

Paris le 2 janvier 1993

M. Lavérie  
Directeur de la DSIN

Monsieur,

Je m'étonne de n'avoir pas eu de réponse à ma lettre du 2 novembre dernier alors que vos collaborateurs m'avaient assuré qu'elle serait rapide. Un courrier se serait-il égaré ? Je profite de ce courrier pour vous poser quelques questions complémentaires liées aux cuves de réacteur.

1) Je me reporte tout d'abord aux «Enseignements tirés des premières visites décennales des tranches REP de 900 MWe» (Gazette Nucléaire n°119/120 p. 23-26)

**Contrôle de la cuve :**

- Au sujet du décalage de la température de transition ductile-fragile de l'acier des cuves il est indiqué (p. 24) que les valeurs calculées des températures de transition à 10 ans restent inférieures à 65°C. Cependant il manque quelques données pour apprécier cette valeur de 65°C par rapport aux prévisions de fragilisation par irradiation :

a) Quelles sont les fluences atteintes par les différents réacteurs du palier CPO et CP1 au moment de la détermination des températures *correspondantes* de transition ?

b) Quelles sont les teneurs en P, Cu, Ni, des différentes nuances d'acier utilisé puisque à fluence égale ces teneurs jouent sur le décalage de la température de transition. Est-il possible d'obtenir les abaques correspondant à ces teneurs ainsi que la formule «FIS» utilisée par Framatome ?

- Le suivi de la température de transition s'effectue essentiellement à partir d'éprouvettes Charpy. Une éprouvette Charpy est mince. Est-elle vraiment représentative de l'acier épais de la cuve (que l'on suppose *parfaitement* détensionné). Que se passe-t-il dans le cas de ségrégations ?

Ces éprouvettes ont été placées dès le démarrage en différents points plus ou moins distants du coeur pour simuler l'évolution de la fluence que recevra la cuve au cours du temps. Ceci suppose que les défauts créés et leur migration sont indépendants du débit de dose, ne dépendant que de la fluence. Ce point a-t-il été vérifié expérimentalement ?

- Y a-t-il eu des mesures du facteur d'intensité de contrainte critique  $K_{1c}$  ?

**2) Les problèmes liés à l'inconel 600**

- Des fissures ont été relevées sur quelques adaptateurs de couvercle. Ne peut-il pas exister de telles fissures sur les pénétrations pour instrumentation situées *au bas* des cuves ? Des investigations ont-elles été faites dans ce sens ?

- Les adaptateurs de couvercle ayant présenté une fissuration sont tous ovalisés. Par contre des adaptateurs bien plus ovalisés que les précédents ne sont pas fissurés. On m'assure que la fluence au niveau de ces adaptateurs est négligeable. Quelle est la fluence actuelle des différents adaptateurs, est-elle réellement négligeable ? des essais de corrosion ont-ils été effectués sur l'inconel 600 à ces valeurs de flux ?

Je vous remercie à l'avance pour les renseignements que vous voudrez bien me communiquer et vous prie d'agréer, Monsieur, mes sincères salutations.

Bella Belbéoch, Secrétaire du GSIEN  
5 Bd Henri IV, 75004 PARIS



Ministère de l'Industrie, des Postes et Télécommunications  
et du Commerce Extérieur

Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires

Paris, le 24 SEP. 1993

Référence à rappeler :

DSIN Paris n° 1685/93

Madame,

Par votre lettre du 2 janvier 1993, vous m'avez posé un certain nombre de questions sur la fragilisation par irradiation des cuves des réacteurs à eau sous pression et sur la fissuration de l'Inconel 600.

Je vous prie de trouver ci-dessous, suite à la réunion du 8 mars dernier, quelques informations sur ces deux sujets.

\*  
\*      \*

Après une dizaine d'années d'exploitation, l'irradiation et la fragilisation des cuves restent modérées. En revanche, en fin de vie des réacteurs, la fragilisation de la cuve est un des éléments déterminant l'échéance de la mise à l'arrêt du réacteur.

L'exploitant doit suivre précisément, dès le démarrage du réacteur, l'irradiation et la fragilisation de la cuve. Cette surveillance s'appuie en particulier sur des éprouvettes placées entre le coeur et la paroi de la cuve.

La section permanente nucléaire de la commission centrale des appareils à pression, qui est chargée au sein des pouvoirs publics de veiller à la bonne application de la réglementation des appareils à pression relative au circuit primaire principal, examine régulièrement ce sujet. Elle se réunira à nouveau début 1994, afin de faire le bilan des expériences, études et mesures que l'exploitant a menées dans ce domaine ces dernières années. Seront en particulier examinées les nouvelles méthodes de calcul, plus précises, de la fluence des cuves, ainsi que les questions posées par les veines ségréguées.

Si vous le souhaitez, nous pourrions faire un nouveau point sur ce sujet à l'issue de cet examen. Dans l'attente, je vous prie de trouver en annexe 1 une première réponse à vos questions.

\*  
\*       \*

En ce qui concerne la fissuration des adaptateurs de couvercle en Inconel 600, il ne semble pas que la fluence puisse jouer un rôle : elle est, dans cette zone, de plusieurs décades inférieure au seuil à partir duquel des phénomènes de fragilisation ont déjà été identifiés. Plusieurs mètres d'eau séparent en effet le couvercle, du coeur du réacteur.

Mais il demeure certain que la dispersion du phénomène de fissuration est grande, et qu'il n'est pas possible aujourd'hui de déterminer avec certitude quel adaptateur fissurera, et quel adaptateur restera sain. Certains paramètres sont difficilement quantifiables, comme le niveau des contraintes résiduelles de soudage ; d'autres n'ont pas encore fait l'objet de mesures assez précises, comme la température, qui pourrait être tributaire de régimes thermohydrauliques locaux.

D'où l'importance de contrôler l'ensemble des adaptateurs, ce qui sera fait en 1993 et 1994. D'où l'importance, aussi, de surveiller l'ensemble des pièces en Inconel 600 (ou en autres variétés d'inconel) du circuit primaire, dont les traversées au bas des cuves. EDF a établi un programme de contrôle de ces dernières traversées qui débute par un sondage sur un certain nombre de cuves.

De manière générale, la DSIN, ainsi que les ministres chargés de l'industrie et de l'environnement, ont demandé fin 91 qu' EDF présente les dispositions prises pour surveiller l'ensemble des zones en Inconel et pour être en mesure d'expertiser et de réparer toute nouvelle fissuration. La section permanente nucléaire et le groupe permanent chargé des réacteurs examineront à la fin de l'année les réponses d'EDF. Sans attendre cette analyse complète, les contrôles ont commencé.

\*  
\*       \*

J'adresse copie, à toutes fins utiles, de cette lettre à Mme Sené, présidente du GSIEN.

En espérant avoir répondu à votre attente, je reste à votre disposition pour vous fournir les informations complémentaires que vous souhaiteriez et vous prie d'agréer, Madame, l'expression de mes respectueux hommages.

Le Directeur de la Sûreté  
des Installations Nucléaires



**Madame Bella Belbéoch**  
**Secrétaire du GSIEN**  
**5 Bd Henry IV**  
**75004 PARIS**

**A.C. LACOSTE**

## ANNEXE 1

Fluences atteintes par les tranches CP0 et CP1 lors des premières décennales :

En ce qui concerne la fluence, les valeurs enveloppes estimées pour la fin de la vie sont de l'ordre de  $7,6.10^{19}$  neutrons/cm<sup>2</sup> pour 40 années d'exploitation du réacteur, en gestion standard tiers de coeur et avec un coefficient de charge de l'ordre de 0,8.

Les fluences intégrées par les cuves au moment de la visite décennale, estimées à partir des dosimètres présents dans la cuve, se situent entre 1,9 et  $2,1.10^{19}$  neutrons/cm<sup>2</sup>. Ces variations sont dues aux différences de gestion de combustible, aux différences de coefficient de charge et au fait que les visites décennales n'ont pas toujours lieu précisément après dix années d'exploitation.

\*            \*  
                 \*  
                 \*

Teneurs en Cu, Ni et P des aciers de cuve :

Concernant les teneurs en éléments fragilisant des aciers de cuve, les analyses chimiques, réalisées sur des éprouvettes du métal de base et du métal déposé utilisées pour les essais avant irradiation ont donné les teneurs maximales suivantes en Cu, Ni et P.

	Cu (%)	Ni (%)	P (%)
métal de base	0.08	0.84	0.013
métal déposé	0.13	0.78	0.019

(Teneurs maximales en Cu, Ni et P obtenues sur l' ensemble des cuves.)

Il est à noter que les concentrations en Cu, Ni et P dans le métal de base des cuves sont restées stables d'une cuve à l'autre lors de la construction du parc. Les valeurs moyennes sont de 0.061% pour le Cu, 0.71% pour le Ni et 0.013% pour le P.

.../...

Par contre, la composition du métal déposé a sensiblement évolué.

Sur le CP0 (Fessenheim et Bugey), la proportion en cuivre varie de 0.1 à 0.13% alors que sur le CP1-CP2 ( autres réacteurs de 900 MWe) cette proportion a été ramenée entre 0.03% et 0.04%.

Le phosphore a subi une évolution du même type puisque pour le CP0 les proportions se situent entre 0.015% et 0.019% et pour le CP1-CP2 entre 0.05% et 0.015%.

Enfin la proportion de Nickel retenue pour le CP0 était de 0.1% (à l'exception des cuves de Bugey 3 et de Bugey 5 dont la teneur est de 0.51%) et pour le CP1-CP2 de 0.5 à 0.78%.

\*            \*  
                 \*  
                 \*

#### Formule FIS proposée par Framatome :

La formule FIS proposée par Framatome, et reprise dans les règles de surveillance en exploitation des matériels mécaniques des îlots nucléaires des réacteurs à eau sous pression (RSEM), écrites par EdF, s' exprime par :

$$\Delta(RTNDT)(C) = 8 + (24 + 1537(\%P - 0.008) + 238(\%Cu - 0.08) + 191 * \%NI^2 * \%Cu) * (F/10^{19})^{0.35}$$

F en n/cm<sup>2</sup>: fluence moyenne de neutrons rapides ( E>1Mev )

% Cu-0.08=0 si Cu < 0.08%

% P-0.008=0 si P < 0.008%

Domaine de validité: fluence comprise entre 2.10<sup>18</sup> et 8.10<sup>19</sup> n/cm<sup>2</sup> ;  
température comprise entre 275 et 300°C.

#### Représentativité des éprouvettes placées dans le coeur du réacteur :

Le programme de suivi de l'irradiation concerne les matériaux dont la température de transition est susceptible de s'élever de plus de 28°C pendant l'exploitation du réacteur. Ces matériaux sont les aciers de cuve subissant une irradiation supérieure à 2.10<sup>18</sup> n/cm<sup>2</sup>. Sur les réacteurs du palier CPY, les zones suivantes reçoivent une telle fluence (annexe 3) :

- la virole B ;
- la soudure B/C1 et les ZAT ( zone affectée thermiquement) associées ;
- la virole C1 ;
- la soudure C1/C2 et les ZAT associées ;
- la virole C2.

.../...

Pour chacun des trois types de matériaux (métal de base, joint soudé, ZAT), la zone la plus sensible est déterminée de la manière suivante :

- détermination de la RTNDT (température de transition de résilience) initiale ;
- prévision de la RTNDT finale ;
- le métal de base et le joint soudé sélectionnés sont ceux pour lesquels la RTNDT en fin de vie calculée est la plus grande ;
- la ZAT retenue est automatiquement celle du métal de base sélectionné .

Les éprouvettes, témoins de chacune de ces zones, sont ensuite fabriquées, puis placées dans la zone recevant la plus forte fluence. Le matériau de ces éprouvettes subit un traitement thermique de détensionnement unique, simulant en une seule fois les différents traitements thermiques des viroles de cuve.

Toutefois, comme vous le soulignez, ces éprouvettes peuvent, à cause de leurs petites dimensions, ne pas être représentatives de l'ensemble du matériau de la cuve. En effet, les viroles forgées présentent des hétérogénéités chimiques (ségrégations) qui ont une influence sur leurs caractéristiques mécaniques.

Les ségrégations trouvent leur origine à la fabrication et notamment lors de la solidification du matériau. Elles sont de deux types :

- **La ségrégation majeure** est due à l'existence d'un gradient thermique dans le lingot au cours du refroidissement et au fait que la solidification n'est pas simultanée à tous les points. Les zones qui se solidifient les dernières ont tendance à s'enrichir en éléments qui abaissent leur point de fusion. C'est donc une ségrégation à l'échelle du lingot. Les zones ségrégées présentent des concentrations en éléments fragilisants comme le cuivre et le phosphore supérieures d'environ 10% aux valeurs moyennes. Leur mécanisme de rupture est transgranulaire (clivage), comme pour le matériau non ségrégué. L'annexe 4 précise la localisation de ces zones à ségrégation majeure.

L'influence de ces zones sur le calcul de la température de transition, à partir de la formule FIS, est considérée en prenant en compte les compositions chimiques les plus défavorables.

- **La ségrégation mineure** est un phénomène connu sur les grosses pièces de forge et se présente sous forme de veines sombres comme le montre l'annexe 4. Les éléments à bas point de fusion sont repoussés vers le front de refroidissement du lingot et les mouvements de convection donnent naissance à des veines très concentrées en impuretés.

Ces zones, de faibles dimensions, ont des concentrations en éléments fragilisants pouvant aller jusqu'à 3 fois la valeur normale. Le mécanisme de rupture de ces zones est intergranulaire, dû à la présence du phosphore. Il est donc différent du matériau homogène.

Les éprouvettes placées dans la cuve sont prélevées dans les surlongueurs, en pied de virole, dans une zone à priori dépourvue de veines sombres. La question de leur représentativité se pose donc. Elle fait l'objet d'un programme de recherche mené conjointement par EdF, Framatome et le CEA destiné à connaître et à quantifier la différence de comportement à l'irradiation entre un matériau ségrégué et un matériau non ségrégué.

Des études ont été menées et se poursuivent pour déterminer la ténacité et la résilience des zones comportant des veines ségréguées en fonction de leur RTNDT. Elles ont en particulier pour objectif :

- de caractériser plus précisément les veines sombres (localisation, nature ...) ;
- d'évaluer leur influence sur la ténacité et la résilience de l'acier à partir d'essais réalisés sur des éprouvettes, dopés en éléments fragilisants et irradiés de façon accélérée en pile.

Les premiers résultats montreraient que les zones comportant des veines sombres présentent avant irradiation une température de transition de résilience plus élevée d'environ 70°C que celle du matériau non ségrégué. L'irradiation provoquerait un décalage de leur température de transition de résilience de 70°C pour une fluence de  $4.5.10^{19}$  neutrons/cm<sup>2</sup> (E>1Mev). Après irradiation, leur température de transition serait supérieure d'environ 40°C à celle du métal de base non ségrégué (ce qui signifie que le décalage est moindre pour les zones avec des veines ségréguées).

Selon les résultats actuels, matériaux ségrégués et homogènes auraient une ténacité comparable à RTNDT donnée.

#### Mesures du facteur d'intensité de contraintes :

Il existe dans chaque réacteur des éprouvettes destinées à caractériser le K1C, le J1C et le COD. Ces éprouvettes sont disponibles à des fins d'expertises mais n'ont pour l'instant pas fait l'objet d'essais. Elles sont gardées en réserve.

Les éprouvettes de résilience du type CHARPY servent à suivre le décalage de la RTNDT du matériau de la cuve. La ténacité K1C est ensuite déduite à partir de la courbe de ténacité de référence, issue du RCCM, et figurant en annexe 2. Le programme d'essai décrit au paragraphe précédent doit permettre de valider ou de corriger cette courbe en tenant compte des veines ségréguées.

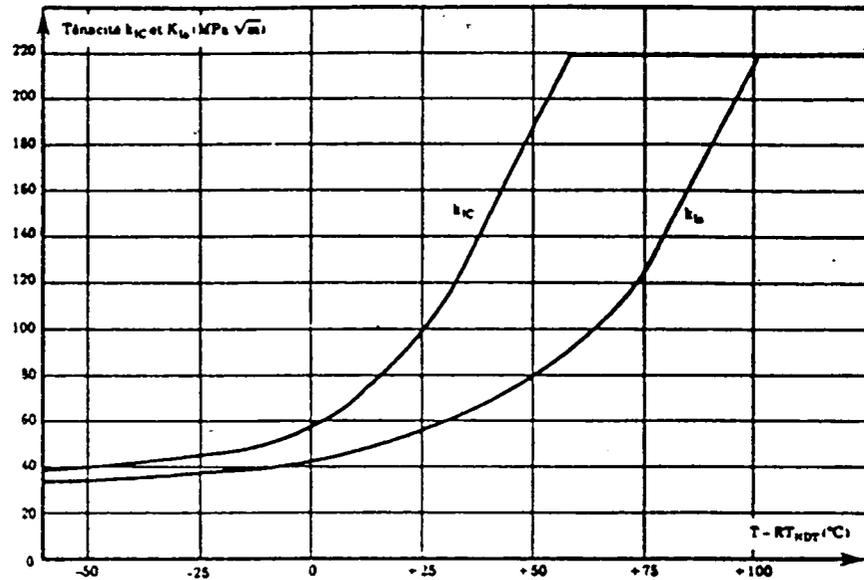
#### Influence du débit de dose sur le comportement des matériaux :

En ce qui concerne l'influence du débit de dose, l'article 41 de la circulaire du 26.02.74 demande que les conditions d'irradiation des éprouvettes soient le plus proche possible de celles des parois de la cuve. Elle précise que l'on ne peut valablement utiliser ces éprouvettes pour prévoir les effets de l'irradiation sur la paroi que si le flux auquel elles sont soumises est inférieur au triple du flux reçu par cet élément de paroi.

## ANNEXE 2

RCC-M - Edition 1988

Annexe 2 G



Courbes donnant l'évolution des facteurs d'intensité de contrainte critiques  $K_{IC}$  et  $K_{Ia}$  (correspondant respectivement au déclenchement de l'instabilité et à l'arrêt) en fonction de la température  $T$  et de la température de transition  $RT_{NDT}$  du matériau.

L'expression analytique de la courbe  $K_{Ia} = f(T - RT_{NDT})$  est donnée par la relation suivante :

$$K_{Ia} = \min \begin{cases} 29,43 + 1,355 \exp\{0,0261(T - RT_{NDT} + 88,9)\} \\ 220 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}} \end{cases}$$

La courbe  $K_{IC} = f(T - RT_{NDT})$  peut être approximée par la relation (pessimiste) suivante :

$$K_{IC} = \min \begin{cases} 36,5 + 3,1 \exp\{0,036(T - RT_{NDT} + 55,5)\} \\ 220 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}} \end{cases}$$

# ANNEXES.



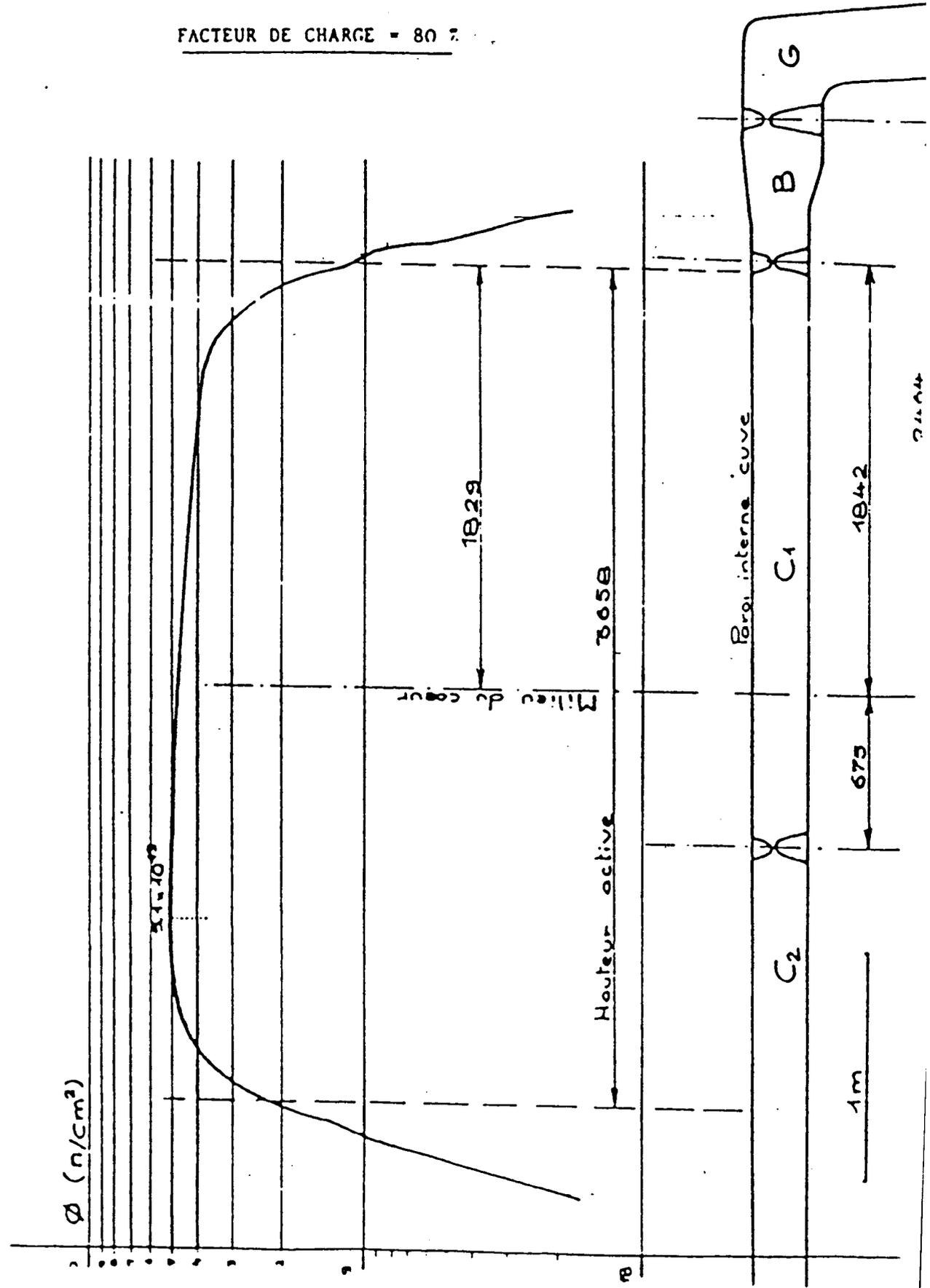
VARIATION DU FLUX INTEGRE SUR 40 ANS  
SUR LES PAROIS INTERNES DE LA CUVE.  
(D'APRES REF. (1)).

PAGE  
No TE/G-DC.0318  
REVISION D

$E > 1 \text{ MeV}$

FACTEUR DE CHARGE = 80 %

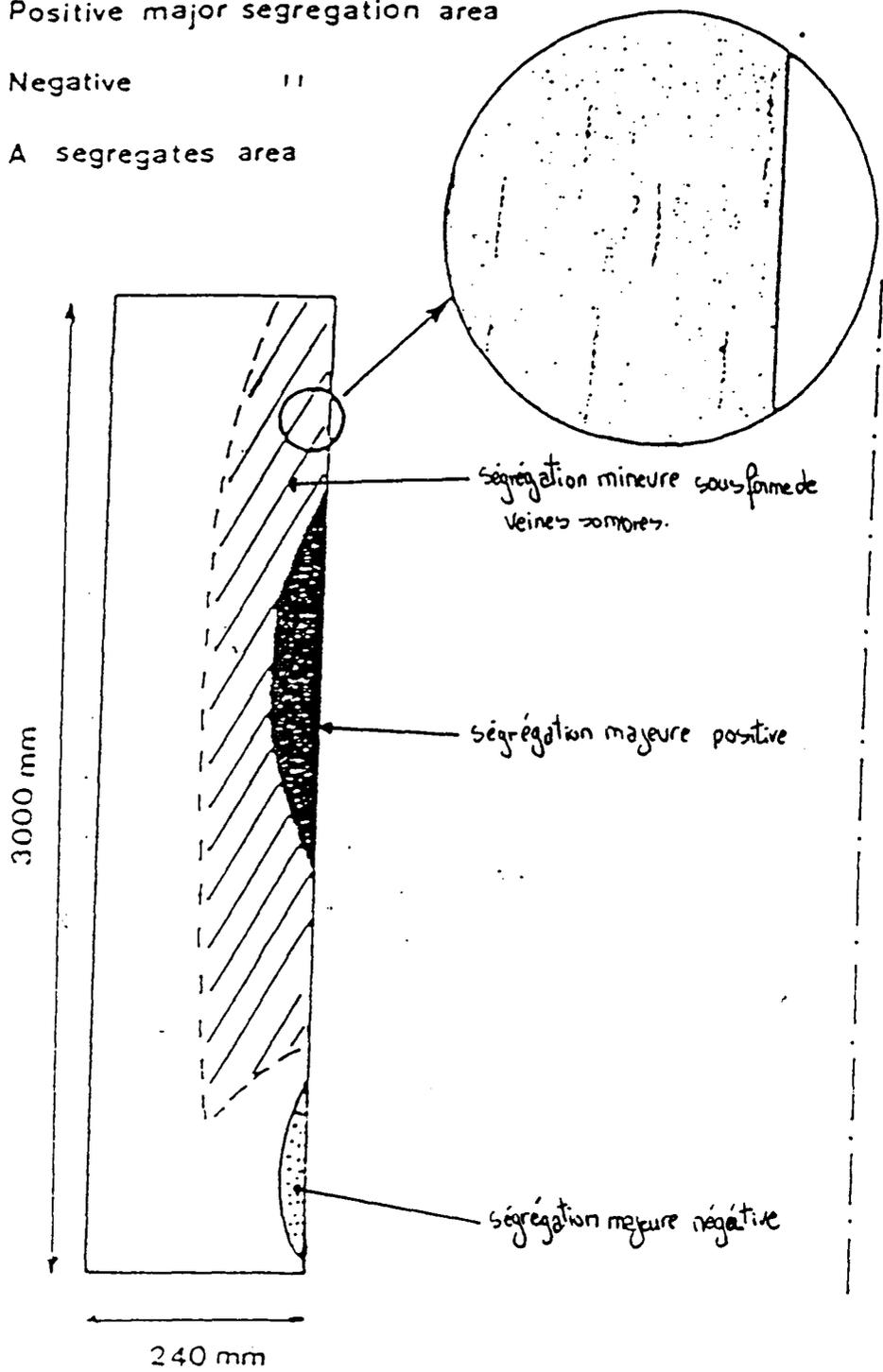
FRAMATOME SA - Tour Flux - 1, Place de la Coupole - COURBEVOIE (Hauts-de-Seine)



24 SEP. 1993

# ANNEXE 4

-  Positive major segregation area
-  Negative " "
-  A segregates area



Location of segregated areas in a shell made from a conventional ingot.