

D. BRETON, P. LECORCHE, AND C. CLOUET d'ORVAL, "CRITICALITY STUDIES," (IN FRENCH) IN PROCEEDINGS OF THE THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PEACEFUL USES OF ATOMIC ENERGY, GENEVA, 1964 (UNITED NATIONS, NEW YORK, 1965), VOL. 13, PP. 234-242.

**Proceedings of
the Third International Conference
on the Peaceful Uses of Atomic Energy**

**Held in Geneva
31 August–9 September 1964**

**Volume 13
Nuclear Safety**

**MULTILINGUAL EDITION
ÉDITION MULTILINGUE
МНОГОЯЗЫЧНОЕ ИЗДАНИЕ
EDICIÓN PLURILINGÜE**



**UNITED NATIONS
New York
1965**

The designations employed and the presentation of the material in this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations concerning the legal status of any country or territory or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers.

Les désignations utilisées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part du Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies aucune prise de position quant au statut juridique de tel ou tel pays ou territoire, ou de ses autorités, ni quant au tracé de ses frontières.

Употребляемые здесь обозначения и оформление материала не должны рассматриваться как выражение какого бы то ни было мнения со стороны Секретариата Организации Объединенных Наций относительно правового статуса той или иной страны или территории или ее властей, или относительно делимитации ее границ.

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte de la Secretaría de las Naciones Unidas, juicio alguno sobre la condición jurídica de ninguno de los países o territorios citados o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras.

A/CONF.28/1, Vol. 13

UNITED NATIONS PUBLICATION

Sales No.: 65. IX. 13

Price: \$U.S. 12.50
(or equivalent in other currencies)

PRINTED IN SWITZERLAND

Études de criticité

par D. Breton, P. Lecorche, C. Clouet d'Orval *

Les études de criticité entreprises comportent d'une part des expériences sur des solutions de matières fissiles, d'autre part la mise au point de méthodes de calcul appliquées à ces expériences.

Les expériences portent sur des cylindres, des réservoirs annulaires et des plaques (isolés ou en interaction), dans diverses conditions de concentration et de réflexion.

Parallèlement, des méthodes de calcul (diffusion, transport, Monte-Carlo) ont été mises au point et leurs résultats comparés à ceux des expériences. Elles permettent en outre de traiter les problèmes industriels posés.

Quelques exemples montrant comment ont été résolus certains de ces problèmes mettent en évidence les critères de sécurité employés couramment.

EXPÉRIENCES FAITES A SACLAY APPAREILLAGE ET RÉSULTATS

Les études critiques entreprises à Saclay portent essentiellement sur des récipients cylindriques contenant des solutions fissiles à concentration variable, soumises à diverses conditions de réflexion et éventuellement d'interaction avec d'autres unités fissiles. Un ensemble de résultats expérimentaux, obtenus pour divers diamètres de cuves, est présenté, ainsi que des résultats de calculs portant sur ces différents cas.

Appareillage expérimental ALECTO (²³⁹Pu, ²³⁵U, ²³³U) [1, 2]

Les deux expériences ALECTO sont situées à Saclay dans un hall étanche de 30 × 15 m² qui abrite également la pile PROSERPINE, première expérience critique homogène au plutonium ou à l'uranium 235 [6].

ALECTO I concerne le plutonium, ALECTO II l'uranium enrichi à 90%. Dans ces ensembles, on peut rendre critiques des solutions fissiles contenues dans des cuves cylindriques, de diamètres variables entre 20 et 50 cm, de hauteur allant jusqu'à 100 cm, dans différentes dispositions de réflexion et d'interaction. Chaque installation se compose essentiellement d'une

cabine étanche, contenant l'assemblage critique, et d'une cabine de stockage.

La cabine pile contient la cuve en essai, d'épaisseur 3 mm, surmontée d'une boîte à gants, dans laquelle se trouvent suspendues deux barres de sécurité formées de sandwichs cadmium-acier inoxydable, une barre de commande et une pointe de mesure de niveau. La cuve peut être désolidarisée de la boîte à gants supérieure qui peut alors, en prenant toutes précautions pour éviter la contamination, être adaptée à une cuve d'un diamètre différent. La cuve peut être entourée d'un réflecteur infini d'eau ou d'un réflecteur solide (béton, bois, paraffine) ou d'un réflecteur composite pouvant contenir du cadmium ou de l'acier, ou encore de bouteilles entrant en interaction avec la cuve. Cuve et boîte à gants supérieure sont démontables et peuvent être séparées du tube d'amenée de la solution fissile provenant du stockage.

Les stockages contenus dans des cabines séparées sont de géométrie sûre. Ils sont essentiellement composés de réservoirs annulaires, réfléchis intérieurement par de la paraffine, une feuille de cadmium étant intercalée entre le réservoir et la paraffine. L'épaisseur du cylindre annulaire contenant la solution est de 40 mm pour le plutonium, 50 mm pour l'uranium enrichi. Une série de bouteilles de diamètre 100 mm, écartées de 600 mm d'axe en axe, permet de compléter ce stockage et d'effectuer les transferts.

L'appareillage est caractérisé essentiellement par une grande souplesse de manipulation, compte tenu des risques de contamination. Une détection des fuites de solution est possible en de nombreux points. La montée des solutions est effectuée en deux temps, par deux pompes différentes. Au début de la montée, la variation de réactivité est au maximum de 45.10⁻⁵ dK/K par seconde; à partir d'un niveau contrôlé par une pointe fixe, elle ne peut être supérieure à 14.10⁻⁵ dK/K par seconde.

Résultats expérimentaux **

Des cuves de diamètre variable ont été expérimentées au moyen de ces assemblages critiques. Outre la cuve ($\varnothing = 330$ mm) à fond bombé [3], on peut citer les

* Commissariat à l'énergie atomique. Avec la collaboration de R. Caizergues, J. Moreau et G. Sollier.

** Des résultats récents, concernant en particulier l'uranium 235, sont présentés sur la figure 9.

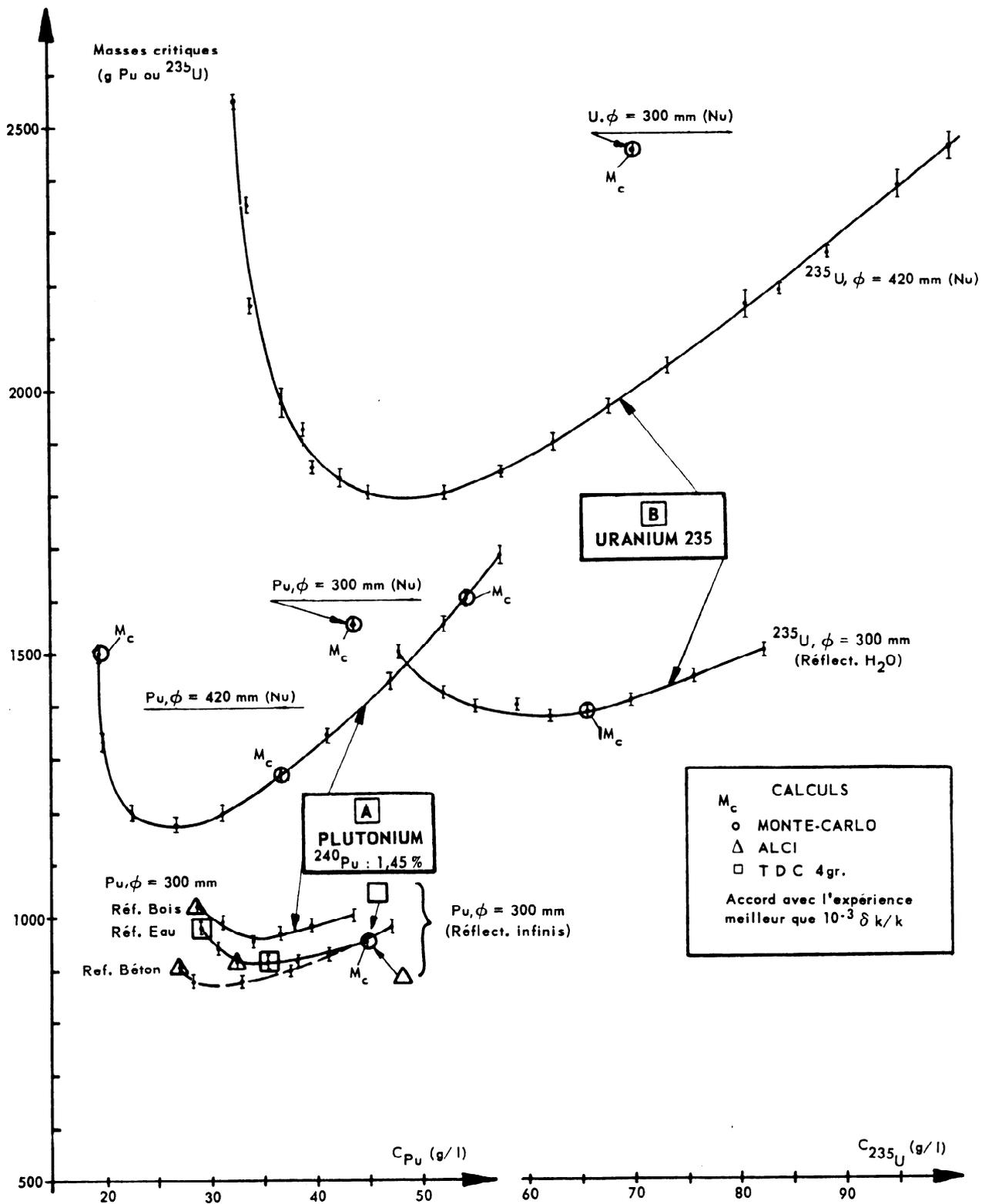


Figure 1. Masses critiques. A: plutonium; B: uranium 235 enrichi à 90%

cuves $\varnothing = 300$ mm [4] et $\varnothing = 420$ mm [5] dont nous présenterons quelques résultats. Il est à signaler que dans les deux cas, plutonium et uranium enrichi, la géométrie était absolument identique, ainsi que, le cas échéant, les conditions de réflexion.

Les solutions fissiles contiennent un sel dissous, $(\text{NO}_3)_4\text{Pu}$ ou $(\text{NO}_3)_2\text{UO}_2$ dans l'eau légère, en présence d'une acidité libre, toujours très voisine de 2N. Les mesures de concentration, d'acidité, de densité, sont données dans les références.

Masses critiques *

Les résultats peuvent être groupés, pour le plutonium et l'uranium, selon les dimensions de la cuve:

- Cuve de 420 mm, sans réflecteur.
- Cuve de 300 mm, nue ou avec divers réflecteurs latéraux.

L'ensemble des courbes plutonium et celui des courbes uranium sont représentés sur la figure 1 A et B. Il est à remarquer que, dans notre gamme de concentrations, le rapport des masses critiques minimal du plutonium et de l'uranium est, pour diverses géométries nues ou réfléchies, voisin de 5/8.

* Des résultats récents, concernant en particulier l'uranium 235, sont présentés sur la figure 9.

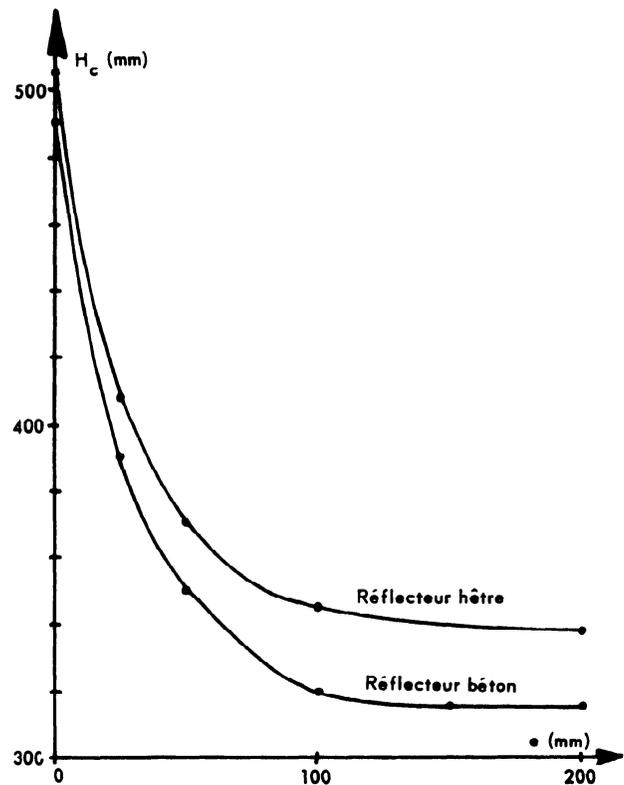


Figure 2. Effet de l'épaisseur du réflecteur. Solution plutonium, cuve $\varnothing 300$

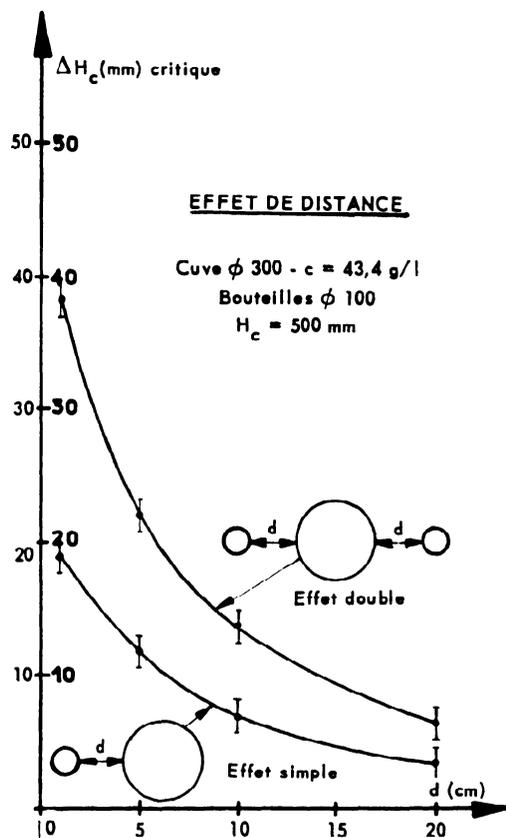


Figure 3. Effet de distance

Cuve $\varnothing = 43,4$ g/l; bouteilles: $\varnothing 100$; $H_c = 500$ mm

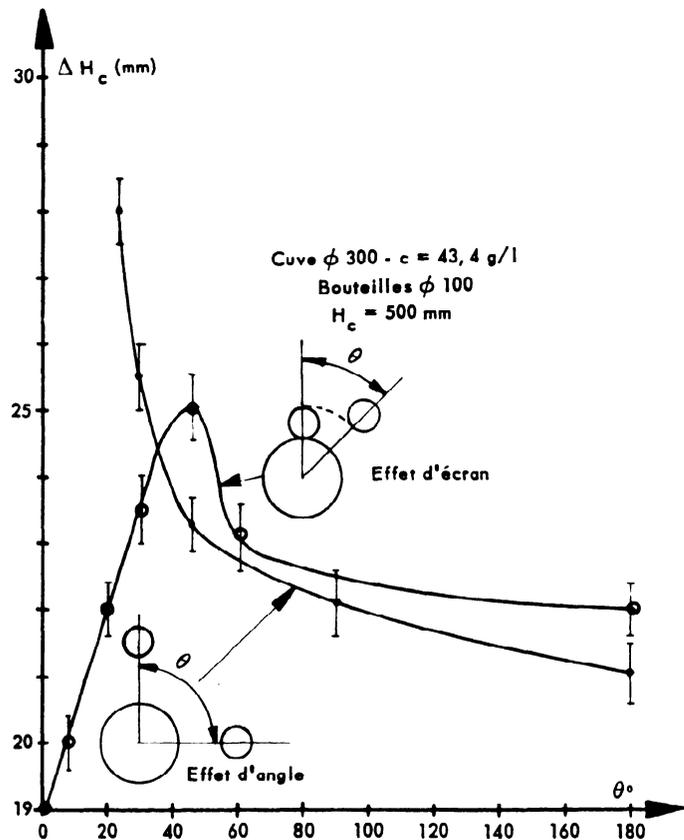


Figure 4. Cuve $\varnothing 300$ — $c = 43,4$ g/l; bouteilles: $\varnothing 100$; $H_c = 500$ mm

Par ailleurs, dans le cas du plutonium (cuve $\varnothing = 300$ mm), le réflecteur de béton apporte plus de réactivité que le réflecteur d'eau, qui lui-même en apporte plus que le réflecteur de bois.

On a indiqué sur les courbes les résultats de calculs effectués sur ces cas expérimentaux, et dont on parle plus loin.

Effets divers

a) Effets de réflexion, de la cuve, d'un absorbant Cuve $\varnothing = 300$ mm (plutonium)

La masse critique en fonction de l'épaisseur des réflecteurs (fig. 2) a été déterminée sur la cuve de $\varnothing = 300$ mm, dans le cas du plutonium, pour le béton et le bois. Un réflecteur d'épaisseur 150 mm, a été dans les deux cas trouvé équivalent au réflecteur d'épaisseur infinie. L'effet de l'épaisseur de la paroi pour la cuve de $\varnothing = 300$ mm en réacteur nu, a été déterminé par addition de couches successives de 3 mm et 6 mm d'acier inoxydable. Par extrapolation à une épaisseur nulle, on a trouvé que l'effet de la cuve d'acier inoxydable, uniquement par ses surfaces latérales, correspond à une variation de 15% de la hauteur critique.

Par ailleurs, on a trouvé, à la concentration de 43,6 g/l, qu'un réflecteur infini de bois de hêtre plus une feuille de cadmium entre cœur et réflecteur était équivalent à un réflecteur d'épaisseur 4 cm. Dans le cas d'un réflecteur infini, une feuille d'acier inoxydable ($e = 3$ mm) n'a pas grande influence sur la taille critique. Enfin, une feuille de cadmium de 0,7 mm d'épaisseur enroulée autour d'un réacteur nu apporte une légère réactivité positive (200 pcm pour une hauteur de solution de 500 mm).

b) Effets d'interaction — Cuve $\varnothing = 300$ mm (uranium)

Une étude d'interaction portant sur des couplages faibles a été entreprise dans le but de vérifier la méthode de l'angle solide. Autour de la cuve $\varnothing = 300$ mm, on a disposé des bouteilles $\varnothing = 100$ mm contenant des solutions fissiles. On a ainsi mis en évidence des effets liés à la concentration, lorsque la géométrie reste inchangée.

A concentration constante, on a étudié des effets liés au déplacement des bouteilles, particulièrement interaction entre bouteilles et effets d'ombre (fig. 3 et 4). On a également vérifié certaines lois concernant l'effet de réflexion, de semi-réflexion, d'un mur, d'un écran.

EXPÉRIENCES FAITES A DIJON APPAREILLAGE ET RÉSULTATS

La Station de criticité de Dijon a été décrite dans [7]. Le premier appareillage, appelé « Appareillage B »

[8], monté dans la cellule 2 et la sous-cellule correspondante, est destiné à l'étude de récipients divers contenant des solutions de nitrate de plutonium. Celles-ci sont préparées et analysées dans un atelier installé dans la Station elle-même.

Description de l'appareillage B

Cet appareillage permet l'étude des conditions de criticité de récipients isolés ou en interaction, nus ou dans diverses conditions de réflexion. Il se compose d'une cuve parallélépipédique de: $3\ 200 \times 2\ 100 \times 1\ 500$ mm alimentée en eau depuis un stockage placé en sous-cellule par l'intermédiaire d'une pompe centrifuge, sur le refoulement de laquelle est placée une vanne motorisée qui permet de régler le débit.

Cette cuve sert en outre de support et de plan de référence pour les récipients à essayer. Ceux-ci, dont le nombre peut atteindre 7, sont reliés par canalisations souples munies ou non de vannes, à un « arbre de Noël » placé en bout de la canalisation d'arrivée des solutions de plutonium qui sont stockées en sous-cellule dans un assemblage de cylindres de diamètre sûr. La montée des solutions est assurée par un dispositif pompe centrifuge-vanne motorisée analogue à celui utilisé pour l'eau du réflecteur. La pompe plutonium sert également à assurer par circulation en circuit fermé dans le stockage une bonne homogénéisation des solutions avant emploi. La mesure du niveau de la solution dans les récipients et de l'eau du réflecteur est faite au moyen de pointes palpeuses à mieux que 0,1 mm sur une course de 1 000 mm. Les déterminations du niveau critique s'effectuent de façon classique par approches sous-critiques éventuellement contrôlées par divergence.

Expériences réalisées à l'aide de l'appareillage B

Une première série d'expériences a porté sur l'étude d'un réservoir annulaire en acier inoxydable (épaisseur de paroi 3 mm) de diamètre extérieur 500 mm et diamètre intérieur 300 mm. Elle a été suivie d'expériences sur deux réservoirs identiques en interaction.

La cavité centrale était vide ou remplie d'eau, une feuille de cadmium de 0,7 mm étant ou non plaquée sur sa paroi interne. Le réservoir était nu extérieurement ou réfléchi à sa partie inférieure et sur les côtés par un réflecteur d'eau de niveau égal à celui de la solution.

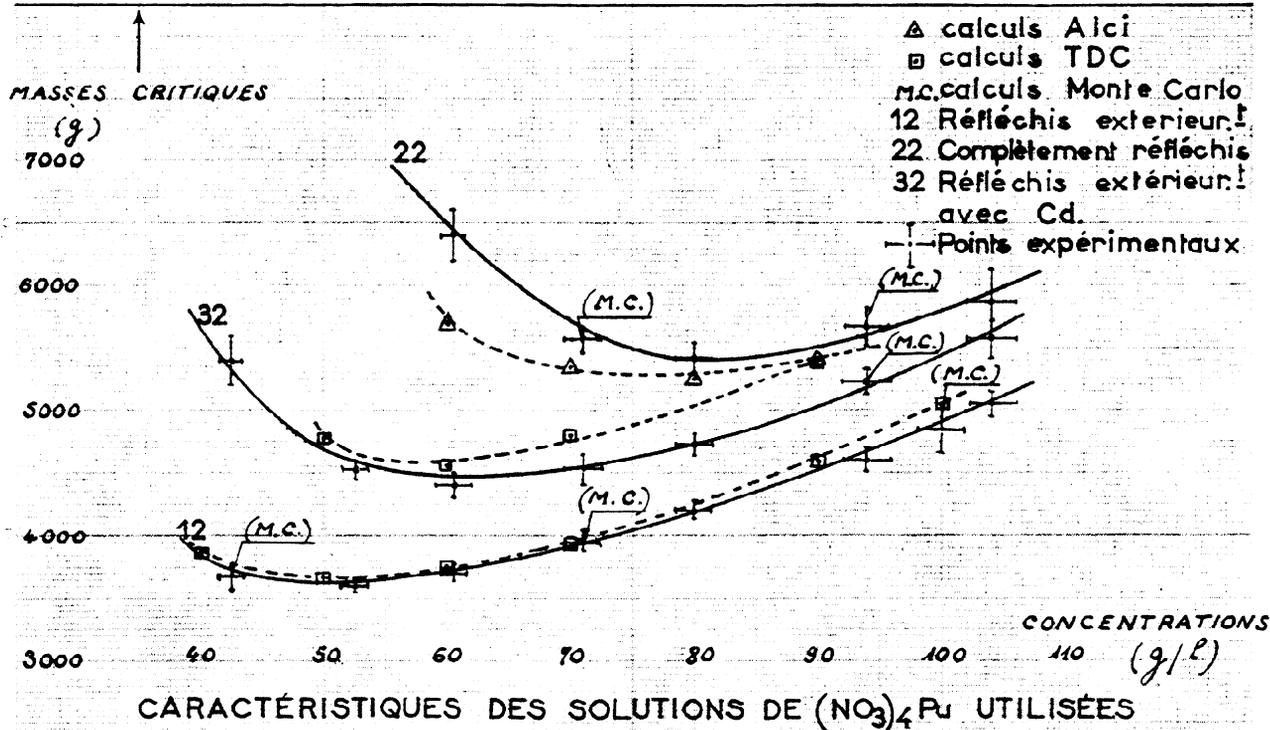
Dans le cas de deux réservoirs en interaction, l'ensemble des deux réservoirs pouvait être réfléchi en dessous et sur les côtés, l'espace entre les réservoirs étant vide.

Les expériences réalisées ensuite portent sur:

Une plaque d'épaisseur 100 mm;

Un réservoir annulaire de diamètres 500-200 mm;

Un réservoir annulaire de diamètres 500-350 mm.



Concentration Pu (g/l) ± 2%	H ⁺ N ± 2%	NO ₃ ⁻ N ± 1%	Densité mesurée à 25,8°C ± 0,1%	Teneur en Pu 240 %
104,	2,20	3,70	1,240	3,20
94,	2,15	3,59	1,222	3,20
80,	2,11	3,35	1,201	3,20
74,2	2,38	3,67	1,206	2,90
60,5	2,03	3,01	1,166	3,20
56,1	2,27	3,28	1,177	2,98
40,6	2,23	3,12	1,143	2,98

Figure 5. Cylindres annulaires isolés

La plaque et le réservoir de 500-200, ayant été expérimentés avec des solutions d'acidité de l'ordre de 4N, le seront ultérieurement avec des solutions d'acidité voisine de 2N.

Résultats obtenus

Les résultats obtenus avec les réservoirs annulaires 500-300 sont portés sur les courbes des figures 5 et 6.

Cylindre isolé

Pour une concentration donnée, le cylindre nu intérieurement est le plus réactif. Si l'on met contre la paroi interne une feuille de cadmium de 0,7 mm d'épaisseur, la configuration obtenue est plus réactive que si la cavité est pleine d'eau.

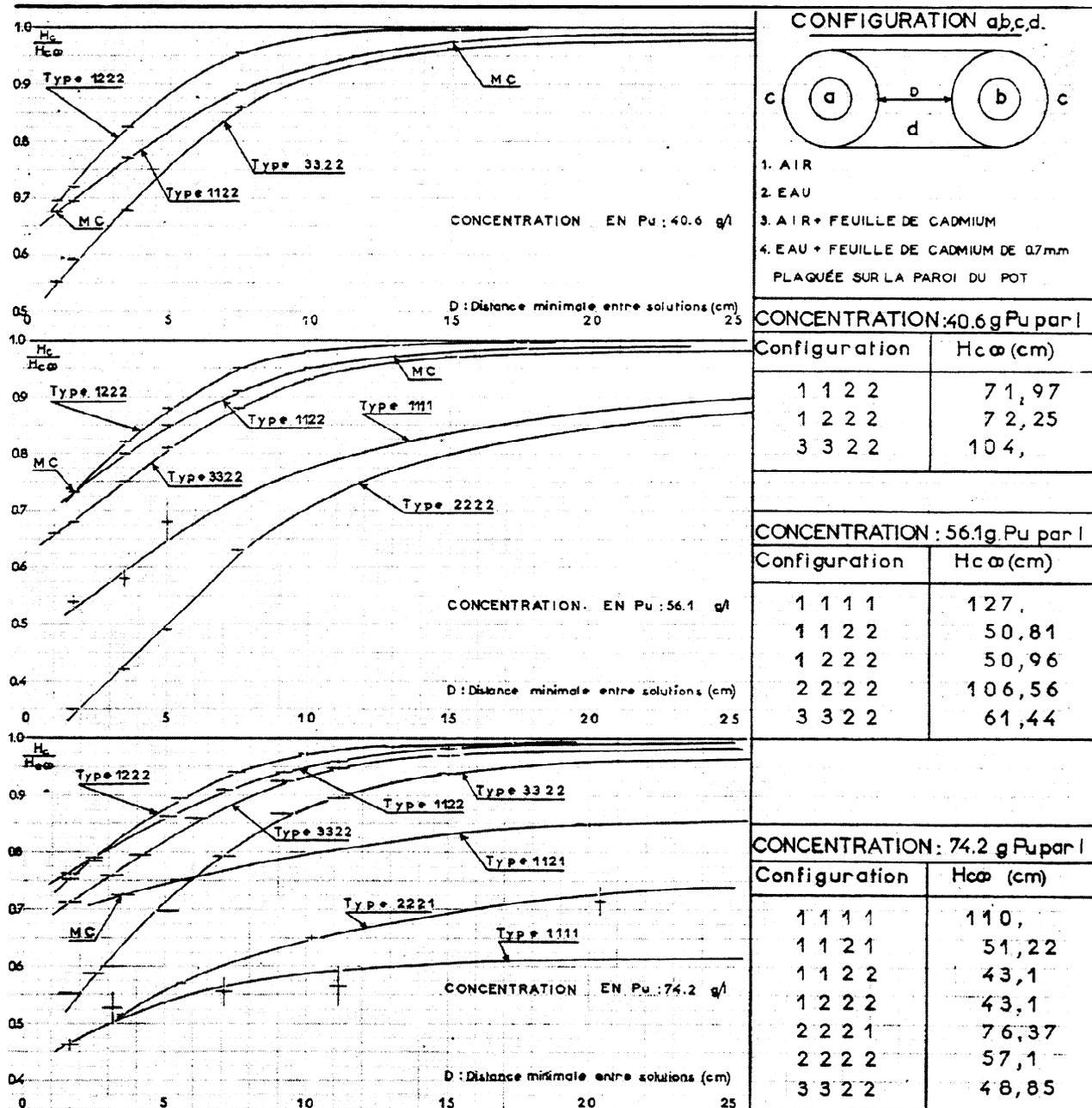


Figure 6. Interaction entre cylindres annulaires.

Courbes $H_c/H_{c\infty}$ en fonction de la distance minimale entre solutions (H_c = hauteur critique des récipients en interaction dans une configuration donnée; $H_{c\infty}$ = hauteur critique d'un récipient isolé dans la même configuration)

Cylindre en interaction

Les courbes présentées font apparaître les effets d'interaction en vue directe, ou à travers de l'eau, et leur importance relative, pour diverses distances entre les solutions.

**MÉTHODES DE CALCUL
APPLICATIONS AUX EXPÉRIENCES**

Les méthodes de calcul utilisées pour retrouver les résultats expérimentaux peuvent se diviser en trois

catégories (méthode basée sur la théorie de la diffusion, à deux groupes ou à plusieurs groupes d'énergie, sur la théorie du transport - TDC 4 groupes -, et sur la théorie des probabilités - méthode de Monte-Carlo).

**Méthodes basées sur la théorie de la diffusion
Cylindres réfléchis et cylindres nus**

Un autocode utilisant la méthode de la diffusion à deux groupes d'énergie (SEC 034) permet de retrouver les résultats de la cuve $\varnothing = 300$ mm, diversement réfléchis. On donne dans [4] les sections efficaces utilisées

pour les divers réflecteurs envisagés de cette cuve, pour une solution de plutonium.

Les calculs effectués sur les cylindres d'ALECTO ($\varnothing = 420$ et $\varnothing = 300$) se prêtent à une interprétation plus directe, par ajustement d'une probabilité de fuites $P(B^2)$ sur les courbes expérimentales. La courbe de la figure 7 donne l'allure de cette fonction permettant de retrouver les résultats expérimentaux avec les sections efficaces précédentes.

Le code ALCI (SCEA 021 S) a été utilisé pour les cylindres d'ALECTO, avec un nombre de groupes d'énergie égal à 4. Les sections efficaces utilisées sont calculées à partir du code MUFT IV sur IBM 7090.

Méthodes basées sur la théorie du transport Cylindres pleins - Cylindres annulaires

Le programme utilisé est le programme TDC à deux dimensions utilisant la méthode Sn de Carlson. Le programme TDC a servi à calculer certains cas de géométrie d'ALECTO, ainsi que les cylindres annulaires testés à Dijon avec trou intérieur rempli d'air. Pour l'ensemble des cas, la comparaison entre valeurs expérimentales et calculées, traduites en coefficient de multiplication effectif, fait apparaître des différences inférieures à 1%.

Méthode de Monte-Carlo [9]

Les problèmes pratiques rencontrés dans le domaine de la criticité présentent généralement une géométrie complexe, et ils ne peuvent être abordés par des théories de la diffusion ou du transport monodimensionnelles ou bidimensionnelles qu'en faisant des simplifications géométriques qui conduisent, en général, à surestimer excessivement la réactivité des systèmes. Les méthodes de Monte-Carlo utilisées pour la détermination de la réactivité des systèmes multiplicateurs ont l'avantage de pouvoir résoudre les systèmes complexes avec une grande fidélité géométrique. Elles sont donc largement employées dans le domaine de la criticité, et il était alors utile de voir la validité de ces méthodes appliquées aux cas expérimentaux étudiés.

Nous avons utilisé une méthode adaptée à la géométrie des cas étudiés. Les sections efficaces épithermiques sont issues de AWRE 0.28/60. Pour le domaine thermique, il y a un seul groupe et les sections efficaces pour les milieux multiplicateurs sont fournies par le code SOFOCATE, (hypothèses de Wigner et Wilkins). Pour les parois et le réflecteur (eau), des sections constantes ont été adoptées.

Etant donnés les temps de calcul par cas (20 à 30 min. sur ordinateur IBM 7094 suivant la concentration et pour une précision de 1%) il n'était pas possible d'étudier toutes les expériences; on a donc fait un choix de façon à obtenir des résultats pour des géométries très différentes et des concentrations variées.

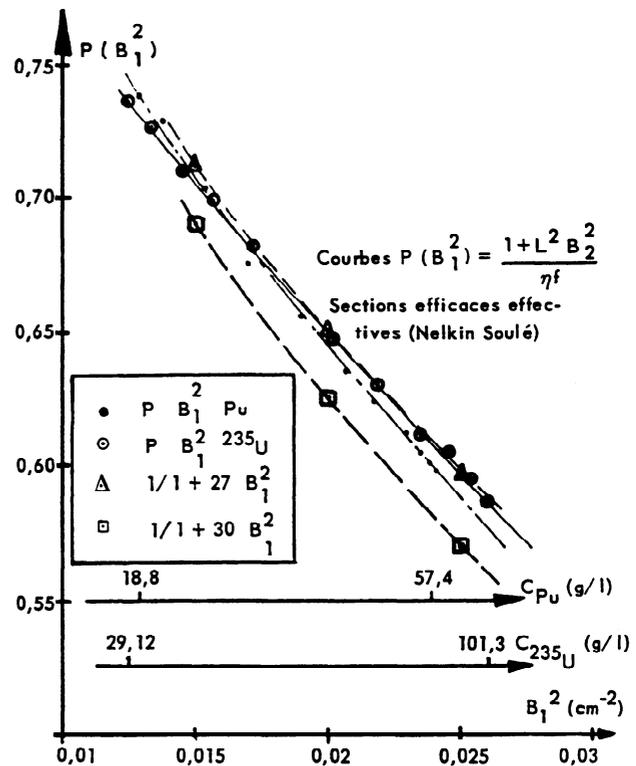


Figure 7. Ajustement réacteurs nus

Cuve \varnothing 300 et 420 mm; solutions Pu et ^{235}U

Les cas calculés sont indiqués sur les courbes expérimentales (fig. 1, 2, 5, 6): ALECTO en cuve cylindrique de 300 et 420 mm de diamètre, nue et réfléchi; cylindres annulaires 500 \times 300 mm; enfin, les cas en interaction dans l'eau et dans l'air (semi-réflexions). Pour les cas réfléchis par l'eau, une épaisseur minimale de 15 cm a toujours été prise.

Les résultats sont fournis directement en facteur de multiplication. Le rapport [9] donne les valeurs obtenues dans chaque cas avec les erreurs correspondantes. L'examen de l'ensemble des résultats ne fait pas apparaître de différences systématiques dues à la concentration: le fait que les résultats sur les cylindres pleins (cas nus) soient un peu inférieurs (1,5%) est probablement dû à quelque réflexion par les parois latérales et supérieures de l'enceinte qui n'ont pas été considérées dans les calculs.

PRÉSENTATION DU GUIDE DE CRITICITÉ APPLICATION A QUELQUES CAS PRATIQUES

Présentation du guide de criticité

On a souvent rencontré des difficultés pour garantir la sûreté nucléaire d'une installation mettant en jeu des matériaux fissiles, lorsque les problèmes de criticité n'avaient pas été envisagés suffisamment tôt au moment de sa conception. Il est alors apparu souhaitable que les personnes chargées de l'élaboration de

telles installations, en général non spécialisées, disposent d'un instrument de travail qui leur permette, dès les premiers stades des études, de tenir compte des problèmes de sûreté nucléaire et de se référer à certaines normes; tel a été l'objectif principal de ce « guide de criticité » [10].

Le projet actuel comporte essentiellement des notions de base sur les réactions en chaîne, dans des milieux isolés ou en interaction, un exposé des notions fondamentales de sécurité nucléaire, mettant en lumière les principaux paramètres de contrôle utilisés. Enfin, un chapitre pratique complète ce guide. Il donne le processus à suivre pour examiner la sûreté d'une installation, en mettant en évidence un schéma général d'étude. Des courbes critiques et sous-critiques complètent ce travail.

Application à quelques cas pratiques

La résolution des problèmes de criticité pour l'appareillage industriel de l'usine de traitement des combustibles irradiés de La Hague a été faite en appliquant les principes indiqués ci-dessus.

Un des problèmes les plus importants concerne la sécurité des batteries d'extraction. L'usine comprend deux modèles de batteries de mélangeurs-décanteurs:

— Des appareils d'un volume moyen de 300 l avec 30 cm de hauteur totale pour les deux premiers cycles de purification au TBP de la solution uranium et plutonium.

— Des appareils d'un volume de 45 l avec 10 cm de hauteur totale pour le cycle de purification avec la tri-laurylamine de la solution de plutonium après partition.

Pour les batteries de grand volume, le facteur principal de sécurité est nécessairement le contrôle de la concentration en plutonium; celle-ci est maintenue dans tous les étages à une valeur inférieure ou égale à

2 g/l, très éloignée de la valeur critique; dans ces conditions, les risques éventuels de criticité pour ces batteries très stables ne pourraient provenir que des risques d'accumulation lente de plutonium par dépôts solides. Les précautions suivantes ont donc été prises pour s'assurer que dans les opérations chimiques de telles conditions de précipitation ne peuvent se présenter:

— Vérification aussi complète que possible des schémas d'extractions sur un ensemble expérimental au 1/1 000 de l'usine (chaîne Gascogne de Fontenay).

— Adoption de schémas spéciaux pour éviter les accumulations de plutonium, en particulier dans l'extraction I, grâce à une section d'extraction complémentaire, et pour éviter l'hydrolyse du plutonium à la réextraction II par maintien d'une acidité minimum dans les appareils chargés.

— Contrôles α et neutroniques en plus du contrôle des débits et du contrôle analytique périodique.

Pour les batteries de purification finale du plutonium par une extraction à la tri-laurylamine suivie d'une réextraction sulfurique, la marge de sécurité est aussi très importante; le contrôle de la criticité utilise ici le facteur géométrique et le facteur concentration de la solution en plutonium:

— La concentration critique de ces batteries a été vérifiée expérimentalement à la station de criticité de Dijon.

— Le schéma de purification a été vérifié à l'atelier pilote de traitement des combustibles irradiés de Marcoule à l'échelle 1/5.

— Tous les mélangeurs-décanteurs peuvent être munis de compteurs à neutrons type BF_3 .

Par ailleurs, à l'usine de La Hague, toutes les batteries peuvent être vidangées intégralement et décontaminées et le contrôle du procédé est facilité par la centralisation des informations avec enregistrement numérique.

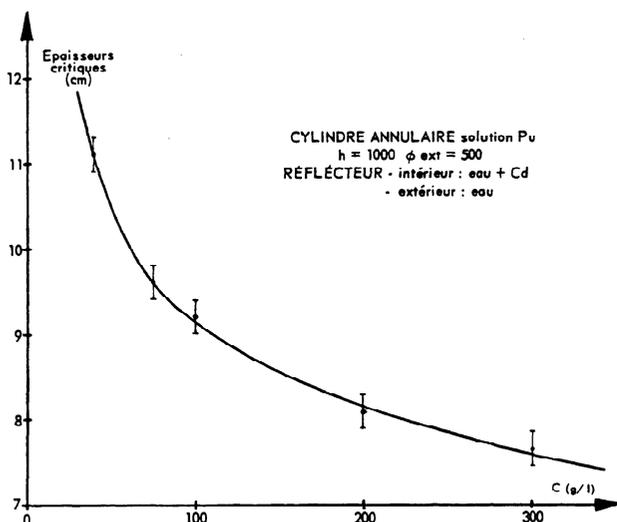


Figure 8. Epaisseur critique en fonction de la concentration

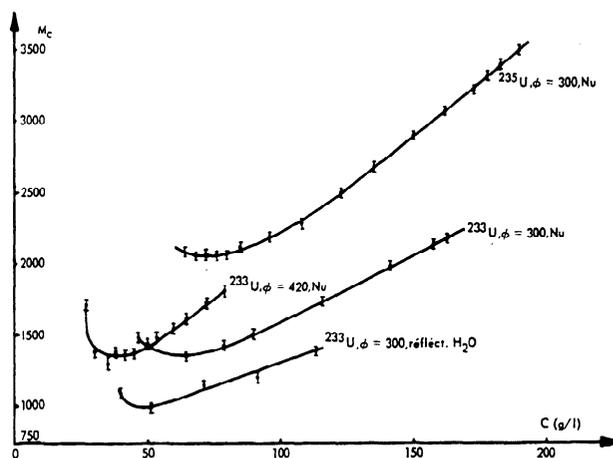


Figure 9. Masses critiques, ^{235}U et ^{233}U

Problèmes de stockage

Des expériences sur les réservoirs annulaires effectuées à Dijon, on a pu déduire un mode de calcul pour le stockage de solutions fissiles dans des configurations géométriques légèrement différentes et un domaine de concentration un peu plus étendu. Ainsi par exemple, la figure 8 donne l'épaisseur critique d'un réservoir annulaire \varnothing ext = 500 réfléchi intérieurement avec feuille de cadmium sur la paroi interne [9].

CONCLUSION

Les études de criticité présentées ici constituent une partie des travaux entrepris par le CEA dans le domaine de la sûreté nucléaire. Il paraît important de souligner que la facilité d'exploitation des installations, leur rendement et leur prix de revient ne peuvent pas être dissociés de l'aspect sûreté. Les études de sûreté doivent donc être entreprises dès la conception des installations.

BIBLIOGRAPHIE

1. Rapport de sûreté ALECTO I.
2. Rapport de sûreté ALECTO II.
3. Bruna, J., Brunet, J. P., Caizergues, R., Clouet d'Orval, C., Kremser, J., Leclerc, J., et Verriere, P., Rapport CEA 2274 (1963).
4. Bruna, J., Brunet, J. P., Clouet d'Orval, C., et Kremser, J., Rapport CEA 2453.
5. Bruna, J., Brunet, J. P., Clouet d'Orval, C., Kremser, J., Moret Bailly, J., Tellier, H., et Verriere, P., Rapport CEA 2455 (1964).
6. Brunet, J. P., Caizergues, R., Clouet d'Orval, C., Kremser, J., Moret Bailly, J., et Verriere, P., Rapport CEA 2452 (1964).
7. Bertrand, J., Breton, D., Caizergues, R., Clouet d'Orval, C., Deilgat, E., Molbert, M., et Verriere, P., *In Criticality Control in chemical and metallurgical plant*, Karlsruhe symposium, 537-552 (1961).
8. Deilgat, E., Houelle, M., Molbert, M., et Sauve, A., *Expérience de criticité sur des cylindres annulaires contenant des solutions de plutonium*, Rapport CEA 2495 (1964).
9. Ithurralde, M. F., Kremser, J., Leclerc, J., Moreau, J. M., et Robin, C., *Interprétation des expériences sur des milieux homogènes fissiles de plutonium et d'uranium*, Rapport CEA 2488 (1964).
10. Guide de criticité (à paraître).

ABSTRACT—RÉSUMÉ—АННОТАЦИЯ—RESUMEN

A/84 France

Criticality studies

By D. Breton *et al.*

Criticality studies carried out by the French Atomic Energy Commission deal on the one hand with experiments on plutonium and enriched uranium solutions and on the other hand with theoretical work on the development and use of computation methods for the resolution of the nuclear safety problems of chemical and metallurgical plants.

Since 1958, the experimental studies have been focussed on homogeneous media composed of a fissile salt dissolved in light water. Developed on the PROSERPINE reactor, the experiments were continued at Saclay on the ALECTO assemblies, where solutions of plutonium or of 90%-enriched uranium can be made critical. The results already obtained relate to critical masses of cylindrical tanks of various diameters between 20 and 50 cm, reflected in several ways (by water, concrete, etc.) at concentrations of up to 100 g/l. Physical measurements (spectra, reactor noises) and interaction measurements supplement the chemical results.

Other experiments on plutonium solutions were begun in 1963 at the Valduc Centre. They deal with the study of critical masses of solutions kept in annular vessels of 50 cm external diameter and with an internal diameter of from 10 to 30 cm. These vessels can be

reflected with water, either internally, or externally, or both internally and externally. The interaction of two such vessels has been studied for various geometries.

Slabs of various thicknesses were also studied.

The studies carried out have enabled methods of computation to be perfected which have been tried out in a number of practical ways. Particular use was made of the potentialities of calculations based on transport theory and on the Monte-Carlo method.

All these theoretical studies find application in the design and control of industrial plants from the safety angle.

A/84 Франция

Исследования критичности

Бретон *et al.*

Исследования критичности, проведенные в КАЭ, включают, с одной стороны, опыты с растворами плутония и обогащенного урана и, с другой стороны, теоретические работы, касающиеся разработки и применения расчетных методов для решения проблем ядерной безопасности, возникающих на химических и металлургических установках.

Опыты проводились начиная с 1958 года с растворами солей делящегося материала в обычной воде. Эти опыты, проведенные на реакторе PROSERPINE, были затем продолжены в Сакле на критических сборках ALECTO с растворами плутония и обогащенного до 90% урана. Полученные результаты относятся к критическим массам, набранным в цилиндрических баках диаметром от 20 до 50 см, имеющих различные отражатели (вода, бетон и т. д.) при концентрации, достигающей до 100 г/л. Физические измерения (спектров, шумов реактора) и измерения взаимодействия дополняют полученные результаты.

Другие опыты с растворами были начаты в Центре Вальдука в 1963 году. Исследовались критические массы, набранные в кольцеобразных резервуарах с внешним диаметром 50 см и с внутренним диаметром от 10 до 30 см. Эти критические сборки могут иметь отражатели внутри и снаружи или оба. Два таких резервуара были изучены во взаимодействии для различных конфигураций.

Также проводились опыты с плоскими баками различной толщины.

Проведенные исследования позволили разработать расчетные методы, которые были проверены на многочисленных экспериментальных данных. В частности, были проверены возможности расчета, основанного на теории переноса и на методе Монте-Карло. Все эти теоретические предпосылки были использованы при разработке и контроле промышленных установок с точки зрения их безопасности.

A/84 Francia

Estudios de criticidad por D. Breton et al.

Los estudios de criticidad realizados en el CEA comprenden experimentos con soluciones de plutonio

y de uranio enriquecido por una parte y, por otra, trabajos teóricos sobre la elaboración y la aplicación de métodos de cálculo destinados a resolver los problemas de seguridad nuclear planteados por las instalaciones químicas y metalúrgicas.

Los estudios experimentales versan desde 1958 sobre medios homogéneos compuestos por una sal fisible disuelta en agua ligera. Los experimentos se han preparado en el reactor PROSERPINE y han prosiguído en Saclay en los conjuntos ALECTO, en los que pueden alcanzar la criticidad soluciones de plutonio o de uranio enriquecido al 90%. Los resultados obtenidos se refieren a las masas críticas de recipientes cilíndricos de diámetro comprendido entre 20 y 50 cm, con diferentes reflectores (agua, hormigón, etc.) en concentraciones de hasta 100 g/l. Los resultados obtenidos se complementan con mediciones físicas (espectros, actividad de fondos en el reactor) y de interacción.

En el Centro de Valduc se han emprendido en 1963 otros experimentos relativos a las soluciones de plutonio. Su objeto es estudiar la masa crítica de depósitos anulares de 50 cm de diámetro exterior, y de diámetro interior variable entre 10 y 30 cm. Para estos depósitos puede utilizarse agua, tanto en el interior como en el exterior, en calidad de reflector. Dos de ellos se han estudiado en interacción para diferentes configuraciones.

Otros experimentos han tenido como objeto el estudio de placas de diversos espesores.

Los estudios emprendidos han permitido elaborar métodos de cálculo que se han verificado en varios experimentos. Se han aprovechado particularmente las posibilidades de cálculo basadas en el método de transporte y en el de Monte-Carlo. Todos estos estudios teóricos se aplican al proyecto y control de las instalaciones industriales en el plano de la seguridad.