

S.C.K./C.E.N.

Mol, le 7 juin 1993

LHMA

TEC93/53.A4200/22/JLP/fq

CELLULE CHAUDE POUR TESTS DE FATIGUE

J.L. PUZZOLANTE

J. VAN de VELDE

*Exposé présenté à la 32ième réunion plénière du groupe de travail
"Laboratoires Chauds et Télémanipulation" de la C.C.E. à
Chinon (France), juin 1993.*

STUDIECENTRUM VOOR KERNENERGIE/CENTRE D'ETUDE DE L'ENERGIE NUCLEAIRE
S.C.K./C.E.N.

LHMA

Boeretang, 200
B-2400 MOL (Belgium)

Tel. : -32-14/333000

Fax : -32-14/321216

TABLE DES MATIERES

1. Introduction
2. La cellule
3. Les machines
4. L'échantillon
5. L'extensométrie diamétrale
6. Technique d'essais
7. Les résultats
8. Références
9. Liste des figures

1. INTRODUCTION

L'objet des essais de fatigue est de déterminer le comportement d'ensembles mécaniques, de pièces ou d'éprouvettes, sous des sollicitations de contraintes périodiques, analogues à celles qui se produisent dans la pratique lors de sollicitations en service, comme par exemple lorsque des composants nucléaires sont soumis à des opérations cycliques et plus particulièrement pour les réacteurs à fusion thermonucléaire dont la première paroi du réacteur travaille dans un mode typiquement cyclique et où la fatigue thermique est de première importance pour les matériaux utilisés.

En plus de ces contraintes thermiques cycliques, les matériaux constituant la première paroi du réacteur reçoivent les plus hauts dommages d'irradiation tels que activation neutronique, déplacements atomiques et fragilisation par l'hélium.

Dans le cadre du programme européen sur la fusion thermonucléaire contrôlée, le CEN/SCK a pris part dans divers programmes d'irradiation de matériaux candidats à la première paroi du réacteur, de matériaux de recouvrement (Be,Mo) et dans les examens post-irradiatoires.

2. LA CELLULE

La cellule chaude pour l'exécution de ces examens post-irradiatoires (Fig. 1) est composée d'une boîte à gants étanche en acier inoxydable posée sur un socle en béton surélevé pour que l'aire de travail des deux machines de traction/fatigue soit au niveau de la fenêtre de la cellule. Trois télémanipulateurs permettent le travail sur les deux machines.

Le power-pack, ainsi que les deux sous-stations, ont été installés en sous-sol pour en limiter le bruit mais aussi pour des raisons d'encombrement.

La cellule a un blindage de 15 cm de plomb pour réduire au minimum la dose reçue par le personnel.

Une table de travail en acier inoxydable a été placée au niveau de la table de la machine, ceci pour faciliter le travail avec les télémanipulateurs. Toutes les connections électriques avec les machines ont

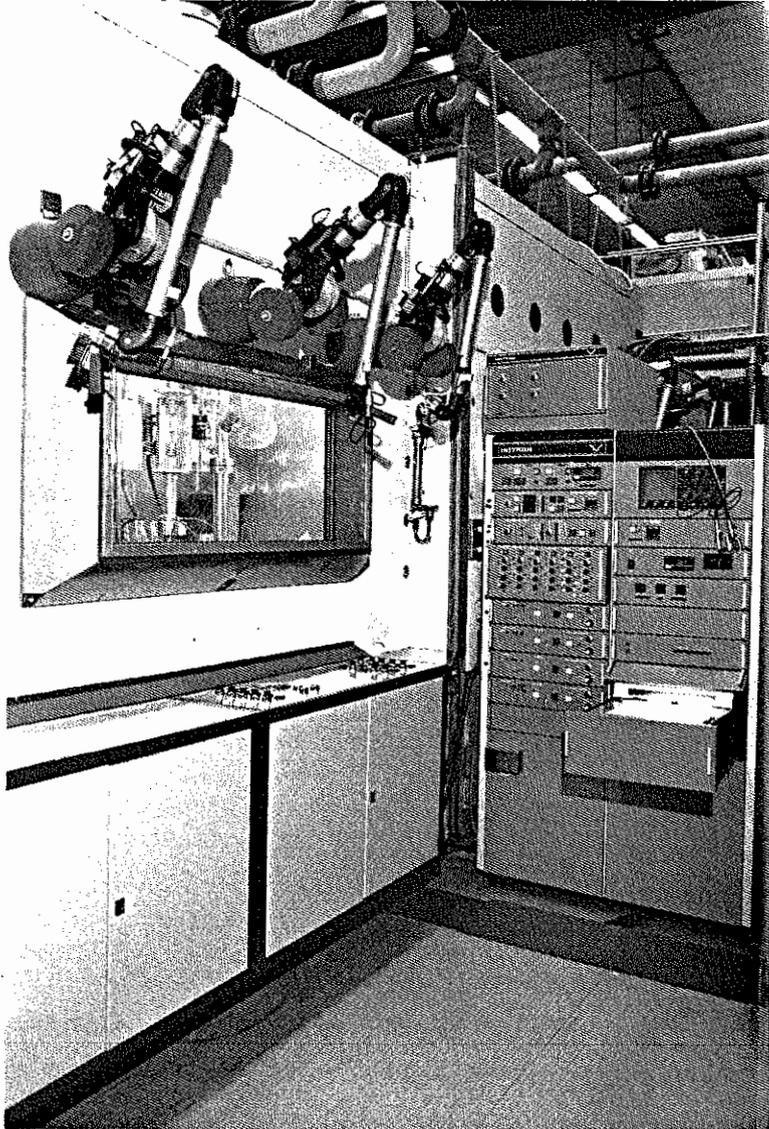


Fig. 1. Vue générale de la cellule pour tests de fatigue.

été centralisées sur un petit tableau de distribution électrique facilement accessible avec les télémanipulateurs sur la table en inox. Fig. 2.

Un système de ventilation assure la dépression dans la cellule pour éviter, qu'en cas de fuite radioactive ou d'émission de gaz nocifs, ceux-ci ne s'échappent de la cellule.

Un sas pneumatique permet le transfert et l'évacuation des matériaux irradiés vers d'autres cellules.

3. LES MACHINES

Les machines utilisées sont de type électrohydrauliques à servocommande avec boucle d'asservissement (closed-loop system).

Ces machines permettent de contrôler en permanence la déformation ou l'effort imposé à l'éprouvette ainsi que la vitesse de sollicitation.

Equipement : machine I : 200 KN statique/100 KN dynamique
 piston : ± 50 mm de déplacement et
 ± 100 KN de capacité

 machine II : 100 KN statique/50 KN dynamique
 piston : ± 50 mm de déplacement et
 ± 100 KN de capacité.

Les deux machines sont alimentées par un seul power-pack en utilisant deux sous-stations hydrauliques séparées. La figure 3 donne le principe de fonctionnement d'une telle machine.

Deux générateurs de fonctions sont utilisés permettant ainsi de travailler avec différentes formes d'ondes sous une large gamme de fréquences et d'amplitudes :

- dynamic function generator : de $0,9 \times 10^{-4}$ Hz à $1,09 \times 10^3$ Hz
- dual rate ramp function generator : de $2,5 \times 10^{-8}$ Hz à 2,5 Hz.

Sur chaque machine est installé un four hautes températures à 3 zones possédant une fenêtre permettant ainsi le passage des bras de l'extensomètre diamétral.

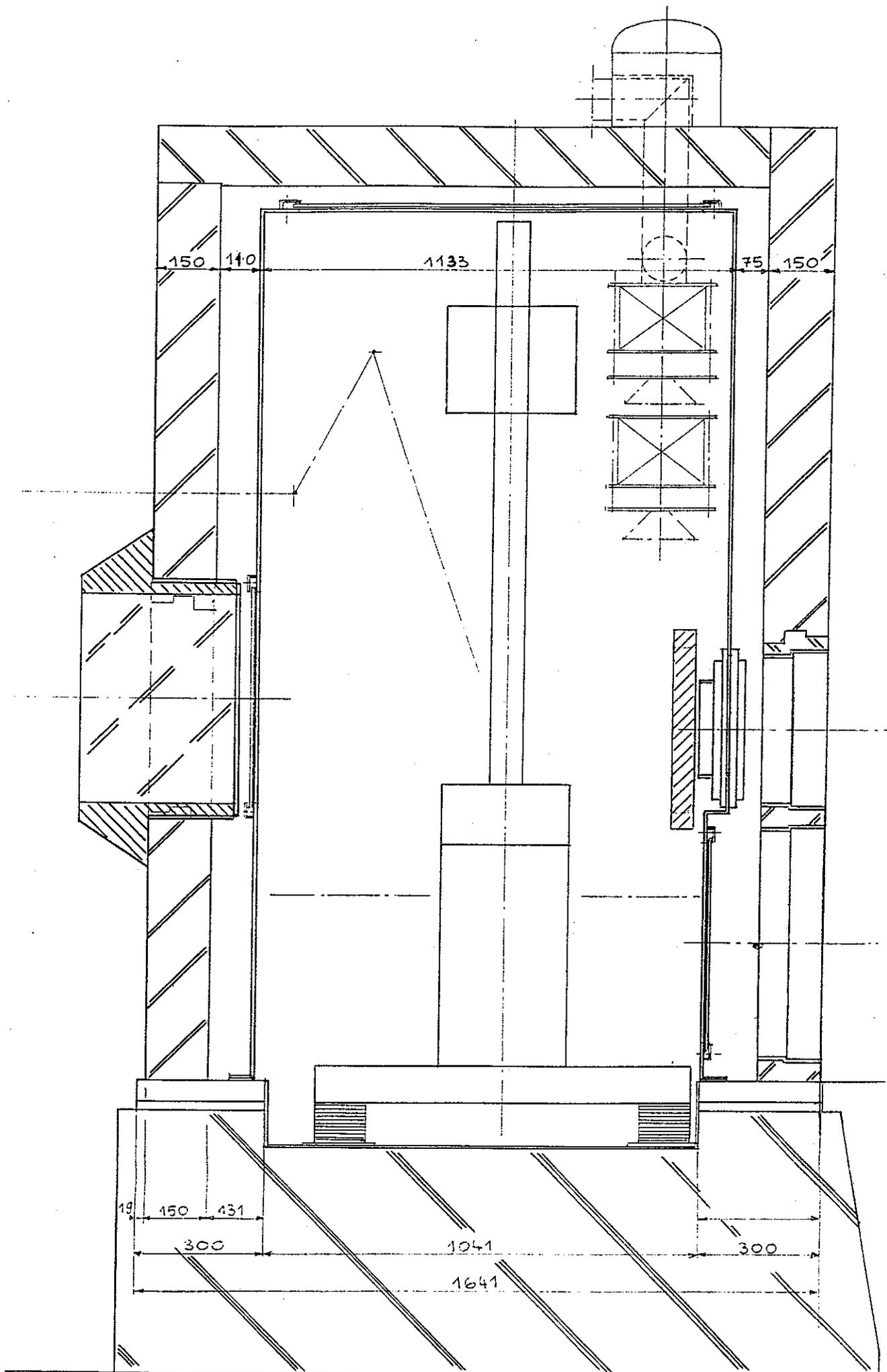


Fig. 2. Vue de profil en coupe de la cellule pour tests de fatigue.

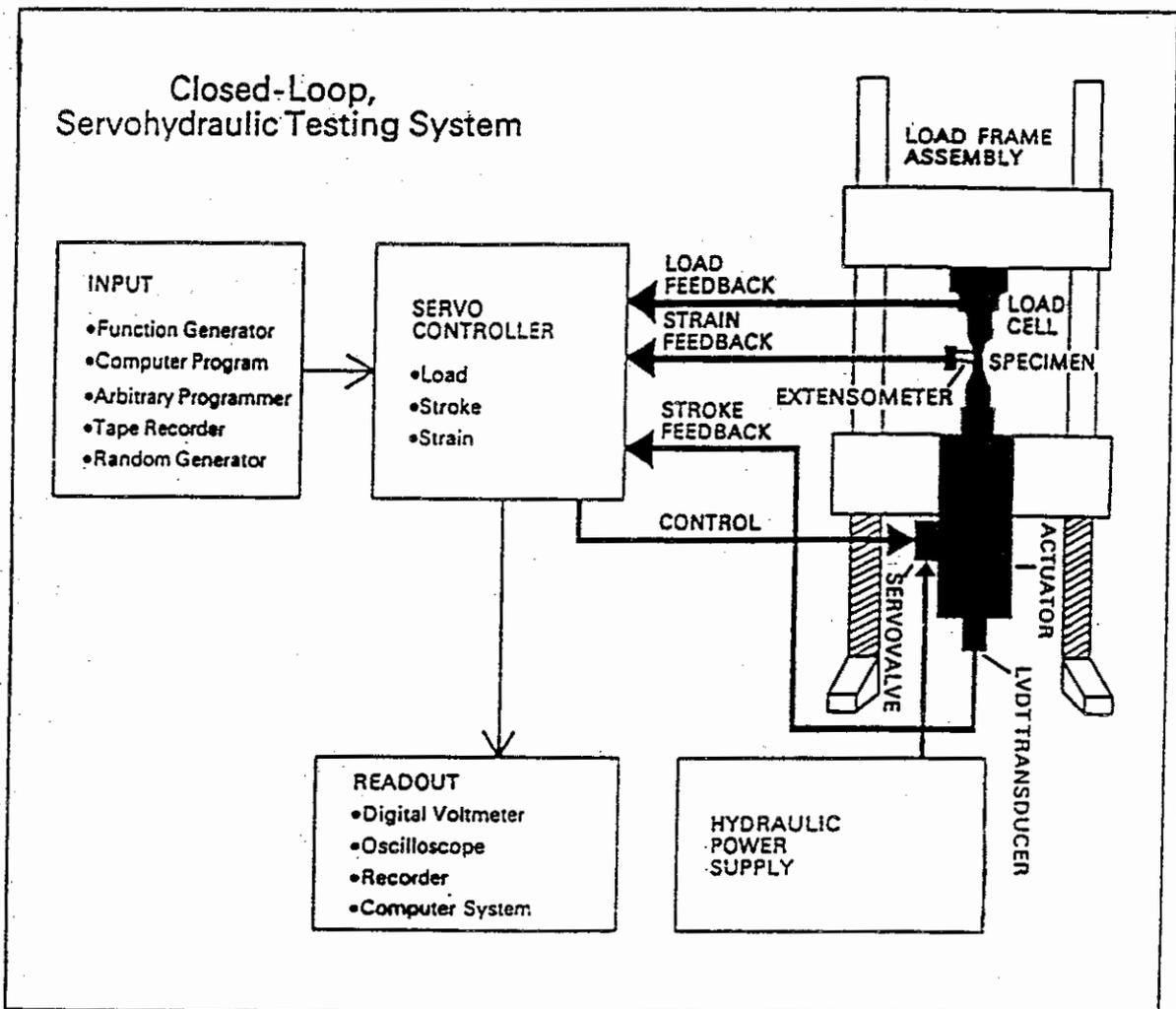


Fig.3. Block diagram of the closed-loop servohydraulic testing system

Les thermocouples sont montés sur un petit support et sont mis en contact avec l'échantillon (évitant ainsi tout contact avec les baguettes de l'extensomètre).

4. L'ECHANTILLON

L'éprouvette utilisée dans ces expériences est une éprouvette de forme toroïdale à section variable ("hour-glass specimen") de 3,2 mm de diamètre et d'une longueur totale de 45,2 mm. Fig. 4.

Celle-ci possède quelques particularités :

- les extrémités sont coniques pour faciliter l'alignement axial et des écrous sont vissés sur les têtes pour l'amarrage;
- deux parties plates ont été prévues aux deux extrémités de la partie toroïdale pour faciliter le serrage de l'éprouvette sur la ligne d'amarrage et pour éviter une possibilité de torsion pendant le serrage. [1]

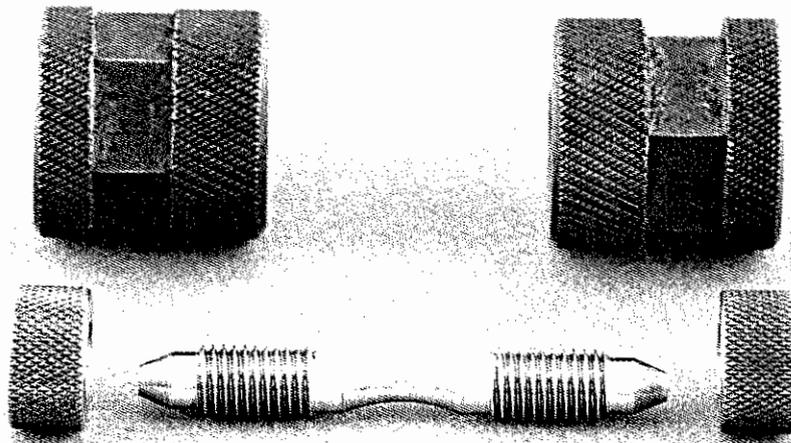
Cette forme d'éprouvette est utilisée pour des raisons de stabilité en compression. Il n'existe donc pas de partie cylindrique calibrée (gage length), comme dans le cas de l'utilisation d'un extensomètre axial. Etant donné que la détermination de la déformation à partir d'un déplacement axial demande des corrections très importantes avec ce type d'éprouvette, ceci conduit tout naturellement à l'emploi de l'extensométrie diamétrale.

L'état de surface de l'éprouvette doit être tel qu'il n'influencera pas le processus de fatigue qui conduira à la rupture. On évitera donc la finition par polissage manuel même longitudinal. Par contre, on préférera alors la rectification dans le sens longitudinal ou le polissage électrolytique (ce qui est notre cas!).

5. L'EXTENSOMETRIE DIAMETRALE

Ce qui revient à dire que dans la section la plus réduite d'une éprouvette toroïdale, on contrôle les variations de diamètre.

Cela se fait à l'aide de tiges extensométriques cylindriques en quartz évitant ainsi tout risque d'indentation (Fig. 5).



* section torique

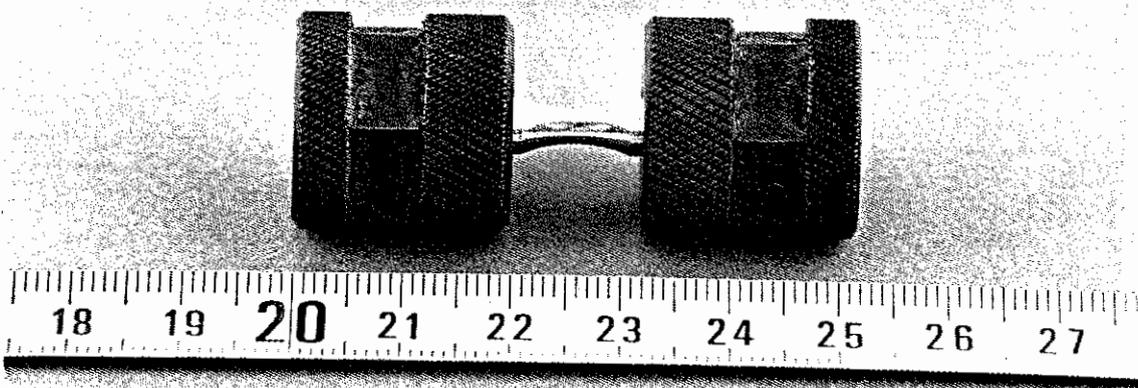
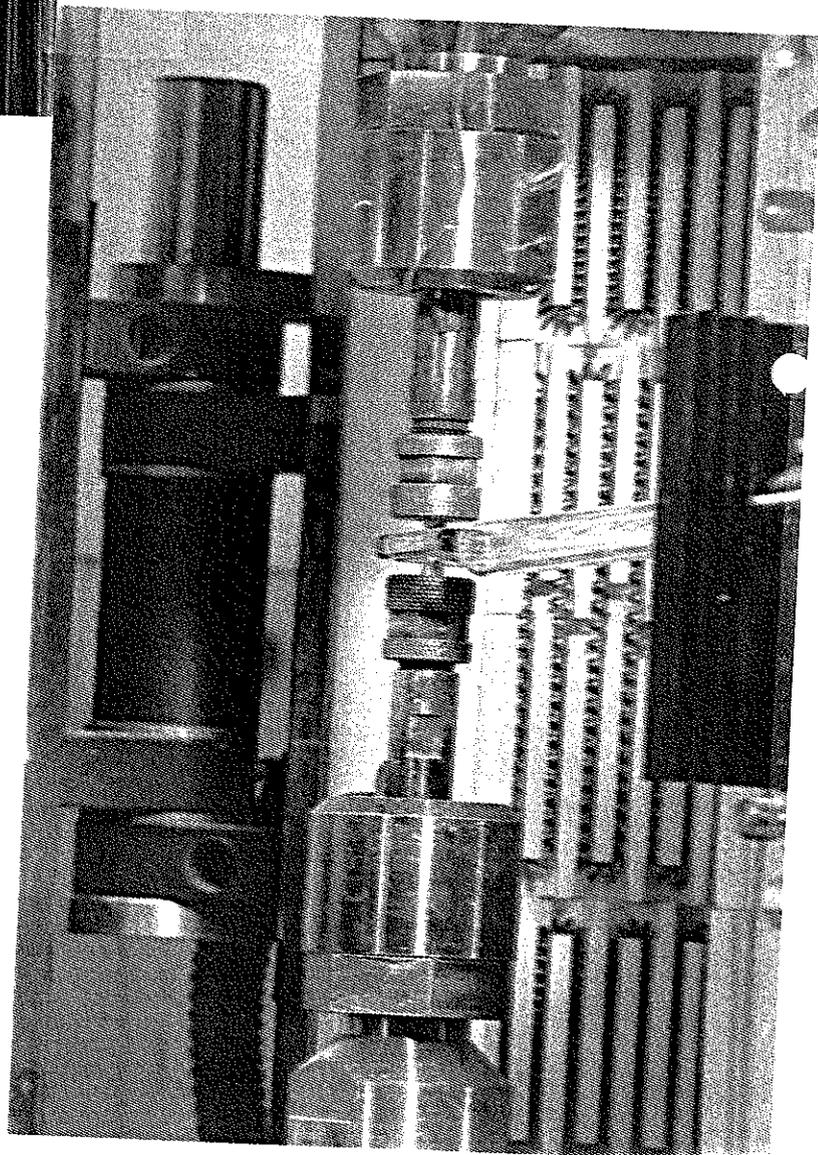
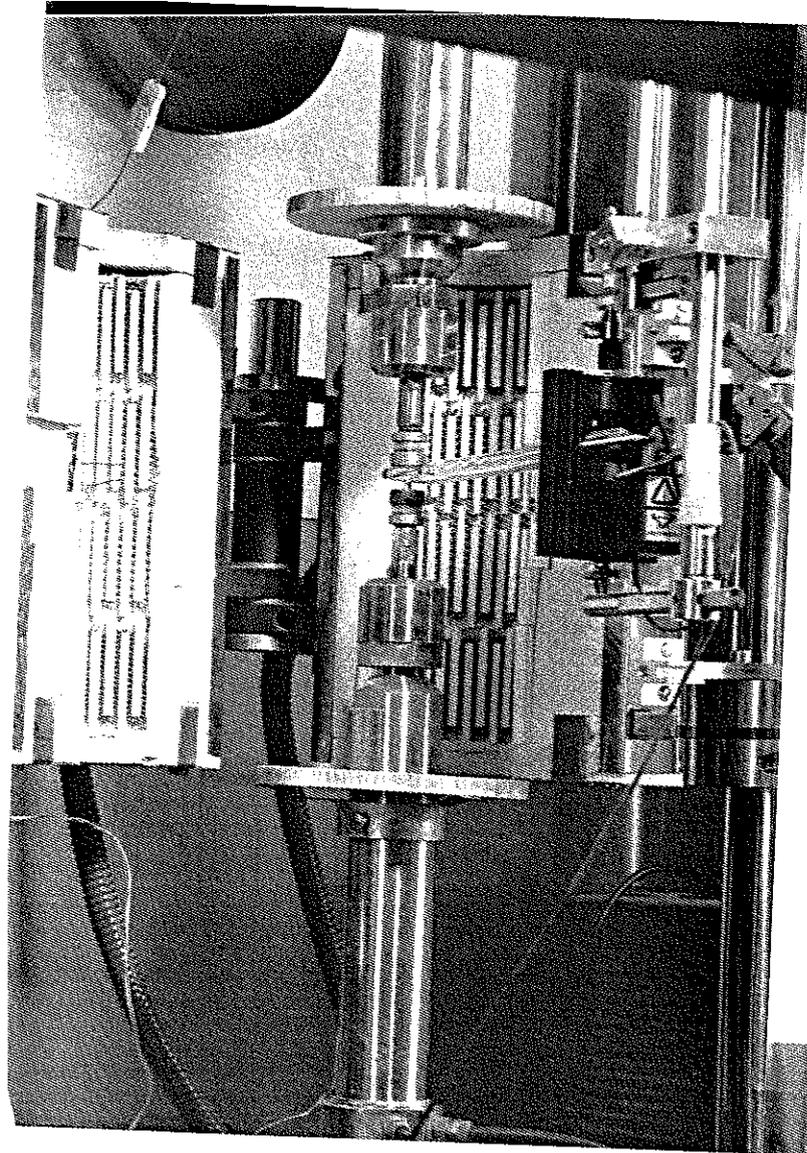


Fig. 4. Epreuve de forme toroïdale pour test de fatigue.



g. 5. Vue de l'intérieur de la cellule avec l'éprouvette et l'extensomètre diamétral montés.

On peut, à partir de la mesure de la déformation totale diamétrale et de l'effort mesuré, déterminer et contrôler la déformation plastique axiale. Ceci est effectué à l'aide d'un calculateur analogique ("plastic strain computer") couplé au rack de commande de la machine. Cette technique présente malheureusement certains inconvénients : le calcul de la déformation plastique axiale implique la connaissance du module d'élasticité de Young (E) et du coefficient de Poisson (ν). Ce qui revient à dire que lorsqu'on doit tester un matériau non homogène (éprouvette comportant une soudure), le module d'élasticité est en général mal connu, on est donc contraint à recourir à l'extensométrie axiale.

L'extensomètre diamétral est du type à gauges de contrainte offrant de hautes résolutions et linéarité.

Tout le système extensomètre est monté sur un assemblage spécial à suspensions rendant la manipulation à distance plus aisée.

6. TECHNIQUE D'ESSAIS

Les essais sont effectués à déformation imposée (fatigue plastique oligocyclique) et sont limités à quelques 10^5 cycles ("low cycle fatigue"), la machine étant asservie à la mesure de déformation cyclique de l'éprouvette par un extensomètre diamétral.

Le test se déroule en traction-compression avec un signal cyclique triangulaire à une fréquence $\sim 0,5$ Hz. La déformation imposée varie pour les différents tests de 0,3% à 1%.

Avec ces valeurs nous atteignons les performances limites de l'extensomètre. En effet, à une déformation axiale de 0,3% correspond une variation de diamètre d'environ 0,004 mm.

Les éprouvettes sont soumises à cyclage jusqu'à rupture, excepté dans les cas où une limite d'endurance apparente est atteinte.

Avant le démarrage du test proprement dit, l'échantillon est mis en charge élastiquement avec l'extensomètre installé. Le coefficient de Poisson est réglé au strain computer pour obtenir la valeur du module d'élasticité de Young assez proche de la valeur nominale. S'il n'est pas possible d'atteindre la valeur du module d'élasticité, c'est que l'extensomètre n'est pas correctement installé et un nouveau positionnement de celui-ci s'impose.

Une fois à la température de test désirée (généralement 250°C et/ou 430°C) on recontrôle la valeur du module d'élasticité de Young, car celui-ci varie légèrement avec la température.

Il peut arriver que pour des faibles déformations, on reste dans le domaine élastique. Alors, après vérification qu'il ne se passe aucun autre phénomène (durcissement ou adoucissement du matériau par fatigue) dans ce domaine de contraintes, on fait les tests en contrôle de charge (load control) sans extensomètre. La déformation pour ces tests est alors calculée en divisant la contrainte par le module d'élasticité de Young.

7. LES RESULTATS

Pendant le test, on enregistre sur papier la courbe d'hystérésis mécanique ($\Delta\sigma-\Delta\epsilon$) ou ($\Delta F-\Delta\epsilon$) et la variation de la force au cours du temps ($\Delta F-t$). (Fig. 6 & 7). [2]

Après analyse des résultats, les grandeurs suivantes sont portées en graphique [3, 4] :

- La déformation en fonction du nombre de cycles à rupture ($\Delta\epsilon-N_F$), qui donne une idée de l'endurance du matériau.

On peut décomposer la déformation totale en déformations élastique et plastique et les mettre en graphe en fonction du nombre de cycle. (Fig. 8 & 9).

Sur la figure 9, on peut voir que l'irradiation réduit fortement le nombre de cycles à rupture et que les échantillons se rompent même en cyclage élastique. On peut expliquer ce phénomène par le fait que l'irradiation induit des défauts dans le matériau qui sont eux-mêmes des amorces de rupture pendant le test de fatigue.

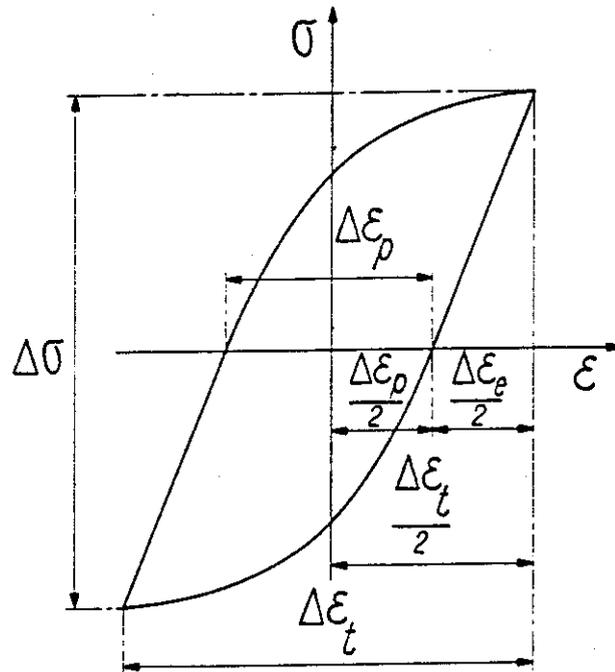
- La contrainte en fonction du nombre de cycles à rupture ($\Delta\sigma-N_F$) faisant apparaître un durcissement ou un adoucissement du matériau pendant le test.

En général, le durcissement apparaît à partir d'un état initial recuit tandis que l'adoucissement peut survenir pour un état suffisamment écroui. (Fig. 10 et 11).

- La contrainte en fonction de la déformation ($\Delta\sigma-\Delta\epsilon$) qui donne la courbe d'hystérésis mécanique (courbe d'écrouissage cyclique). Les figures 12 et 13 comparent le matériau irradié et non irradié à des moments de cyclage différents, respectivement $N = 1$ et $N = 10.000$. Pour le matériau irradié, la déformation est purement élastique jusqu'à une déformation de 0,4% et la contrainte augmente avec la déformation imposée.
- A partir du 10ième cycle et pour des déformations supérieures à 0,4%, on observe une chute des contraintes (adoucissement du matériau), ceci étant dû à la déformation plastique qui augmente.

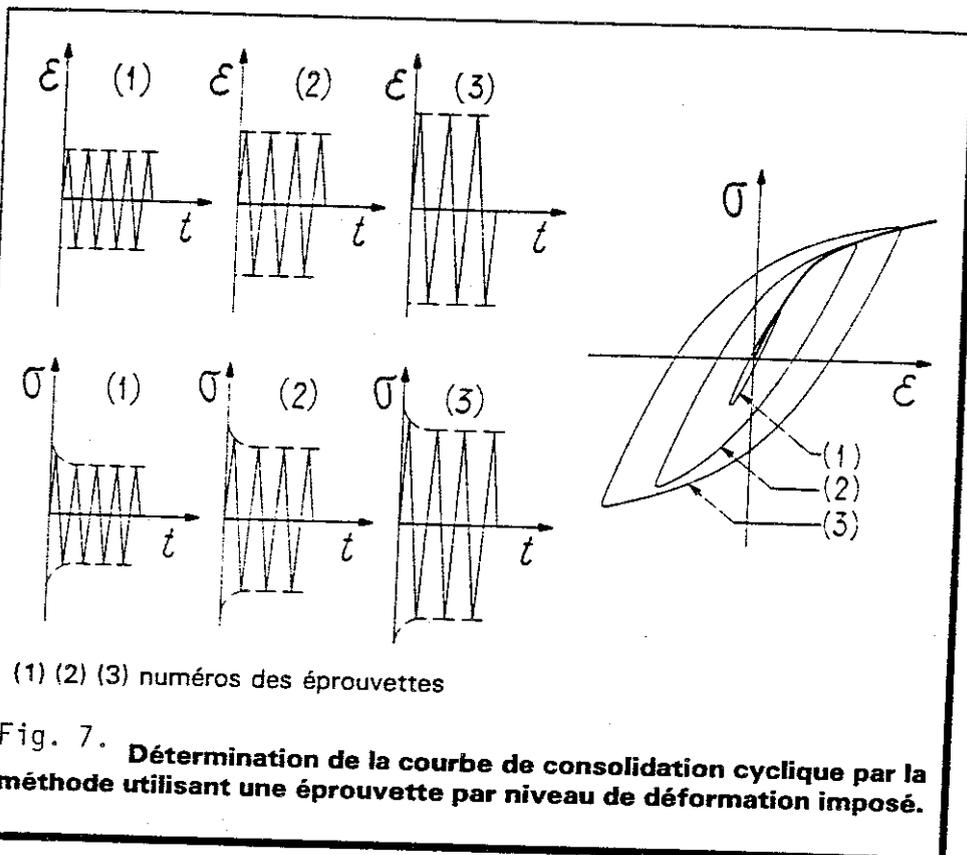
8. REFERENCES

1. SCK/CEN - LHMA
TEC/39.X8800/23/JVdV/AG/fq/hw
"Overview on LHMA's remotely operated mechanical testing facilities for material programme"
J. Van de Velde, A. Gys
2. "Techniques de l'ingénieur"
Essais de fatigue - M130
G. Pomey, H.-P. Lieurade
3. SCK/CEN
FAFUMA II Experiment - Test Results
FT/Mol/90-03 (N6/292/WVM/ig)
W. Vandermeulen, W. Hendrix, V. Massaut, J. Van de Velde, C. De Raedt
4. Rapport de Mission
"Meeting on structural materials"
Garching, Mars 1993
J. Eysermans



- $\Delta\varepsilon_e$ amplitude de déformation élastique
- $\Delta\varepsilon_p$ amplitude de déformation plastique
- $\Delta\varepsilon_t$ amplitude de déformation totale
- $\Delta\sigma$ amplitude de variation de la contrainte

Fig. 6. Définitions relatives à la boucle d'hystérésis contrainte - déformation.



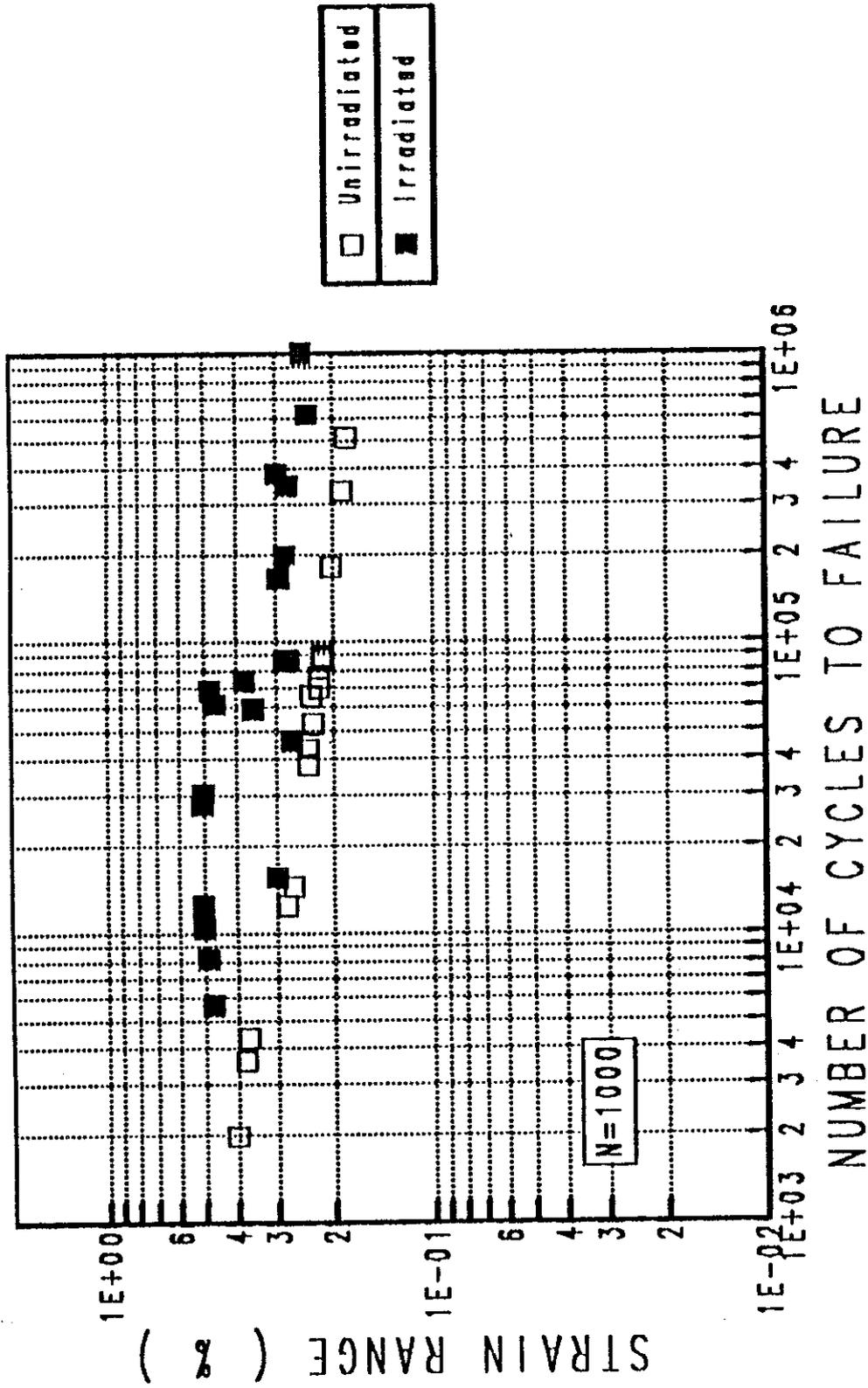


Fig. 8. Elastic strain ranges vs. cycles to failure
CEC-Ref plate. Unirradiated and irradiated

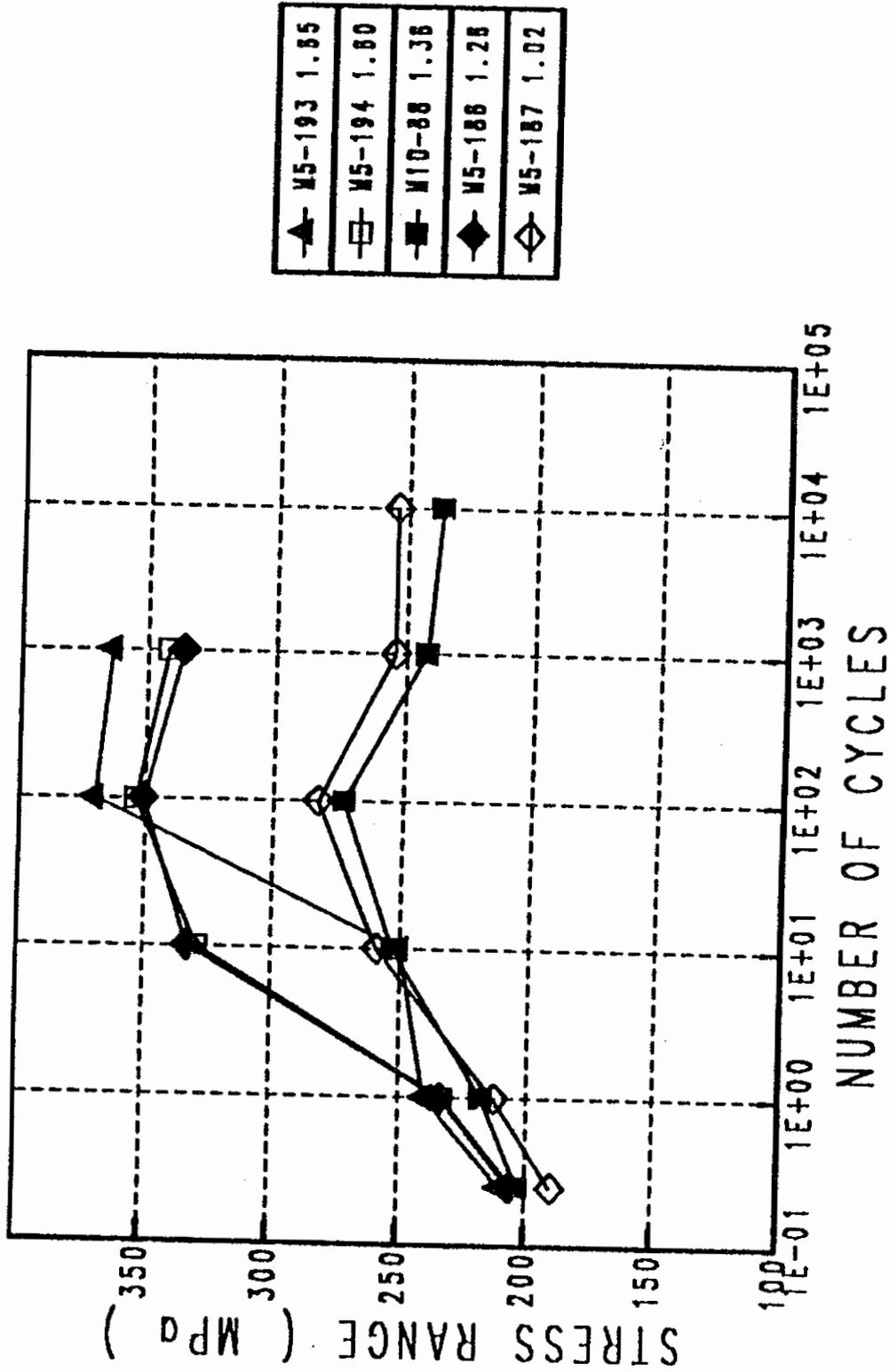


Fig. 10. Stress range vs. number of cycles
CEC-Ref plate. Unirradiated

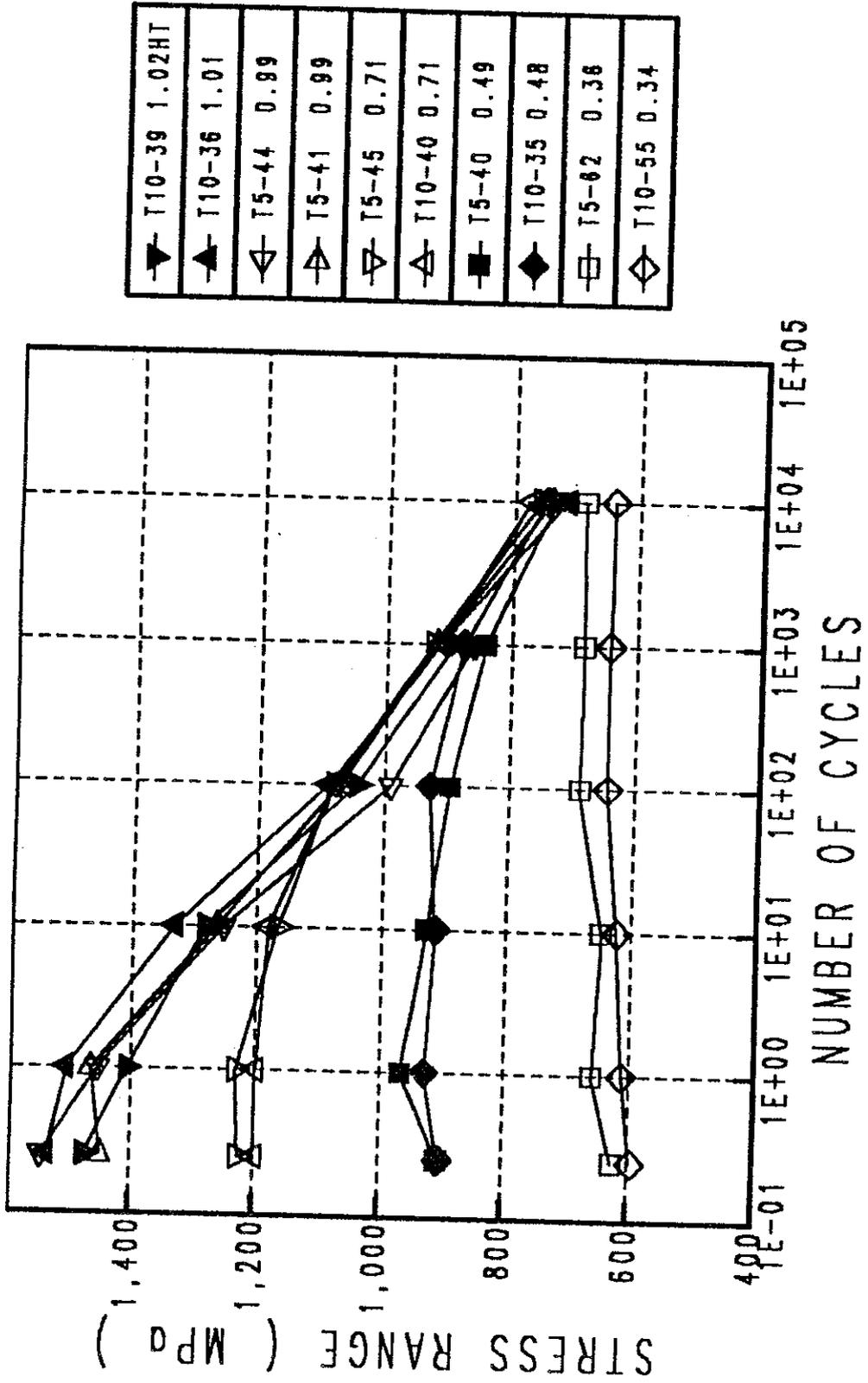


Fig. 11. Stress range vs. number of cycles
CEC-Ref plate. Irradiated

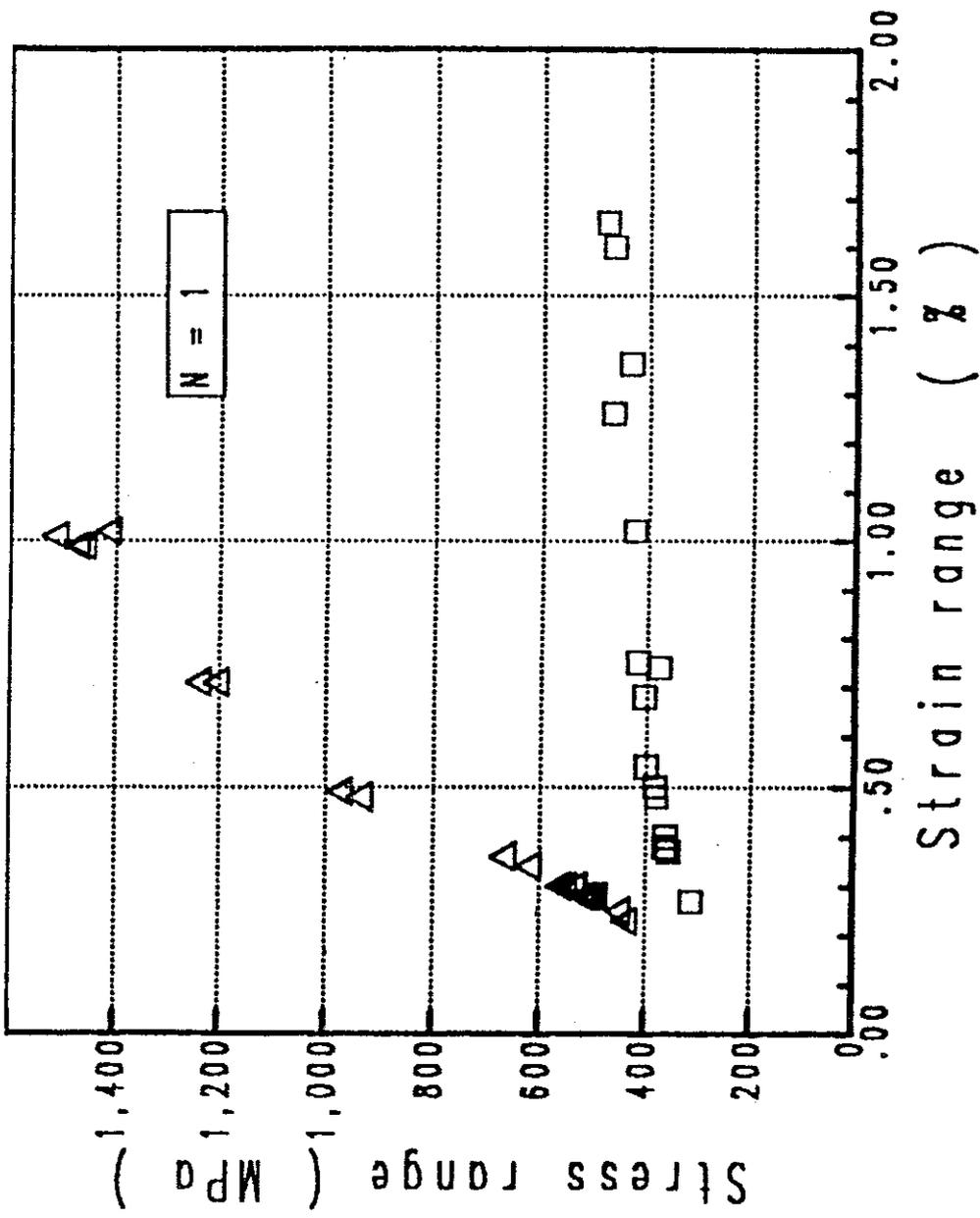


Fig. 12. Cyclic hardening curve. CEC-Ref plate

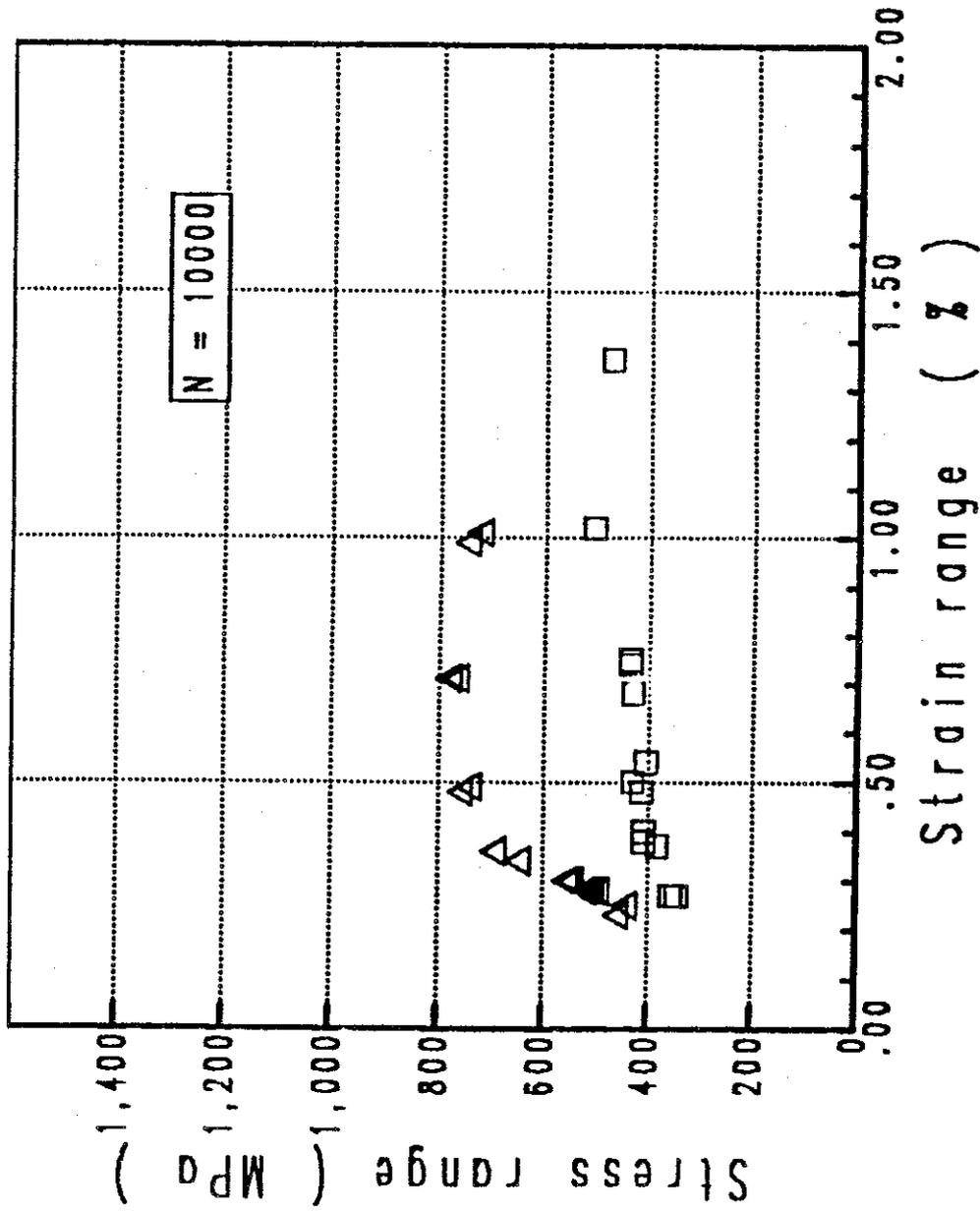


Fig. 13. Cyclic hardening curve, CEC-Ref plate

9. LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 Vue générale de la cellule pour tests de fatigue.
- Fig. 2 Vue de profil en coupe de la cellule pour tests de fatigue.
- Fig. 3 Block diagram of the closed-loop servohydraulic testing system.
- Fig. 4 Eprouvette de forme toroïdale pour test de fatigue.
- Fig. 5 Vue de l'intérieur de la cellule avec l'éprouvette et l'extensomètre diamétral montés.
- Fig. 6 Définitions relatives à la boucle d'hystérésis contrainte - déformation.
- Fig. 7 Détermination de la courbe de consolidation cyclique par la méthode utilisant une éprouvette par niveau de déformation imposé.
- Fig. 8 Elastic strain ranges vs. cycles to failure CEC-Ref plate. Unirradiated and irradiated.
- Fig. 9 Plastic strain ranges vs. cycles to failure CEC-Ref plate. Unirradiated and irradiated.
- Fig. 10 Stress range vs. number of cycles CEC-Ref plate. Unirradiated.
- Fig. 11 Stress range vs. number of cycles CEC-Ref plate. Irradiated.
- Fig. 12 Cyclic hardening curve. CEC-Ref plate.

