ \sigma f = P + Q \end{cases}$$

Ceci suppose que le dommage de fatigue dû aux cycles avec arrêts normaux est négligeable et que le dommage de fluage n'est pas fait par les contraintes du régime permanent, c'est-à-dire :

$$\begin{cases} Qp + Qo < 0{,}5\,(P + Q) & \text{dans la zône } P < Q \\ \text{et } Qo < QT & \text{dans la zône } P > Q \end{cases}$$

Ces valeurs limites des contraintes secondaires du régime permanent ne sont pas tracées sur la figure, mais peuvent être calculées directement.

De même, on présente en fig. (7) les limites hautes dont le franchissement indique qu'une analyse inélastique (ou un changement de conception) sera presque à coup sûr nécessaire. Ces courbes sont tracées à l'aide du programme Stein-Industrie BD 11 qui résoud l'équation (2), et donnent la contrainte Q limite de Qt telle que

$$Dc\,(T, t = 100.000\text{ h}, \sigma c) + Df\,(T, k, \sigma f, N = 500) = 1 \quad \text{équation (2)} \qquad \text{avec} \begin{cases} \sigma c = P + 0{,}5\,Q \\ \sigma f = Q \end{cases}$$

Ceci suppose de façon optimiste que les contraintes primaires ne sont pas cyclées, que les contraintes secondaires dûes aux chargements primaires sont négligeables et que les cycles avec arrêts normaux ne sont pas générateurs de dommage.

4.3 - Utilisation de la méthode :

On donne en fig. (8) un organigramme définissant l'utilisation de la méthode dans le cas assez général où la ruine par fluage - fatigue est dimensionnante. Il importe de souligner la nécessité du contrôle de la validité des hypothèses de comportement faites. Par ailleurs, pour certains cas réels sortant du cadre des hypothèses de la méthode, il est souvent possible, à l'aide des résultats généraux du paragraphe 3, d'estimer les corrections nécessaires.

4.4 - Validation de la méthode :

La méthode ainsi définie a été appliquée à un certain nombre de structures en acier du type 316 ayant fait l'objet d'une analyse mécanique détaillée et dont le fonctionnement autorisait les hypothèses faites.

Les résultats sont consignés dans la fig. (9). On constate un bon recoupement entre les conclusions de cette application et les résultats de l'analyse cyclique détaillée.

Il faut noter que certaines structures ont fait l'objet d'analyses inélastiques et que la méthode ne permet pas de préjuger des résultats de cette analyse.

5 - CONCLUSIONS

On a pu formaliser une méthode d'étude simplifiée du comportement de structures en acier AISI 316, sous l'effet de sollicitations cycliques. Cette méthode a pour caractéristique essentielle de nécessiter une analyse préalable du comportement de la structure et elle permet de décider avant la mise en oeuvre de la totalité des calculs thermomécaniques des modifications éventuelles de la conception initiale ou de juger à priori de la nécessité de recourir à une analyse inélastique qui requiert souvent des modèles spécifiques. Toutefois, dans tous les cas, la justification définitive de l'acceptabilité de la structure passe par une analyse détaillée.

Les fig. (6) et (7) présentent l'inconvénient de n'être applicables qu'à des structures dont le comportement entre dans le cadre des hypothèses faites qui sont cependant relativement générales.

Toutefois, la mise en oeuvre de la méthode exposée, par programme de calcul d'exploitation très économique, permet sans difficultés de modifier les hypothèses effectuées et en particulier de prendre en compte certains cas où les contraintes du régime nominal sont élevées.

6 - REFERENCES

(1) ASME Boiler and pressure Vessel Code case N47 - 17.

(2) R.E Peterson
Stress concentration factors
John Wiley and sons 1974.

(3) W.J O' Donnell- J. Porowski
"Upper Bounds of accumulated Strains due to creep ratcheting"
Journal of pressure Vessel Technology 74 PVP 10.

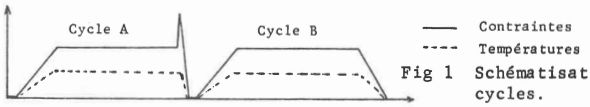
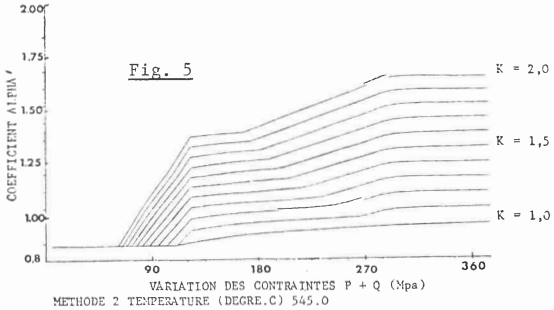
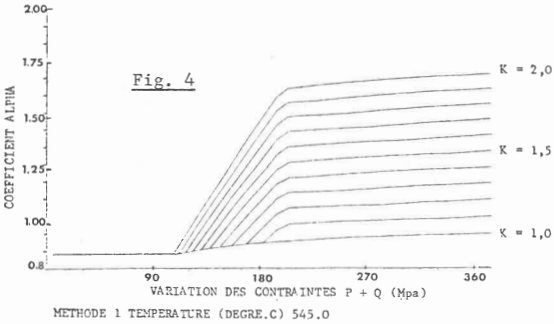


Fig 1 Schématisation des cycles.

Type de contrainte / Phase	Contraintes primaires de membrane	Contraintes primaires locales et de flexion	Contraintes secondaires (Somme notée Q)		Contraintes de pic
			Issues du chargement primaire	Issues du chargement thermique	
Régime permanent	P	P	Qp / O	QO	(k-1) (P+Q)
Régime transitoire	P	P	Qp / O	Qt	(k-1) (P+Q)
Etat d'arrêt	O / P	O / P	O	O	O / (k-1) P

Fig 2 Désignation des contraintes avec les hypothèses du paragraphe 2.
- Triangle supérieur hypothèse haute.
- Triangle inférieur hypothèse basse.





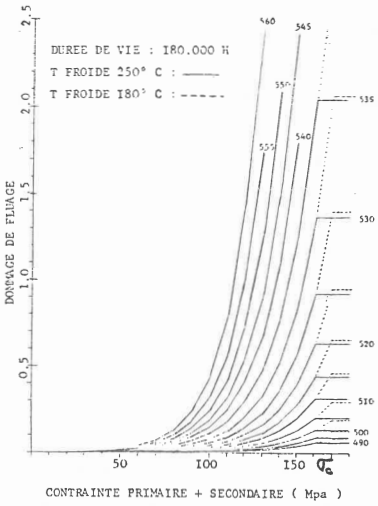


Fig. 3 : Dommage de fluage

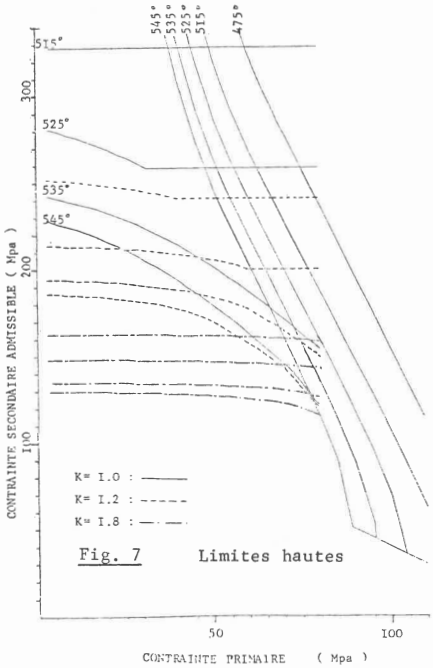


Fig. 7 Limites hautes

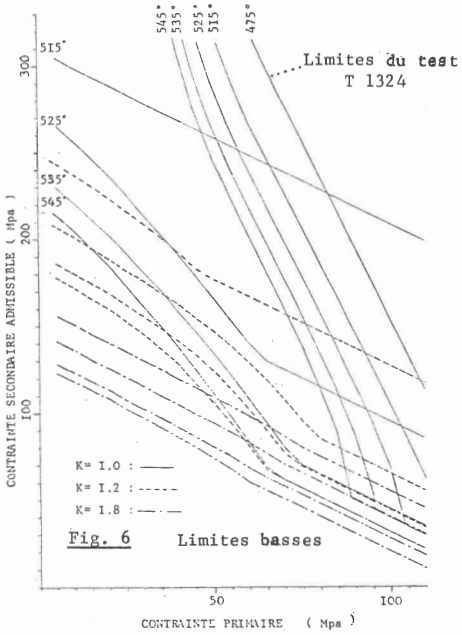


Fig. 6 Limites basses

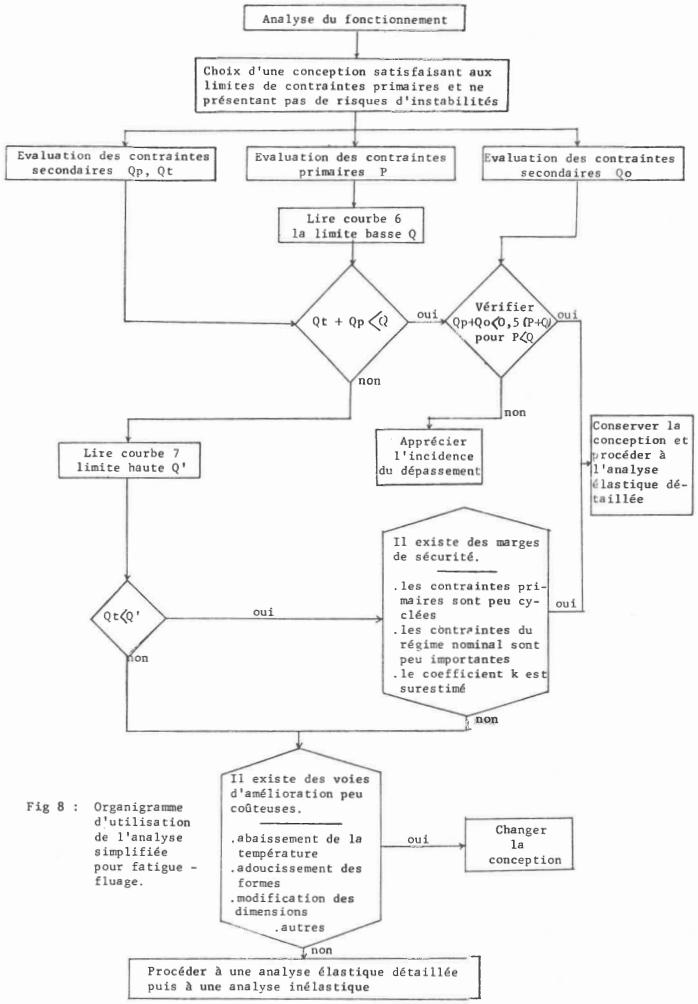
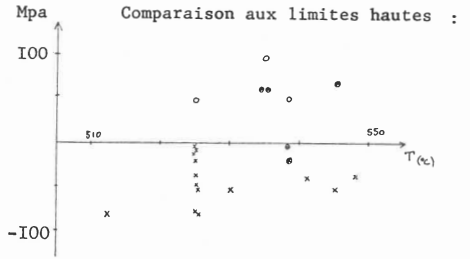
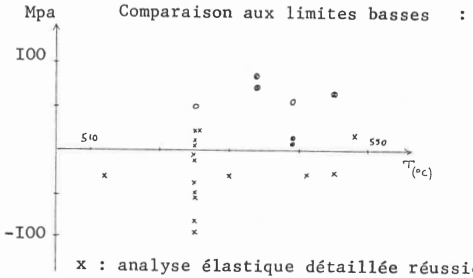


Fig 8 : Organigramme d'utilisation de l'analyse simplifiée pour fatigue - fluage.





x : analyse élastique détaillée réussie
o : l'analyse élastique détaillée a échoué la conception a été modifiée
■ : l'analyse élastique détaillée a échoué l'analyse inélastique a réussi

Fig. 9 : Comparaison analyse détaillée/analyse simplifiée