

FR8100457

CEA-N-2174

- Note CEA-N-2174 -

Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay  
Division d'Etude et de Développement des Réacteurs  
Département des Etudes Mécaniques et Thermiques

**DEFORMATION PROGRESSIVE OU EFFET DE ROCHET  
PROPOSITION D'UNE METHODE PRATIQUE D'ANALYSE BASEE  
SUR UNE ETUDE EXPERIMENTALE**

par

Pierre COUSSERAN, Jacques LEBEY, Roland ROCHE,  
Gérard CLEMENT, Didier MOULIN

- Décembre 1980 -

CEA-N-2174 - Pierre COUSSERAN, Jacques LEBEY, Roland ROCHE,  
Gérard CLEMENT, Didier MOULIN

DEFORMATION PROGRESSIVE OU EFFET DE ROCHET - PROPOSITION D'UNE  
METHODE PRATIQUE D'ANALYSE BASEE SUR UNE ETUDE EXPERIMENTALE

Sommaire.- La déformation progressive ou effet de rochet peut être considérée comme une accélération de la déformation de fluage quand on ajoute des déformations cycliques à un chargement primaire constant. Après examen, il apparaît que les modèles théoriques proposés jusqu'ici ne semblent pas représenter correctement le comportement réel des matériaux. A partir des résultats expérimentaux obtenus à Saclay, une méthode pratique de prévention de l'effet de rochet est proposée. La validation de cette méthode est faite à partir d'une revue des données expérimentales sur la déformation progressive existantes dans la littérature.

1980

23 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

CEA-N-2174 - Pierre COUSSERAN, Jacques LEBEY, Roland ROCHE,  
Gérard CLEMENT, Didier MOULIN

INCREMENTAL ELONGATION OR RATCHETTING - EXPERIMENTAL TESTS AND  
PRACTICAL METHOD OF ANALYSIS

Summary.- Ratchetting, or incremental elongation can be considered as a creep enhancement when cyclic deformations are added to a primary constant load. Under examination, it appears that theoretical models proposed till now do not fit correctly the actual behavior of materials. From experimental tests results performed in Saclay, a simplified method for prevention of ratcheting is proposed. A validation was made by using experimental data from various sources.

1980

23 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

### Note CEA-N-2174

#### DESCRIPTION-MATIERE (*mots clefs extraits du thesaurus SIDON/INIS*)

*en français*

*en anglais*

ACIER INOXYDABLE 304 - L	STAINLESS STEEL - 304 L
ACIER INOXYDABLE 316 - L	STAINLESS STEEL - 316 L
FLUAGE	CREEP
ALLONGEMENT	ELONGATION
TORSION	TORSION
PLASTICITE	PLASTICITY
ECROUISSAGE	STRAIN HARDENING
DEFORMATIONS PAR CONTRAINTES	STRAINS
TEMPERATURES MOYENNES	MEDIUM TEMPERATURE
HAUTES TEMPERATURES	HIGH TEMPERATURE
CISAILLEMENT	SHEAR
PROPRIETE CONCERNANT LA TRACTION	TENSILE PROPERTIES

- Note CEA-N-2174 -

Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay  
Division d'Etude et de Développement des Réacteurs  
Département des Etudes Mécaniques et Thermiques

**DEFORMATION PROGRESSIVE OU EFFET DE ROCKET  
PROPOSITION D'UNE METHODE PRATIQUE D'ANALYSE BASEE  
SUR UNE ETUDE EXPERIMENTALE**

par

**Pierre COUSSERAN, Jacques LEBEY, Roland ROCHE,  
Gérard CLEMENT, Didier MOULIN**

## **SOMMAIRE**

- I — Introduction**
  - II — Travaux antérieurs - Considérations pratiques**
  - III — Description des essais réalisés à Saclay**
  - IV — Méthode de dépouillement de résultats expérimentaux**
  - V — Proposition de règle**
  - VI — Validation**
  - VII — Comparaison avec les règles codifiées**
  - VIII — Conclusions**
- Références**
- Planches**

“Beaucoup ne se doutent même pas qu’il existe une méthode expérimentale scientifique destinée à la recherche des lois inconnues et croient que l’expérimentation n’a pour but que de vérifier des théories établies”.

A. BLONDEL

## I. — INTRODUCTION

En l’absence de fluage et pour un comportement uniquement élastique et plastique la définition de la déformation progressive ou effet de rochet est aisée. Il y a déformation progressive si un incrément de déformation se manifeste à chaque cycle sous l’effet de sollicitations cycliques. Ce phénomène se distingue de l’adaptation où, après application de quelques cycles la structure conserve la même géométrie.

Lorsque le fluage entre en jeu et que par conséquent les phénomènes dépendent du temps, une aussi simple définition n’est plus adéquate.

Dans ce papier on appellera déformation progressive l’**accélération de la déformation sous charge contrôlée, provoquée par des déformations cycliques imposées**. Autrement dit, on se préoccupe de la majoration de la déformation par fluage lorsqu’il existe des déformations cycliques telles que des déformations thermiques.

Avec le développement des techniques modernes et en particulier des réacteurs à neutrons rapides, l’examen des conséquences d’un tel phénomène s’avère nécessaire en vue d’une conception sûre. Il existe donc un important besoin de règles de conception commodes, efficaces et sûres. En ce qui concerne la construction de réacteurs nucléaires, les codes de construction fournissent quelques indications [1, 2].

En l’absence de fluage, il est principalement visé l’obtention d’un comportement élastique (à quelques endroits près où la plasticité cyclique apparaît) nécessaire à la validité de l’analyse à la fatigue. Telle est l’intention de la règle dite des  $3 S_m$  contenue dans [1].

En effet, même si le sujet n’est pas du ressort de ce papier, il faut souligner que l’analyse à la fatigue, en l’état actuel des connaissances n’est possible que si la déformation progressive ne se produit pas. Si cette dernière se manifeste la résistance à la fatigue est notablement réduite.

Quant à la règle, proprement dite, située dans les prescriptions NB 3222-2 et NB 3222-3 dans [1] elle est justifiée dans les critères correspondants pour une déformation cyclique uniaxiale d’un matériau élastique et parfaitement plastique. Elle s’écrit alors  $|\Delta\sigma| < 2 R_e$ .

Il est aisé de montrer que s’il existe une contrainte permanente P dans la direction perpendiculaire, cette règle devrait s’écrire [3]  $|\Delta\sigma| < 2 R_e - P$ . Il en résulte évidemment que cette règle mérite un examen pour lequel les résultats présentés ci-après seront utiles (chapitre VII).

Aux températures plus élevées où le fluage ne saurait être négligé, différentes règles très conservatives et de domaine d’application très limité sont proposées [2].

Il est montré ici que la méthode proposée permet d’aboutir à une règle de conception conservative dont l’utilisation est à la fois plus large et plus commode que les règles existantes.

## II. — TRAVAUX ANTÉRIEURS - CONSIDÉRATIONS PRATIQUES

Les règles proposées dans les différents codes de construction résultent uniquement de travaux théoriques. Les premiers sur la question sont l’œuvre de Miller [4] et Hill [5]. Des développements notables sont dus à Edmunds et Beer [6] et surtout à Bree [7, 8] qui a établi un diagramme bien connu. Il faut citer aussi les travaux de Burgreen [9, 10, 11], de Townley [12] et de Zarka [13]. Plus adaptés au domaine du fluage sont les travaux de O’Donnell et Porowski [14]. Des revues d’ensemble peuvent être trouvées dans [15, 16, 17].

Cependant des efforts importants ont été faits dans le domaine expérimental. Kano [18], Corum [19], Moreton et Moffat [20] ont réalisé des essais de déformation progressive sur des structures. Des essais sur des éléments de structure, et des éprouvettes de formes variées ont été accomplis par Ainsworth [21], Conway [22], Ronay [23], Inoué [24], Anderson [25, 26], Udoguchi [27], Nozué [28], Boulais [29, 30], Uga [31, 32], Lebey [33, 34] et Cousseran [35].

A l'examen il a paru surprenant que ces nombreuses recherches expérimentales n'aient pas été exploitées pour la mise en place de règle de conception. Cette situation est d'autant plus fâcheuse que la plupart des travaux théoriques cités sont en fait, basés sur des modèles de comportement des matériaux très simplifiés tels que : absence d'écroutissage, écroutissage cinématique, etc. alors que l'expérience montre qu'aucun de ces modèles n'est capable de représenter les résultats expérimentaux [36].

Il apparaît que la consolidation cyclique n'est jamais prise en compte dans ces analyses alors que les modèles de consolidation plastique sont très éloignés du comportement réel des matériaux [37, 38].

Lorsque le fluage se manifeste la situation est plus grave encore. Si dans le domaine de la plasticité A. Phillips [37] montre qu'il n'y a pas d'interaction pour la modification de la surface de plasticité (c'est-à-dire que l'écroutissage obtenu dans une direction de contrainte n'entraîne par un écroutissage dans une autre direction (voir planche 1), dans le domaine du fluage un spécialiste comme Leckie [15] écrit que "dans le cas de déformation de fluage, la question d'une loi convenable pour des contraintes variables n'a pas encore été résolue et qu'il n'y a virtuellement pas d'information disponible sur l'effet que le fluage exerce sur la limite d'élasticité".

L'étude expérimentale de la déformation progressive a été menée à Saclay afin de fournir des données nécessaires à l'évaluation du phénomène. Ainsi une méthode de dépouillement générale, donc applicable à la plupart des essais de déformation progressive (géométries différentes, avec et sans fluage...) a pu être mise au point. Sa commodité a permis l'établissement d'une règle de conception d'utilisation aisée par le projeteur et tout aussi générale.

Il est donc intéressant de donner quelques indications sur le mode de dépouillement de résultats expérimentaux employé à cette occasion, ainsi que sur les conclusions qui ont pu en être tirées.

### III. — DESCRIPTION DES ESSAIS RÉALISÉS A SACLAY

Ces essais ont fait l'objet de notes exhaustives [29, 30, 33, 34, 35, 46]. Il ne sera donné ici qu'un aperçu des points importants.

Les essais de déformation progressive ont été réalisés sur des éprouvettes tubulaires de faible épaisseur (diamètre extérieur 11 mm, épaisseur 0,5 mm, longueur 300 mm) soumises à une contrainte de traction constante en même temps qu'à une déformation en torsion, cyclique (planche 2).

Les matériaux essayés sont des aciers austénitiques 304L et 316L. Ces essais furent conduits à la température ambiante et à 300 °C.

A propos de l'acier 316L, il a été noté un fluage non négligeable à la température ambiante.

Dans un premier temps il a été déterminé, expérimentalement, les caractéristiques mécaniques de ces deux aciers aux températures concernées. Elles sont en effet utilisées pour l'application de la méthode (courbes de traction instantanées, courbe de fluage).

Ensuite les éprouvettes sont soumises chacune à un chargement combiné (P,  $\Delta Q$ ) donné, les valeurs mesurées sont les augmentations d'allongement par cycle  $\Delta \epsilon$  et l'allongement cumulé en fonction du nombre de cycles de chargement secondaire ( $\Delta Q$ ) appliqués (planche 3).

Les différents couples de chargement (P,  $\Delta Q$ ) ont été choisis de façon à couvrir le plus grand domaine possible du champ contrainte primaire P - variation de contrainte secondaire  $\Delta Q$ .

#### IV. — MÉTHODE DE DÉPOUILLEMENT DE RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Dans le cas des essais réalisés à Saclay il est facile de distinguer la contrainte de traction **primaire** (contrainte due à une charge imposée dans ce cas) et la contrainte de torsion **secondaire** (contrainte due à une déformation imposée).

La contrainte primaire a pour intensité :

$$p = \frac{\text{charge de la traction}}{\text{aire de la section}}$$

Selon le critère de Tresca l'amplitude de la variation de la contrainte secondaire est définie par :

$$\Delta Q = 2 G \Delta \gamma$$

G étant le module transversal d'élasticité  
 $\Delta \gamma$  la variation de distorsion.

Ces deux quantités P et  $\Delta Q$  définissent le chargement d'une éprouvette.

Ainsi pour chaque éprouvette, il a pu être mesuré l'allongement inélastique cumulé en fonction du nombre de cycles et de la durée de l'essai (l'essai commence à l'instant où la charge primaire constante est appliquée).

Une première présentation globale des résultats mesurés expérimentalement consiste en la construction d'un réseau de courbes d'isodéformation ( $\epsilon_p$ ) dans un plan défini par les deux types de contraintes P et  $\Delta Q$ , analogue à un diagramme de Bree. Un tel diagramme est reproduit dans la planche 4, sur lequel les valeurs P et  $\Delta Q$  sont rapportées à la limite élastique conventionnelle  $R_{e0,2}$  du matériau.

Il est essentiel de souligner que les résultats expérimentaux ainsi obtenus sont en contradiction formelle avec ceux découlant d'un calcul fondé sur un écrouissage cinématique bilinéaire. La planche 5 tirée de [39] montre le réseau de courbes qui aurait été obtenu avec ce modèle. Le lecteur peut juger de la différence. En outre un tel type d'écrouissage entraîne le retour (raccourcissement) en cas de décharge [38]; l'expérience exclut ce phénomène (planche 6).

Il a paru judicieux de traduire cet allongement en termes de contrainte, grâce à l'introduction d'une contrainte primaire efficace  $P_{eff}$  qui peut être définie de la façon suivante :

- (i)  $P_{eff}$  est une contrainte primaire
- (ii)  $P_{eff}$  est appliquée seule, sans contrainte secondaire
- (iii) Dans ces conditions  $P_{eff}$  produit la même déformation que celle due à l'action conjuguée de la contrainte primaire réelle P et de la contrainte secondaire  $\Delta Q$  au bout du temps correspondant à la durée de l'essai de déformation progressive.

Il apparaît donc ici, la nécessité de posséder, pour appliquer la méthode décrite, les caractéristiques mécaniques traduisant le comportement uniaxial des matériaux intéressés : courbes de traction instantanée et courbes de fluage.

A titre d'exemple un des essais de Saclay, l'essai n° 39 fournit les valeurs expérimentales suivantes :

$$P = 246 \text{ MPa}$$
$$\Delta Q = 310 \text{ MPa}$$

durée de l'essai  $t = 335$  heures  
déformation inélastique cumulée au bout de 335 heures  
 $\epsilon_p = 1,30 \%$

A l'aide des caractéristiques de traction instantanée et de fluage disponibles il peut être tracé le réseau de courbes de déformation totale (élastique + plastique + fluage) isochrones en fonction des contraintes uniaxiales appliquées concernant l'acier 316L constituant cette éprouvette.

A partir de la courbe de déformation totale isochrone correspondant à une durée d'application de la charge de 335 heures il est lu que l'allongement inélastique de 1,3 % est obtenu pour cette durée par une charge constante de 291 MPa. C'est la valeur de la contrainte primaire efficace  $P_{eff}$  correspondant à cet essai.

La contrainte primaire efficace ayant été définie, le dépouillement complet d'un essai se poursuit de la façon suivante :

- [i] La valeur de  $P_{eff}$  est notée.
- [ii] Calcul du taux de secondarité SR défini par

$$SR = \left( \frac{\Delta Q}{P + \Delta Q} \right)$$

- [iii] Calcul de l'index d'efficacité V

$$V = \left( \frac{P}{P_{eff}} \right)$$

- [iv] Inscription du point représentatif de l'essai dans le diagramme d'efficacité tracé dans le repère  $(SR)^2 - V$ .
- [v] Recommencer la procédure pour d'autres essais (voir planche 7).

Il faut cependant noter que le choix d'une telle contrainte primaire efficace pour caractériser le comportement d'une éprouvette au cours d'un essai de déformation progressive appelle certaines justifications (chapitre VI).

La proposition de règle présentée ci-après permettra de mieux en saisir la nécessité.

## V. — PROPOSITION DE RÈGLE

L'ensemble des données expérimentales fournies par les essais de Saclay a été reporté dans le plan  $SR^2-V$  (planche 7).

L'examen de la répartition des points représentatifs révèle que ceux-ci sont contenus dans une bande courbe relativement étroite. Il existe donc la possibilité de tracer une courbe inférieure à la totalité de ces points représentatifs (planche 8). Cette courbe en fait correspondrait à des points représentatifs pour lesquels à  $P$  et  $\Delta Q$  donnés, il est pris une contrainte primaire efficace  $P_{eff}$  supérieure à la contrainte primaire efficace réellement mesurée.

Cependant cette courbe enveloppe inférieure choisie pour les essais de Saclay ne convient pas nécessairement à d'autres configurations de géométrie ou de chargement concernant la déformation progressive. Ainsi il a été cherché à interpréter d'autres résultats à l'aide de cette méthode (chapitre VI) en vue d'une généralisation de la courbe pour en faire une courbe de conception pour la déformation progressive.

Néanmoins il peut être fait état dès maintenant de la règle qui découle du tracé de cette courbe.

En effet, elle est directement utilisable par l'analyste au moment de la conception des structures dans un calcul prenant en compte le risque de déformation progressive avec et sans fluage en procédant de la façon suivante :

Le chargement d'une structure se ramène à la combinaison d'une contrainte primaire  $P$  et d'une déformation cyclique correspondant à une variation de contrainte secondaire  $\Delta Q$ .

- [i] Calcul du carré du taux de secondarité  $SR^2 = \left( \frac{\Delta Q}{P + \Delta Q} \right)^2$

- [ii] Détermination de l'index d'efficacité V à l'aide de la courbe de conception tracée sur la planche 8.

- [iii] Calcul de la contrainte primaire efficace

$$P_{eff} = \frac{P}{V}$$

$P_{eff}$  étant ainsi déterminée, toutes les contraintes admissibles concernant les contraintes primaires doivent être appliquées à  $P_{eff}$  au lieu de  $P$ .



Par exemple si l'analyse s'intéresse à la contrainte primaire générale de membrane  $P_m$ . La contrainte primaire générale efficace  $P_{eff\ m}$  est calculée d'après la méthode décrite ci-dessus.

$P_{eff\ m}$  ne devra pas dépasser pour les critères de niveau A et B la limite de  $S_{m\ t}$  soit

$$[iv] P_{eff\ m} \leq S_{m\ t}$$

$S_{m\ t}$  est déterminée pour la durée d'application du chargement.

Ainsi les vérifications concernant la contrainte primaire doivent être appliquées à  $P_{eff}$  à la place de  $P$ . Attendu que  $S_t$  limite la déformation à une valeur de 1 % au cours de l'application du chargement, cette méthode constitue une règle de limitation de la déformation de membrane à 1 %.

## VI. — VALIDATION

### VI.1. Validation de la notion de contrainte primaire efficace.

Il faut noter que l'emploi de la notion d'une contrainte primaire efficace pour caractériser le comportement d'une éprouvette en déformation progressive est justifié lorsque le nombre de cycles est au moins égal à quelques dizaines.

En effet les essais montrent que dans tous les cas la déformation progressive tend à se stabiliser lorsque le nombre de cycles augmente (l'incrément de déformation par cycle tend vers zéro).

De plus, dans de nombreux cas pour des nombres de cycles plus faibles, la méthode reste valable puisqu'elle fournit une évaluation conservatrice de la déformation. Les déformations mesurées pour des fréquences de déformation de torsion différentes allant de 3 à 68 cycles par heure (essai n° 41 - 42 - 43) sont montrées dans la planche 9. On peut voir que l'effet de la fréquence devient négligeable au bout de 5 à 10 heures. Pour les essais représentés dans cette planche la déformation au bout de 100 heures est égale à 3 %. D'après les courbes de fluage déterminées à la température ambiante il peut être estimé que cette valeur serait atteinte par une contrainte constante égale à 330 MPa conformément à la méthode de détermination de  $P_{eff}$  décrite ci-dessus, appliquée à ce cas. La courbe de fluage correspondant à une contrainte constante de 330 MPa a été ajoutée sur ce diagramme. Elle s'ajuste relativement bien aux autres courbes correspondant aux essais de déformation progressive, ceci d'autant mieux que la fréquence est grande.

### VI.2. Validation de la généralité de la courbe choisie.

Des données expérimentales nombreuses et variées publiées dans la littérature ont été appréhendées par cette méthode en vue de validation de la courbe de conception proposée.

Le dépouillement de telles données a été fait dans [40, 41, 42, 43]. L'ensemble de ces résultats a été réuni dans le diagramme de la planche 10 et du tableau 1 correspondant.

Il apparaît que la courbe choisie est bien une enveloppe inférieure des points expérimentaux.

Une attention particulière peut être accordée à l'essai TT1 [40]. A la fin du 3<sup>e</sup> cycle, la déformation progressive est égale à 0,207 % pour 504 h. Dans ce cas la contrainte primaire efficace a été évaluée égale à 67,8 MPa. A la fin du 13<sup>e</sup> cycle la déformation (0,338 %) au bout de 2 184 h on peut évaluer une contrainte primaire efficace de 72,88 MPa. Ces deux valeurs sont peu différentes entre elles mais sont beaucoup plus différentes de la contrainte primaire qui dans ce cas était évaluée égale à 52 MPa. De plus, il est vérifié que même si la contrainte primaire efficace mesurée croît du 3<sup>e</sup> au 13<sup>e</sup> cycle, elle fournit néanmoins une valeur nettement conservatrice de la déformation cumulée.

## VII. — COMPARAISON AVEC LES RÈGLES CODIFIÉES

Il a été vu précédemment que certaines règles existaient déjà et servaient à évaluer le comportement en déformation progressive d'une structure à dimensionner. Les résultats expérimentaux dépouillés ainsi que la méthode générale présentée ici vont permettre la comparaison de ces différentes règles : domaine d'application, dommages visés, cohérence avec les autres règles.

### VII. 1. La règle dite des $3 S_m$ :

L'écriture de la règle [1] porte sur les variations de la somme de la contrainte primaire plus la contrainte secondaire.

$$\text{Maximum Range (P + Q)} \leq 3 S_m.$$

Il est envisagé ici d'évaluer, par rapport à l'expérience, l'applicabilité de cette inéquation si on considère que sa satisfaction permet de se garantir contre la déformation progressive.

Il faut tout d'abord remarquer que les instants de référence pour calculer les variations des intensités de contrainte mériteraient d'être spécifiés.

En effet, dans le cas d'un appareil à pression si il est regardé l'histoire du chargement depuis sa réalisation (appareil vide), il est obtenu :

$\text{Max (Range (P + Q))} = P_{\text{Max}} + \text{Max Range Q}$  puisque la contrainte primaire due à la pression est nulle quand l'appareil est vide.

Mais dans le cas d'un élément la structure où la contrainte primaire est due au poids de celui-ci, il serait alors obtenu :

$$\text{Max (Range (P + Q))} = \text{Max Range Q}.$$

On aurait alors la règle suivante :

$$\text{Max (Range Q)} < 3 S_m$$

qui est alors inacceptable puisqu'elle conduit à négliger l'influence de la contrainte primaire quand elle est due au poids, alors que l'expérience montre le rôle essentiel de celui-ci dans le processus de déformation progressive ainsi que l'indique par exemple les résultats des éprouvettes n° 37 et 38 :

n° éprouvette	$\frac{\Delta Q}{Re}$	$\frac{P}{Re}$	$\epsilon_p$ cumulé %	acier	température	référence
37	1	1	4,05	316L	20 °C	[35]
38	1	1	4,75	316L	20 °C	[35]

Aussi devrait-on conseiller dans ce cas l'écriture plus générale :

$$\text{Maximum (P + Q Range)} < 3 S_m.$$

C'est sur cette écriture qu'une comparaison supplémentaire peut être faite.

Pour ce faire il est besoin d'utiliser la règle de limitation sur les contraintes primaires qui est à vérifier dans tout calcul de conception soit

$$\text{Maximum P} < S_m.$$

Si ces deux règles visent une même marge de sécurité, il doit y avoir équivalence entre les deux. En conséquence la règle dite des  $3 S_m$  doit pouvoir s'écrire  $P_{\text{eff}} < S_m$  ce qui fournit la valeur de  $P_{\text{eff}}$  :

$$P_{\text{eff}} \geq \frac{P + \Delta Q}{3} \text{ soit la valeur limite } P_{\text{eff}} = \frac{P + \Delta Q}{3}$$

De plus l'inégalité  $P_{eff} \geq P$  est toujours vraie d'où dans le diagramme d'efficacité de repère  $V - SR^2$  l'équation de la "courbe d'adaptation" équivalente à la règle des "3  $S_m$ " :

$$V = 3(1 - SR)$$

avec  $V \leq 1$

ce qui signifie que dans le diagramme tous les points représentatifs du chargement d'une structure situés au-dessous de la courbe d'équation donnée ci-dessus sont des points où l'adaptation est assurée d'après cette règle.

Cette courbe a été tracée dans le diagramme de la planche 11 en comparaison du diagramme d'efficacité.

On peut voir que sans être mauvaise cette règle est approximative et n'assure pas totalement le pessimisme nécessaire pour les faibles valeurs de  $SR^2$  (c'est-à-dire  $\Delta Q$ ).

Cette règle étant écrite pour les conditions de fonctionnement où la température est inférieure à 427 °C où les effets du fluage sont considérés comme négligeables, les points expérimentaux indiqués dans ce diagramme ont été triés en conséquence.

### VII. 2. La méthode O'Donnel et Porowski.

Une comparaison analogue à la précédente peut être faite.

Tout d'abord il faut préciser que les conditions d'application de cette méthode sont assez restrictives.

Ces auteurs ont établi un diagramme contenu dans [2] qui peut être regardé comme l'extension du diagramme de Bree aux températures où le fluage peut intervenir.

La méthode est basée sur le raisonnement suivant : [44] si la partie médiane contenue dans l'épaisseur d'une structure reste élastique il ne peut y avoir déformation progressive par fluage.

Elle est limitée aux structures axisymétriques soumises à des chargements axisymétriques. Elle est limitée au cas où la valeur maximale de la variation de la contrainte secondaire se situe à un instant où la température moyenne dans l'épaisseur de la structure n'introduit pas de fluage. Cette température limite est celle où  $S_m = S_{m1}$  pour  $10^5$  heures pour le matériau utilisé.

Outre ces considérations sur les bases théoriques de la méthode, sa présentation sous forme de diagramme en limite l'utilisation pour des chargements où  $\frac{\Delta Q}{Re}$  est inférieur à 4 et où  $\sigma_c$  "effective stress" est inférieure à  $Re$ .

La comparaison de la méthode présente avec la méthode O'Donnel et Porowski peut cependant être faite. Il est aisé de remarquer que  $\sigma_c$  et  $P_{eff}$  joue le même rôle dans chacune des deux méthodes. Ainsi il a été possible de tracer le réseau de courbes correspondant aux différentes valeurs de  $Z = \frac{\sigma_c}{Re}$  dans le diagramme d'efficacité (planche 12).

Pour faire la comparaison, il suffit de dire que la courbe de la méthode proposée est une enveloppe inférieure de ce réseau de courbes sauf pour la courbe  $Z = 1$  dans la partie où  $SR^2$  est inférieure à 0,5.

Le conservatisme d'une méthode par rapport à l'autre ne peut être évalué sans comparer les courbes isochrones de conception choisies pour appliquer chacune des deux règles.

A l'examen de la planche 12 on peut conclure que les deux méthodes sont assez voisines. Le diagramme d'efficacité permet cependant à  $P_{eff}$  d'atteindre des valeurs supérieures à  $Re$  ce qui permet donc une utilisation plus étendue.

### VII. 3. Diagramme de Bree

Dans un tel diagramme le matériau a un comportement élastique parfaitement plastique. Ainsi une contrainte primaire appliquée à un tel matériau entraîne seulement deux comportements possibles : si la valeur de cette contrainte est inférieure à la limite d'élasticité il n'y a pas de déformation plastique, si au contraire elle est égale à la limite d'élasticité la déformation plastique peut atteindre n'importe quelle valeur.

On retrouve le même type de distinction dans un diagramme de Bree : dans une certaine région il n'y a pas de déformation progressive, dans une autre séparée de la première par une courbe, la déformation plastique peut atteindre n'importe quelle valeur dépendant du nombre de cycles appliqués. C'est cette courbe limitant ces deux zones, qui peut être regardée comme équivalente à une contrainte primaire efficace égale à la limite d'élasticité du matériau qui est tracée dans la planche 13. Elle est en effet définie par les deux équations :

$$\text{pour } V \leq 0,5 \quad SR^2 = \left( \frac{1}{1 + V^2} \right)^2$$

$$\text{pour } V \geq 0,5 \quad SR^2 = \left( \frac{1 - V}{1 - 0,75 V} \right)^2$$

La courbe de conception proposée est alors directement comparable à la courbe de Bree.

Il peut être vu que pour  $V \leq 0,5$  les deux courbes sont identiques. Pour  $V \geq 0,5$  la courbe proposée est plus restrictive.

Il peut être rappelé ici que la courbe de Bree tracée ici est identique à la courbe pour  $Z = 1$  dans un diagramme O'Donné et Porowski (planche 12).

### VIII. — CONCLUSIONS

D'après les résultats expérimentaux disponibles jusqu'à ce jour une règle de conception a pu être mise en place pour la prévention de la déformation progressive. Elle est basée sur la notion de contrainte primaire efficace.

A l'heure actuelle la courbe de conception choisie est très conservatrice et susceptible d'amélioration par l'analyse minutieuse d'un nombre accru de résultats expérimentaux.

Cette méthode de dépouillement et la règle en résultant fait partie d'une recommandation RAMSES [45]. A l'usage il apparaît que la principale difficulté réside dans le bon choix de la contrainte primaire, eu égard au risque d'un effet de ressort mais ce n'est pas le propos de ce papier.

Cette méthode peut certainement être améliorée par la prise en compte de caractéristiques du matériau telles que la limite d'élasticité (planche 9) mais il faudrait bien déterminer les caractéristiques significatives (qui risquent d'être les caractéristiques cycliques).

## RÉFÉRENCES

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code  
Section III The American Society of Mechanical  
Engineers ASME New York 1977
- [2] ASME Code Case N.47-15 (1592-15) "Class I Components in Elevated Temperature  
Service"  
ASME New York 1979
- [3] ROCHE R. "Déformation Progressive" Second Collège National sur les Appareils à  
Pression - Ass. Française des Ingénieurs en Appareils à Pression - Paris oct. 1977 - Pages  
297-341 - Vol. 2.
- [4] MILLER D.R. "Thermal Stress Ratchet Mechanism in Pressure Vessels" - Trans  
ASME Vol. 81 - Series DN°2 - 1059 - Pages 190-196
- [5] HILL R. "The Mathematical Theory of Plasticity" - Bending under Tension. Chap.  
IX-2 - Oxford University Press Oxford 1960 - Pages 292-293
- [6] EDMUNDS H.G. and BEER F.J. "Notes on Incremental Collapse in Pressure Ves-  
sels" Journal of Mech. Ens. Sciences. Vol. 3 - 1961, pages 187-199.
- [7] BREE J. "Elastic Plastic Behaviour of Thin Tubes Subjected to Internal Pressure and  
Intermittent High Heat Fluxes with Application to Fast Nuclear Reactor Fuel Elements"  
Journal of Strain Analysis - Vol. 2 - 1967 - Pages 226-238
- [8] BREE J. "Incremental Growth due to Creep and Plastic Yielding of Thin Tubes Sub-  
jected to Internal Pressure and Cyclic Thermal Stresses" Journal of Strain Analysis - Vol. 3  
- 1968 - Pages 122-127.
- [9] BURGREN D. "The Thermal Ratchet Mechanism" Journal Basic Engineering 90 -  
Sept. 1968 - Pages 319-324.
- [10] BURGREN D. "Structural Growth Induced by Thermal Cycling" Journal of Basic  
Engineering 90 - Déc. 1968 - Pages 469-475
- [11] BURGREN D. "Design Methods for Power Plants Structures" C.P. Press - New  
York 1975
- [12] TOWNLEY C. "The Application of Elastic-Plastic Analysis to the Design of Pres-  
sure Vessels" CEGB Report RD/B/N 1107 - 1968
- [13] ZARKA J. and all "A Practical method to determine Elastic or Plastic Shake down  
of Structures". "In Simplified Methods in Pressure Vessels Analysis" (Ed. Barsoum R.S.)  
ASME 1978
- [14] O'DONNELL W. and POROWSKI J. "Upper Bound for Accumulated Strains due to  
Creep Ratcheting" WRC Bulletin 195 June 1974 - Pages 57-62
- [15] LECKIE F. "A Review of Bounding Techniques in Shakedown and Ratcheting at  
Elevated Temperatures"  
(Part 2 - Ratcheting Effects in Absence of Creep) in WRC Bulletin 195 June 1974 - Pages 4-  
11
- [16] FINLEY G. and SPENCE J. "Applying the Shakedown concept to Pressure Vessels  
Design" Engineering - Vol. 226 - Juil. 1968 - Pages 63-65
- [17] KREMPL E. "Cyclic Creep. An interpretative Literature Survey" W.R.C. Bulletin  
195 June 1974 - Pages 63-123
- [18] KANO T. and INOUE T. "Design and Research Status for Thermal Transients in  
Japanese LMFBR Plants" PNC N.241 74.06 - Power React. and Nuc. Fuel. DEVE. Corp.  
Japan - June 1974

- [19] CORUM J.M. — YOUNG H.C. and GRINDELL A.G.  
 "Thermal Ratcheting in Pipes subjected to Intermittent Thermal Downshocks at Elevated Temperatures" Second Nat. Cong. on Press. Vessels and Piping.  
 San Francisco - California (ASME) June 1975, Pages 47-58
- [20] MORETON D.N. and MOFFAT D.G. "Shakedown of three Stainless Steel Pressure Vessel Components" Third Int. Conf. on Pressure Vessel Technology - Tokyo - Part 1.  
 April 1977 - Pages 233-245
- [21] AINSWORTH R.A. "An Experimental Study of a Three-Bars Structure subjected to Variable Temperature" Int. J. Mech. Sci. Vol. 19 - Pages 247-256
- [22] CONWAY J.B. - BERLING J.T. - STRENTZ R.H. - PUGH C.E. - ANDERSON W.F. "Thermal Ratcheting Studies of type 304 Stainless Steel. An Evaluation of a New Test Procedure"  
 Symposium on Struct. Mat. for Service at Elevated Temp. in nuclear Power Generation.  
 Houston ASME MPC1 - Nov. 1975 - Pages 247-281
- [23] RONAY M. "Interaction of Cyclic Torsion with Axial Loads" ASTM. STP 404  
 1966 — pages 176-189
- [24] INOUE K. - NAKAGAWA K. - FUJIYAMA M.  
 "Accumulation of Axial Strain of a Cylindrical Bar under Combined Cyclic Torsion and Axial Load" - Technology Reports Osaka University, Japar. 26 - March 1976 - Pages 223-231
- [25] ANDERSON W.F. "Creep Ratcheting Deformation and Rupture Damage induced by a Thermal Transient Stress Cycle Design for Elev. Temp. Env. ASME 1971 - pages 1-11
- [26] ANDERSON W.F. "Ratcheting Deformation as Affected by Relative Variation of the Loading Sequence" - Pressure Vessel Techn. Part 1 - Design and Analysis, 2nd Int. Conf. San Antonio Texas USA - ASME 1973 - Pages 277-289
- [27] UDOGUCHI T. - ASADA Y. - MITSUHASHI S. - ANDIZUSHI M.  
 "Accumulation of Longitudinal Strain under Cyclic Torsion" Fracture 1977 - Vol. 2 ICF4 - Waterloo - Canada - June 1977 - Pages 1195-1200
- [28] NOZUE Y. - UDOGUCHI T. - ASADA Y. - MITSUHASHI S.  
 "An Experimental Study on Cyclic Strain induced Creep, Relationship between Different Modes of Stress and Strain Superposition" Fracture 1977 - Vol. 2 - ICF4 - Waterloo - Canada - June 1977 - pages 767-775
- [29] BOULAIS J. - BROUARD D. - LEBEY J. et ROCHE R.  
 "Essais de déformation progressive de l'acier 304 L à température ambiante"  
 Note CEA-N-2058, Sept. 1978
- [30] BOULAIS J. - COUSSERAN P. - LEBEY J. et ROCHE R.  
 "Essais de déformation progressive de l'acier 304 L à température ambiante"  
 Complément à la note CEA-N-2058 - Note CEA-N-2083 mars 1979
- [31] UGA T. "An experimental Study of Progressive Strain Growth due to Thermal-Stress Ratcheting" Transactions of the ASME Vol. 100 - April 1978 - Pages 150-156
- [32] UGA T. "An experimental Study on Thermal Stress Ratcheting on Austenitic Stainless Steel by a three bars Specimen" Nuclear Engineering and Design 26 1974 - Pages 326-335
- [33] LEBEY J. and ROCHE R. "Tests on Mechanical Behaviour of 304 L Stainless Steel under constant Stress associated with Cyclic Strain - Fatigue of Eng. Mat. and Struc. Vol. 1 n° 3 - May 1979 - Pages 307-318
- [34] LEBEY J. - ROCHE R. and COUSSERAN P.  
 "Experimental Tests on Ratchet of Tubular Specimens (Torsion and Torsion). Use for Material Characterization" 5th. Conf. SMIRT - Berlin - Vol. L 5/3 - Aug. 1979 - Pages 1-8
- [35] COUSSERAN P. - LEBEY J. - ROCHE R. - CORBEL P.  
 "Essais de déformation progressive de l'acier inoxydable 316 L à température ambiante" - Note CEA à paraître.

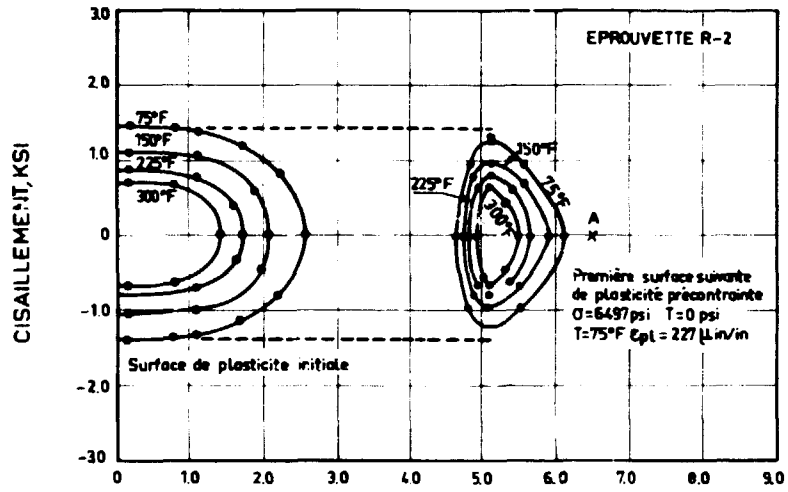
- [36] HANCELL P.J. and HARVEY S.J.  
 "The use of Kinematic Hardening Models in Multi-Axial Cyclic Plasticity" Fatigue of Eng. Mat. and Struct. Vol. 1 - April 1979 - Pages 271-279
- [37] PHILLIPS A. "Experimental Plasticity - Some Thoughts on its present Status and possible future trends" in Problems of Plasticity - Ed. A. Sawczyk - Nordhof Int. Publ. Leyden - 1974
- [38] GREENSTREET W.L. "Structural Analysis Technology for High Temperature Design" L 3/2 in TR. of 3rd Int. Conf. on Smirt Ed. J. Jaeger North Holland Pub. Cy - Amsterdam - 1975
- [39] ROCHE R. "Brèves Considérations Analytiques sur un Cas de Déformation Progressive (Traction et Torsion Cyclique)" Note CEA-N-2038 - CEN Saclay - Juin 1978
- [40] MOULIN D. "Vérification de la Méthode CEA-DEMT pour l'évaluation de la Déformation Progressive - Application à l'essai TT1 réalisé au Oak-Ridge National Laboratory" - Note CEA à paraître
- [41] MOULIN D. "Analyse de la déformation Progressive - Validation de la méthode CEA-DEMT basée sur la contrainte primaire efficace - Dépouillement des essais d'Anderson" - Note CEA à paraître
- [42] THOMAS P. "Déformation progressive - Utilisation des résultats expérimentaux (essais réalisés par T. Uga)" - Note CEA à paraître.
- [43] CLÉMENT G. "Revue de résultats expérimentaux concernant la déformation progressive" - Note CEA à paraître
- [44] O'DONNELL W.J. - POROWSKI J.S.  
 "Upperbounds for accumulated strains due to creep ratchetting", ASME Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 96 - Page 150-154 (1974)
- [45] JAKUBOWICZ H. - PETREQUIN P. - SCHALLER K  
 "Rules for the Analysis of Mechanical Structures at Elevated Temperatures" - 5th Int. Conf. SMIRT - Berlin - Vol. L 5/3 - Aug. 1979 - Pages 1-7
- [46] COUSSERAN P. et al.  
 "Essai de déformation progressive de l'acier inoxydable 316 à 350 °C" - Note CEA à paraître

## LISTE DES PLANCHES

- Planche 1 Surfaces de plasticité initiale et suivante d'un aluminium pur pour traction et torsion combinées
- Planche 2 Schéma du montage d'essais
- Planche 3 Allongement par cycle et allongement cumulé en fonction du nombre de cycles
- Planche 4 Allongement plastique cumulé à  $N = 500$  cycles
- Planche 5 Allongement limite pour un matériau à écrouissage cinématique bilinéaire
- Planche 6 Comportement réelle du matériau en cas de décharge
- Planche 7 Résultats des essais du CEA
- Planche 8 Diagramme d'efficacité
- Planche 9 Effet de la fréquence et du temps de maintien
- Planche 10 Résultats des différents essais
- Planche 11 Comparaison avec la règle des 3 Sm
- Planche 12 Comparaison avec la méthode O'Donnell et Porowski
- Planche 13 Comparaison avec le diagramme de Bree

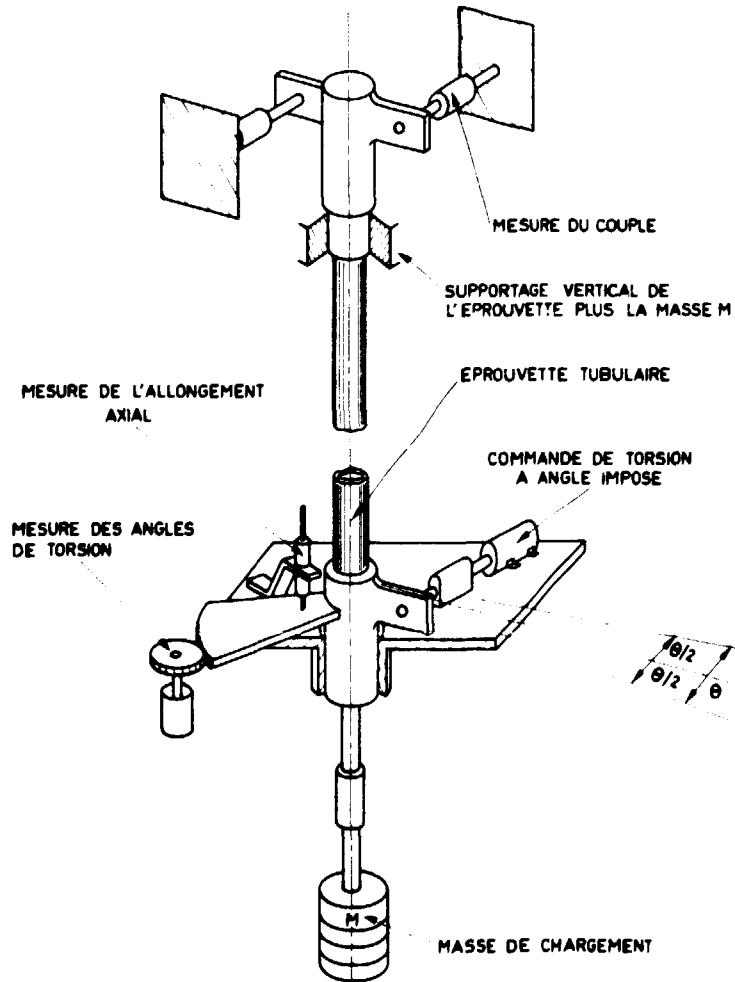
*Manuscrit reçu le 9 septembre 1980*

CONTRAINTE DE TENSION KSI



NOTA: 1 psi = 6,89 MPa  
 $1^{\circ}\text{C} = (1^{\circ}\text{F} - 32)5/9$

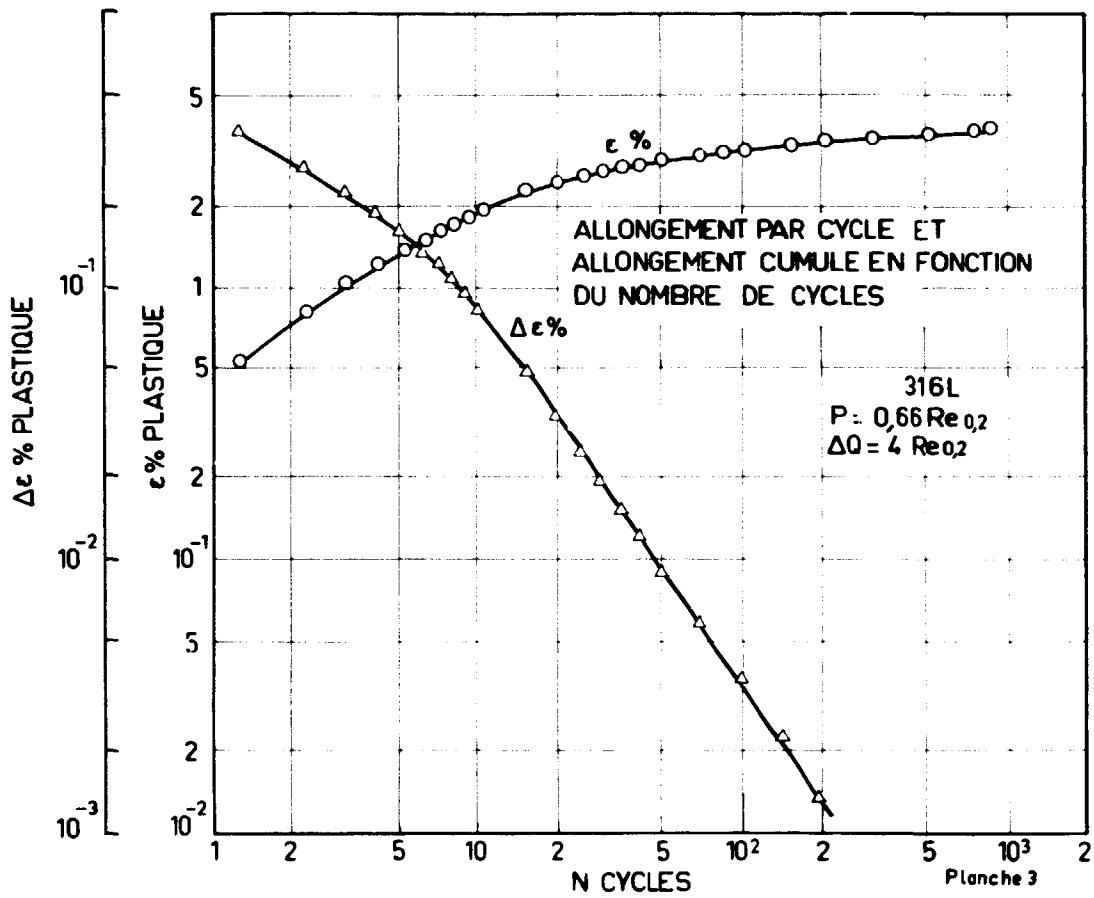
Planche 1



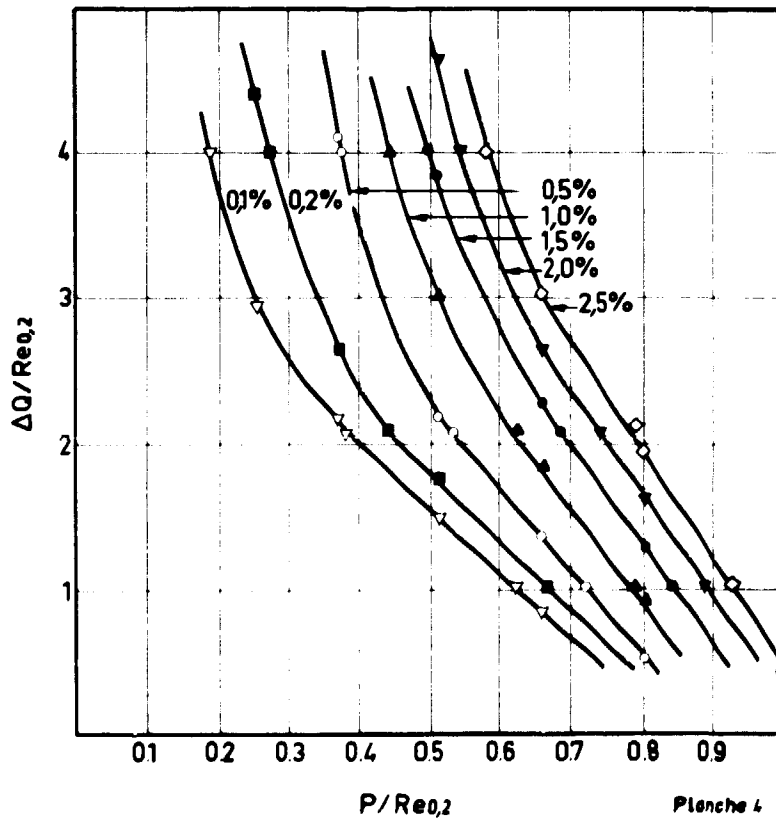
SCHEMA DU MONTAGE D'ESSAIS

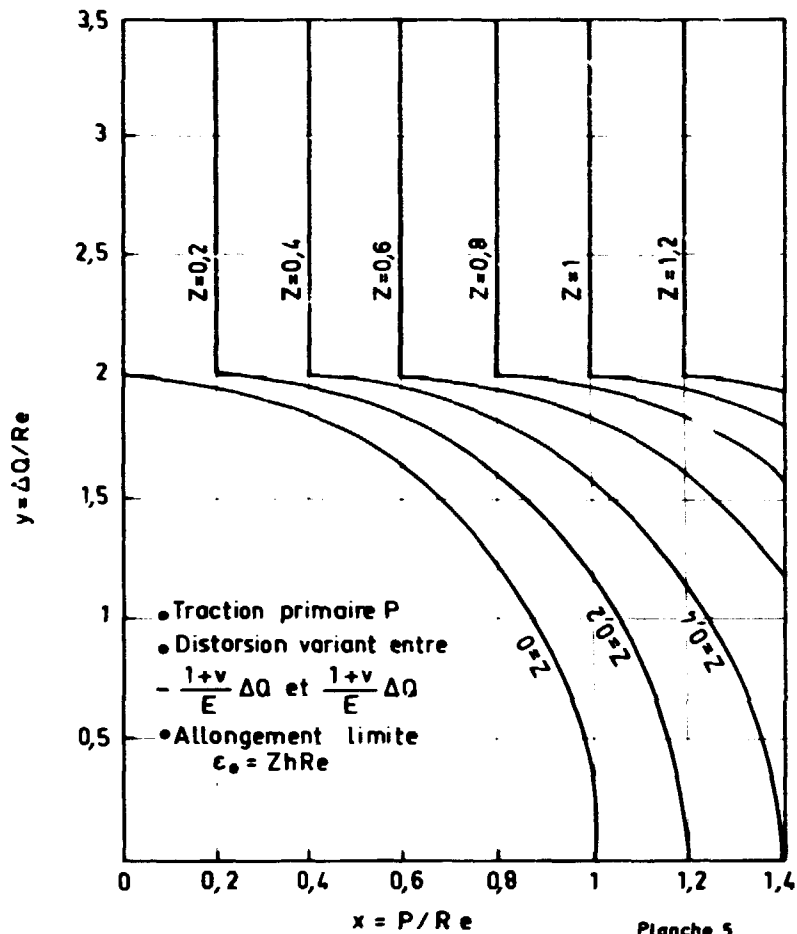
Planche 2





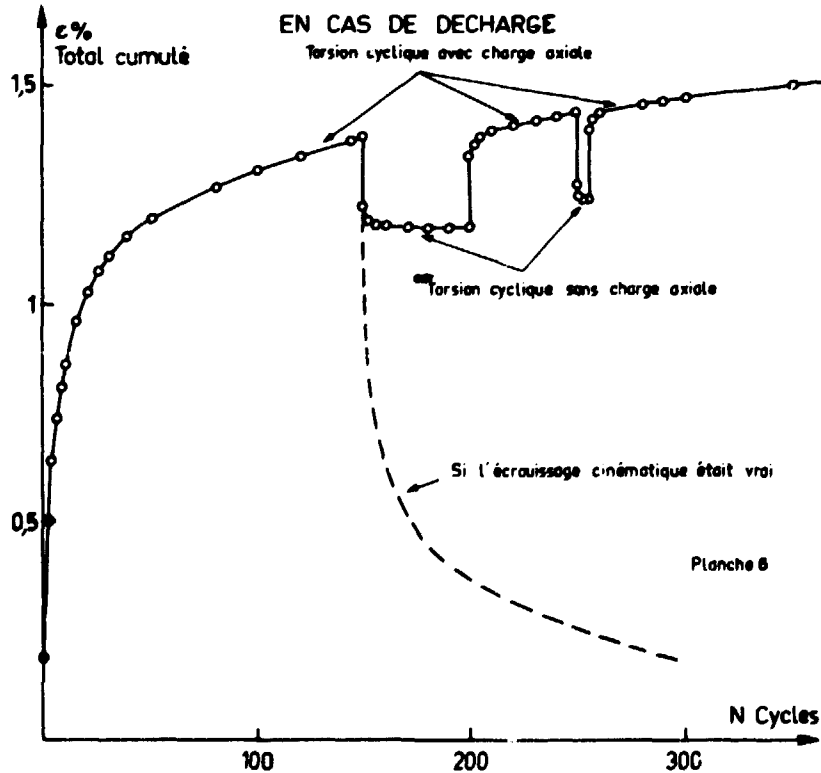
ALLONGEMENT PLASTIQUE CUMULE A 500 CYCLES





(Re = limite d'élasticité, h = module d'érouissage)  
 Allongement limite pour un matériau  
 à érouissage cinématique bilinéaire

COMPORTEMENT REEL D'UN MATERIAU



RESULTAT DES ESSAIS CEA  
Acier inoxydable 316L

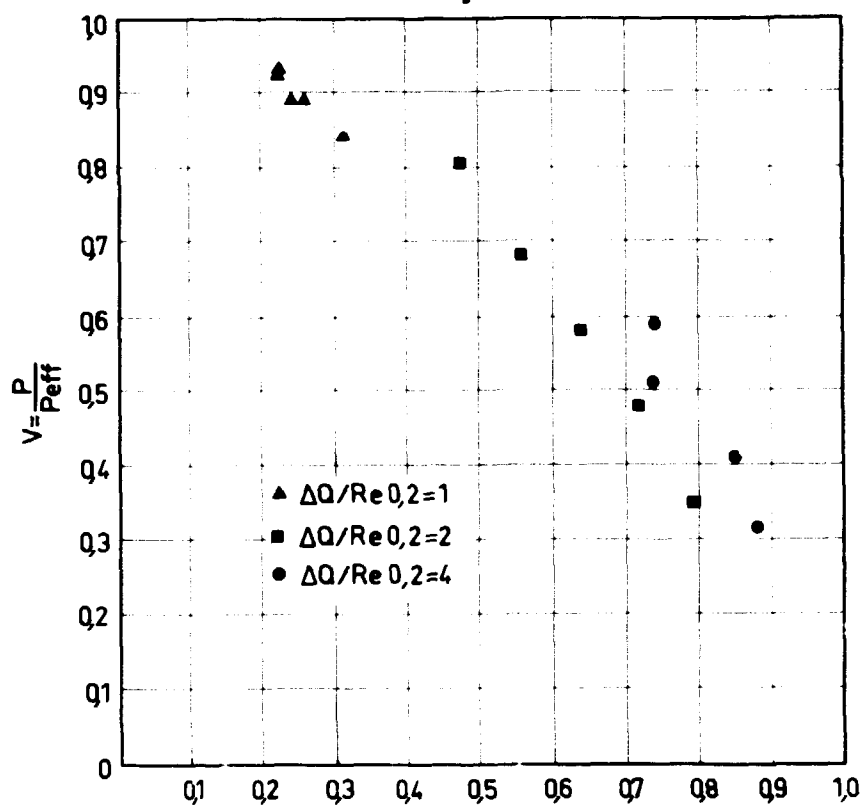


Planche 7

DIAGRAMME D'EFFICACITE

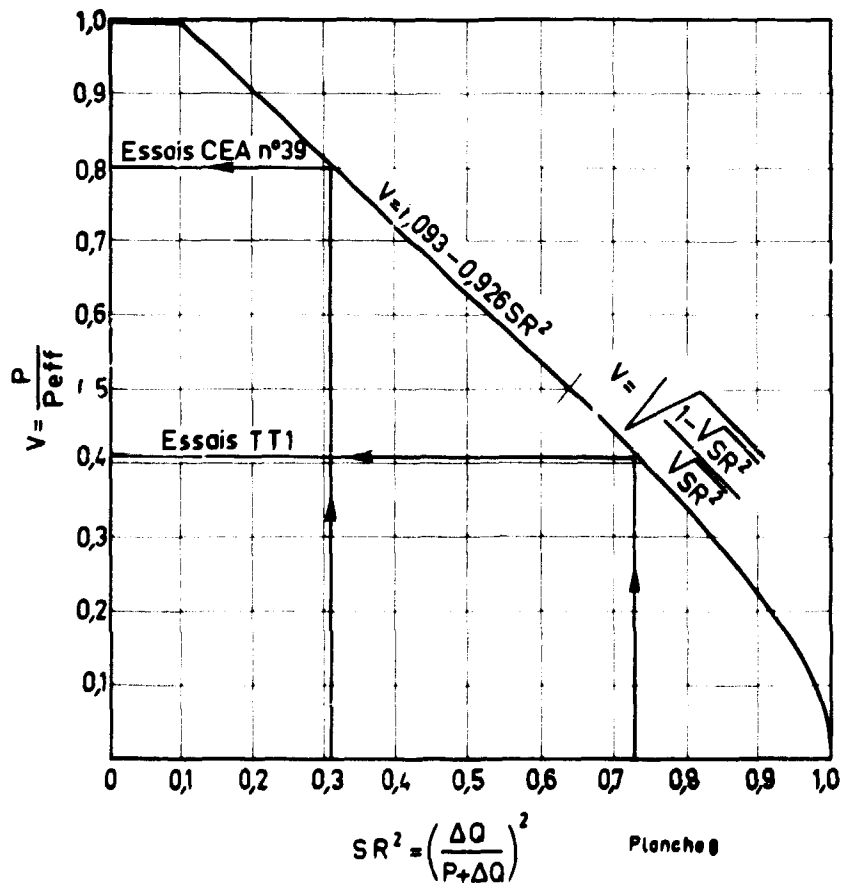
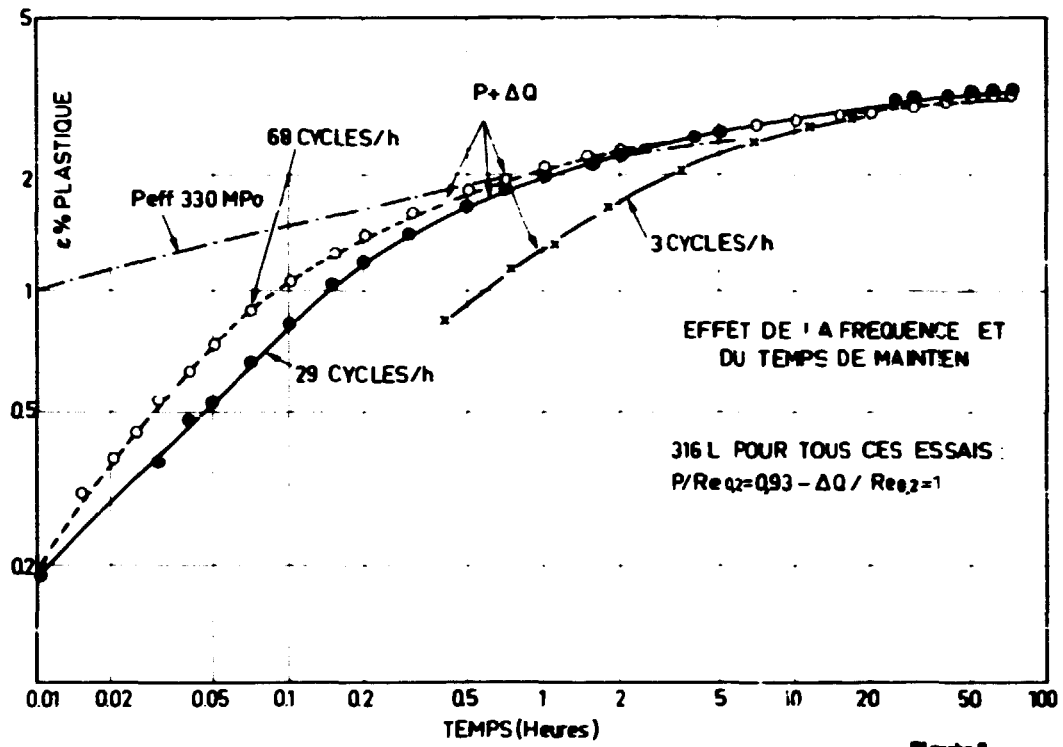
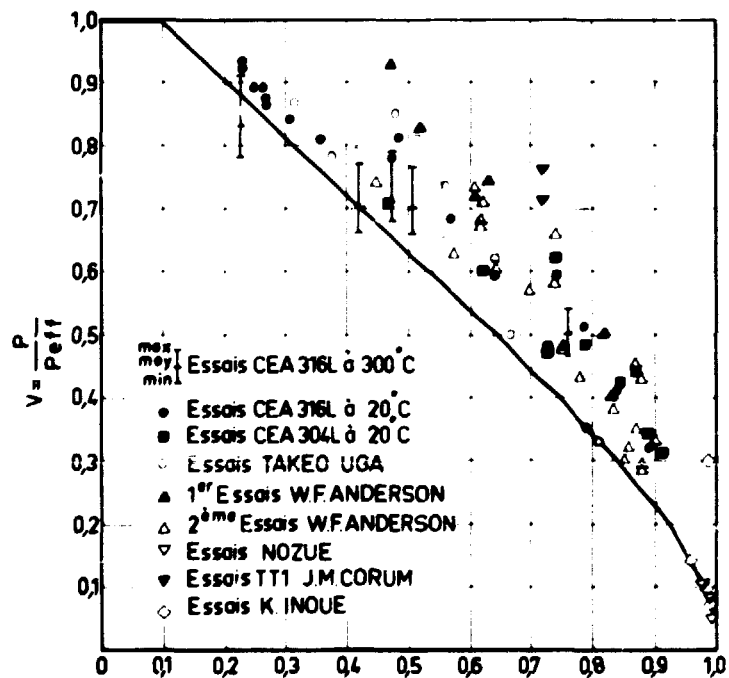


Planche 8



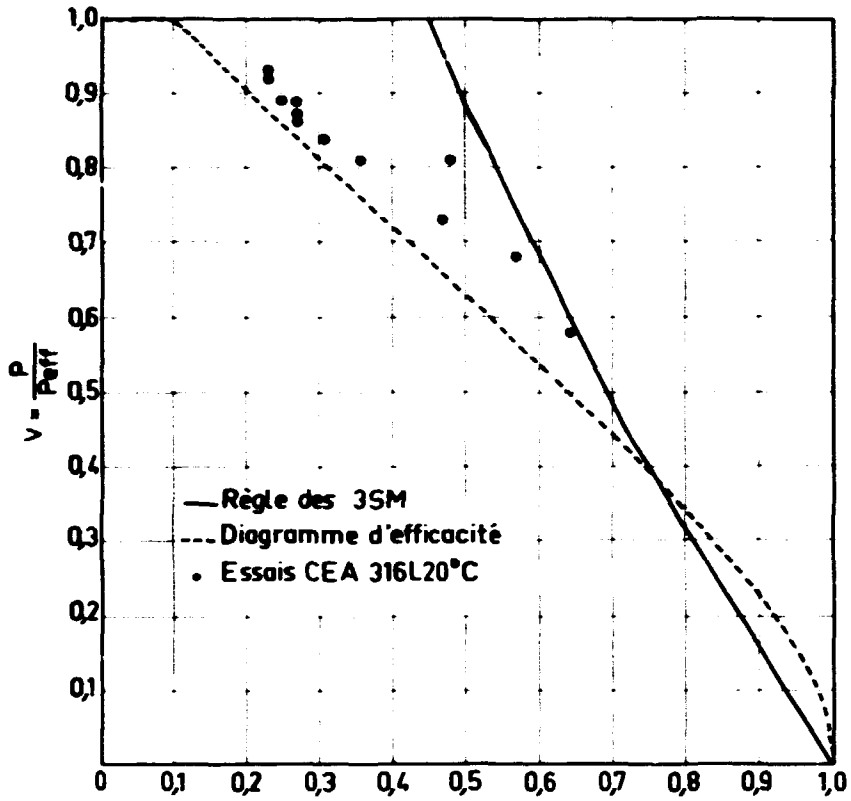
RESULTAT DES DIFFERENTS ESSAIS



$$SR^2 = \left( \frac{\Delta Q}{P + \Delta Q} \right)^2$$

Planche 10

COMPARAISON AVEC LA REGLE DES 3 Sm



$$SR^2 = \left(\frac{\Delta Q}{P + \Delta Q}\right)^2 \quad \text{Planche 11}$$

COMPARAISON AVEC LA METHODE O'DONNEL ET POROWSKI

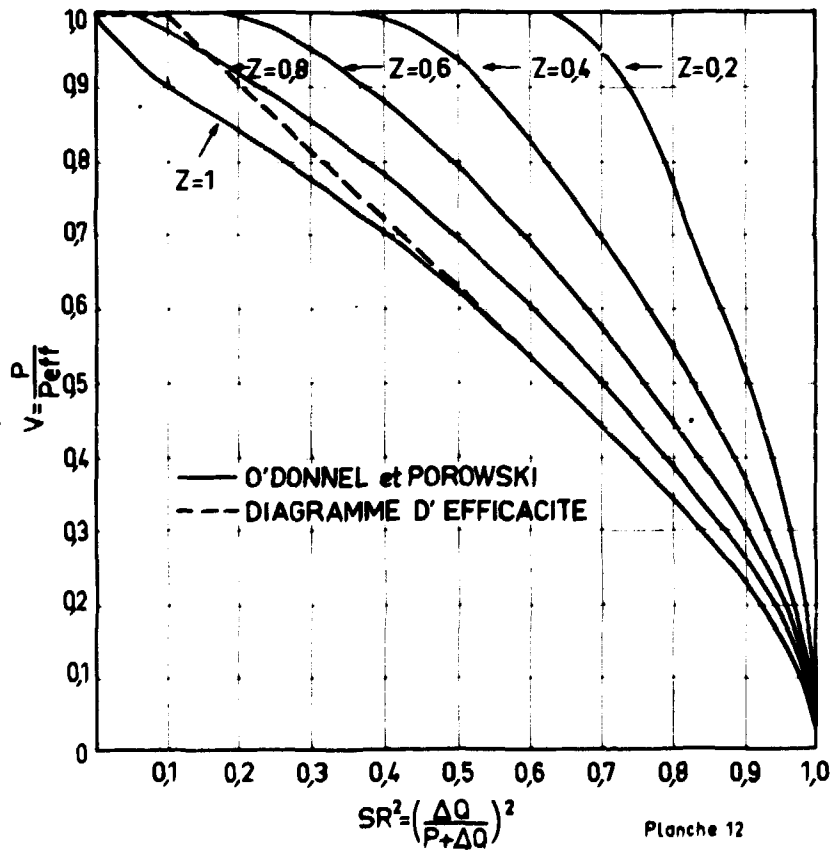
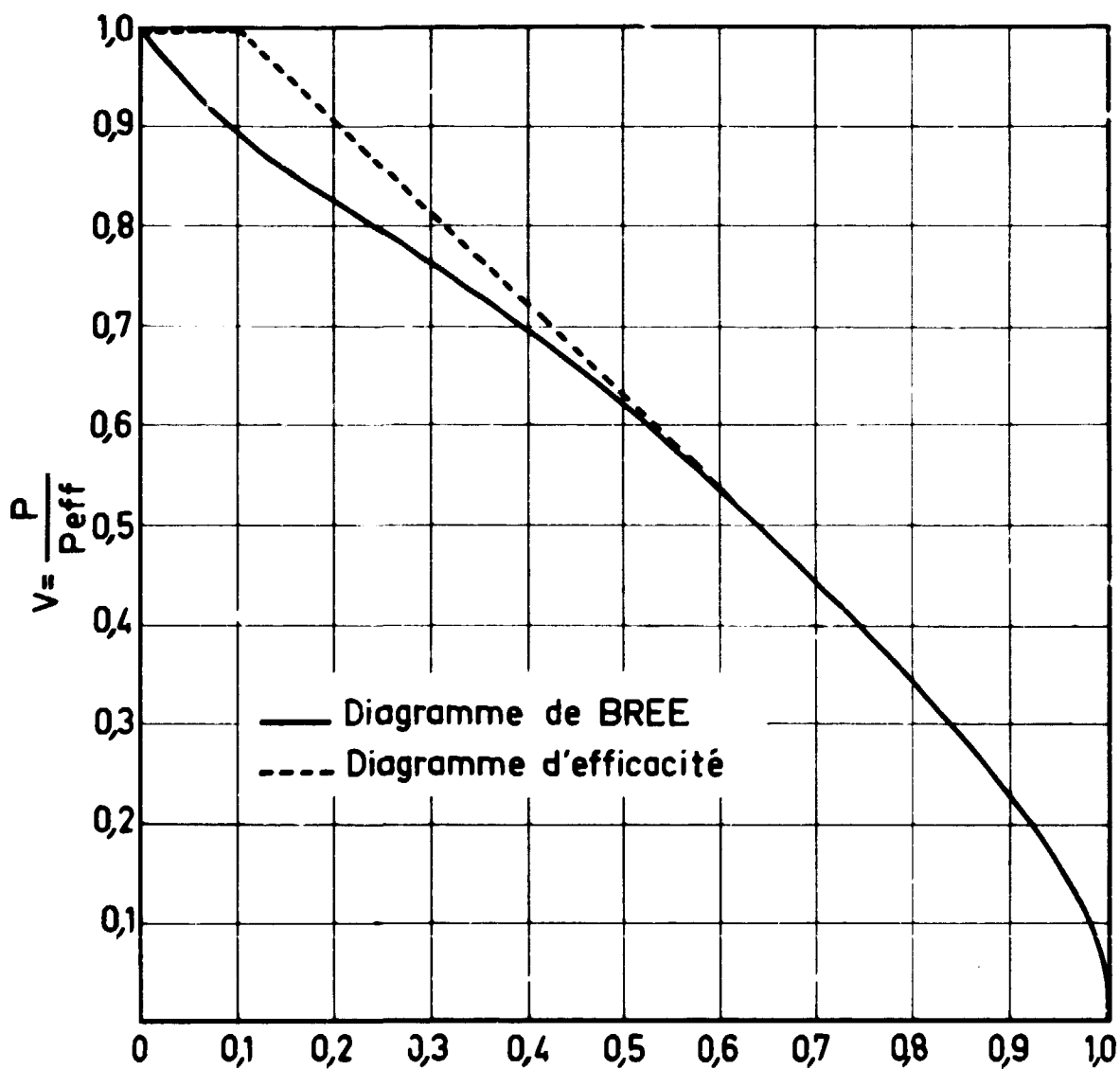


Planche 12

COMPARAISON AVEC LE DIAGRAMME DE BREE



$$SR^2 = \left( \frac{\Delta Q}{P + \Delta Q} \right)^2$$



*Edité par*  
*le Service de Documentation*  
*Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay*  
*Boîte Postale n° 2*  
*91190 - Gif-sur-YVETTE (France)*