CEA-R-3618

PREMIER MINISTRE

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

PROGRAMME CYRANO

I - DESCRIPTION ET EXPLOITATION D'UN DISPOSITIF D'IRRADIATION "CYRANO"

II - RESULTATS DES EXPERIENCES CYRANO I ET II
(Etude du crayon EL4 1er jeu)

MESURE DE L'INTEGRALE DE CONDUCTIBILITE THERMIQUE D'UO_2 FRITTE JUSQU'A 2300° C

EVOLUTION DES GAZ DE FISSION A PUISSANCE CONSTANTE

par

Jean-Pierre STORA, Pierre CHENEBAULT

DIRECTION DES PILES ATOMIQUES

Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay

Rapport CEA-R-3618

1968

SERVICE CENTRAL DE DOCUMENTATION DU C.E.A

Ja*

C.E.N-SACLAY B.P. n°2, 91-GIF-sur-YVETTE-France

CEA-R-3618 - STORA Jean-Pierre, CHENEBAULT Pierre

PROGRAMME CYRANO
I - DESCRIPTION ET EXPLOITATION D'UN DISPOSITIF D'IRRADIATION CYRANO - II - RESULTATS DES EXPERIENCES CYRANO I et II - ETUDE DU CRAYON EL 4 1er JEU - MESURE DE L'INTEGRALE DE CONDUCTIBILITE THERMIQUE D'UO_2 FRITTE JUSQU'A 2300 °C - EVOLUTION DES GAZ DE FISSION A PUISSANCE CONSTANTE

Sommaire. - L'irradiation de deux crayons combustibles type EL 4, 1er jeu, a été menée à bien dans des capsules "Cyrano" équipées de dispositifs de mesure continue de la puissance nucléaire et de plusieurs repères de températures ; la variation de l'intégrale de conductibilité thermique de l'oxyde d'uranium fritté (96 pour cent d. th.) a été

./.

CEA-R-3618 - STORA Jean-Pierre, CHENEBAULT Pierre

THE CYRANO PROGRAMME - I. DESCRIPTION AND OPERATION OF AN IRRADIATION DEVICE CYRANO - II. RESULTS OF THE EXPERIMENTS CYRANO I AND II - STUDY OF THE EL 4 FIRST-BACH PENCIL - MEASUREMENT OF THE THERMAL CONDUCTIVITY INTEGRAL FOR UO_2 SINTERED UP TO 2300 °C - EVOLUTION OF FISSION GASES AT CONSTANT POWER

Summary. - Two rods of the type "EL 4 first score" have been irradiated in "Cyrano" capsules which are suited for continuous measurement of the nuclear power evolved and equiped with thermocouples. The variations of the integral of conductivity of sintered 96 per cent theoretical dense UO_2 has been established until 2300 °C ; these variations

./.

tracée jusqu'à 2300 °C ; la courbe représentative de ces variations est cohérente avec celle obtenue précédemment hors pile.

Les gaz de fission apparus hors du combustible ont été extraits du crayon à plusieurs reprises pendant l'expérience : la cinétique d'accumulation des gaz stables est telle que dans les conditions étudiées ($T_{surface}$ 610 °C, $\int$ kdT 34,7 Wcm^{-1}) la fraction des gaz dégagés est encore largement croissante après 12 jours d'irradiation.

De nombreuses observations ont été recueillies sur la nature et la concentration des gaz rares présents en différents points du combustible irradié.

1968 114 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

---

are coherent with those previously measured out-of-pile.

The released fission gases have been recovered at different times during the irradiation : the kinetics of release of stable gases is such that, in the experimental conditions

$$(T = 610\ °C,\ \int_{T_s}^{T_c} kdT = 34{,}7\ W\ cm^{-1})$$

the fraction of released gases is still widely increasing after 12 days of irradiation.

Numerous observations have been made on concentrations of rare gases locally present in the irradiated fuel.

1968 114 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

A partir de 1968, les rapports CEA sont classés selon les catégories qui figurent dans le plan de classification ci-dessous et peuvent être obtenus soit en collections complètes, soit en collections partielles d'après ces catégories.

Ceux de nos correspondants qui reçoivent systématiquement nos rapports à titre d'échange, et qui sont intéressés par cette diffusion sélective, sont priés de se reporter à la lettre circulaire CENS/DOC/67/4690 du 20 décembre 1967 que nous leur avons adressée, et qui précise les conditions de diffusion.

A cette occasion nous rappelons que les rapports CEA sont également vendus au numéro par la Direction de la Documentation Française, 31, quai Voltaire, Paris 7e.

PLAN DE CLASSIFICATION

1. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES ISOTOPES ET DES RAYONNEMENTS

2. BIOLOGIE ET MEDECINE

2. 1 Biologie générale
2. 2 Indicateurs nucléaires en biologie
2. 3 Médecine du travail
2. 4 Radiobiologie et Radioagronomie
2. 5 Utilisation des techniques nucléaires en médecine

3. CHIMIE

3. 1 Chimie générale
3. 2 Chimie analytique
3. 3 Procédés de séparation
3. 4 Radiochimie

4. ETUDES DU DOMAINE DE L'ESPACE

5. GEOPHYSIQUE, GEOLOGIE, MINERALOGIE ET METEOROLOGIE

6. METAUX, CERAMIQUES ET AUTRES MATERIAUX

6. 1 Fabrication, propriétés et structure des matériaux
6. 2 Effets des rayonnements sur les matériaux
6. 3 Corrasion

7. NEUTRONIQUE, PHYSIQUE ET TECHNOLOGIE DES REACTEURS

7. 1 Neutronique et physique des réacteurs
7. 2 Refroidissement, protection, contrâle et sécurité
7. 3 Matériaux de structure et éléments classiques des réacteurs

8. PHYSIQUE

8. 1 Accélérateurs
8. 2 Electricité, électronique, détection des rayonnements
8. 3 Physique des plasmas
8. 4 Physique des états condensés de la matière
8. 5 Physique carpusculaire à haute énergie
8. 6 Physique nucléaire
8. 7 Electronique quantique, lasers

9. PHYSIQUE THEORIQUE ET MATHEMATIQUES

10. PROTECTION ET CONTROLE DES RAYONNEMENTS. TRAITEMENT DES EFFLUENTS

10. 1 Protection sanitaire
10. 2 Contrôle des rayonnements
10. 3 Traitement des effluents

11. SEPARATION DES ISOTOPES

12. TECHNIQUES

12. 1 Mécanique des fluides - Techniques du vide
12. 2 Techniques des températures extrêmes
12. 3 Mécanique et outillage

13. UTILISATION ET DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE ATOMIQUE

13. 1 Centres d'études nucléaires, laboratoires et usines
13. 2 Etudes économiques, programmes
13. 3 Divers (documentation, administration, législation, etc...)

Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2 200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 31, qual Voltaire, PARIS VIIe.

The C.E.A. reports starting with n° 2 200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 31, quai Voltaire, PARIS VIIe.

- Rapport CEA-R-3618 -

Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay
Département de Métallurgie
Service de Chimie des Solides
Section des Combustibles Céramiques

PROGRAMME CYRANO

I - DESCRIPTION ET EXPLOITATION D'UN DISPOSITIF D'IRRADIATION "CYRANO"

II - RESULTATS DES EXPERIENCES CYRANO I ET II

(Etude du crayon EL4 1er jeu)

MESURE DE L'INTEGRALE DE CONDUCTIBILITE THERMIQUE
D'UO_2 FRITTE JUSQU'A 2300°C
EVOLUTION DES GAZ DE FISSION A PUISSANCE CONSTANTE

par

Jean-Pierre STORA, Pierre CHENEBAULT

Rapport DM/1692, janvier 1968

- Septembre 1968 -

INTRODUCTION

Le programme Cyrano a été entrepris dans le but de fournir des informations complémentaires sur le bioxyde d'uranium en vue de son utilisation dans les réacteurs de puissance du programme français.

Son objectif essentiel est à la fois la connaissance des profils de température qui s'établissent lorsque la géométrie du combustible, la puissance dissipée, la pression appliquée sont celles que l'on attend pour différentes phases de fonctionnement du réacteur EL4 et la détermination des quantités de gaz de fission émis dans ces conditions.

Mais le programme Cyrano comporte également l'examen des possibilités d'utilisation de l'UO_2 à des puissances spécifiques plus élevées que dans EL4 et ceci en utilisant des oxydes de densités relativement basses (10 - 10,2 - 10,4) dont l'emploi peut être envisagé lorsque l'on désire obtenir des taux de combustion supérieurs à 20.000 MWj/t.

Certes les nombreuses expériences faites tant en France qu'à l'étranger ont déjà fourni beaucoup de résultats. Ainsi pour ce qui est de la conductibilité thermique une réunion d'experts a fait récemment le point (1) tant des informations acquises que des questions restées sans réponses. De même a été publiée une analyse critique des résultats connus relatifs au comportement des gaz de fission dans les crayons fermés (2) : elle met en évidence l'inquiétante dispersion des points expérimentaux. Dans chacun de ces domaines, les paramètres élémentaires (températures, puissances,..) sont souvent mal mesurés et de plus, il semble que leur dénombrement ne soit pas définitivement établi ; on soupçonne en effet certains facteurs tels que gradient thermique, contraintes mécaniques, succession des différents niveaux de puissance ... d'avoir une influence propre.

Dans les dispositifs Cyrano nous avons donc avant tout recherché une évaluation aussi complète et précise que possible des différents paramètres examinés. En particulier, ont été faites trois mesures indépendantes des puissances dégagées en fonction du temps, les températures ont été effectivement repérées au sein du combustible durant le fonctionnement, les gaz de fission ont été analysés isotope par isotope pour chaque niveau de puissance et les analyses faites au sein du combustible après irradiation ont permis d'établir le bilan complet relatif à chaque espèce gazeuse.

Globalement le programme Cyrano, aujourd'hui terminé, a comporté sept expériences couvrant 10.000 heures de fonctionnement. Cinq densités différentes d'UO_2 ont été comparées ; les températures repérées au coeur du combustible étaient variables entre 400°C et 2200°C. Après chaque irradiation on a procédé à de nombreux examens micrographiques et analyses de produits de fission.

Ce premier rapport expose les résultats relatifs aux deux premières expériences ; on y trouve essentiellement une évaluation de la conductibilité thermique de l'UO_2 de densité 10,58 en géométrie de crayon* jusqu'à 2200°C et une analyse du dégagement des gaz de fission stables et radioactifs en fonction du temps.

*

* *

* type EL4 première charge.

I - DISPOSITIF ET TECHNIQUES DE MESURE

A - DESCRIPTION DU DISPOSITIF*

La figure 1 montre une vue d'ensemble du dispositif : la partie basse est une capsule de 4 m environ de hauteur et de diamètre extérieur 34,4 mm qui prend place dans les "boites à eau" du réacteur piscine Siloé ; elle est renouvelée à chaque irradiation. La partie haute qui s'y raccorde par une bride est récupérable : c'est une perche de 6 m de longueur formée de deux tubes de diamètres différents entretoisés, dans lesquels passent les différents tubes et conducteurs de liaison aux organes situés hors pile, et terminée par une "tête de boucle" contenant les manomètres et les prises multibroches des connexions électriques.

De cette tête de boucle partent en zone expérimentale, d'une part les cables vers les baies qui contiennent les instruments de mesure, l'alimentation électrique et les dispositifs de sécurité, d'autre part la tuyauterie vers les bouteilles de gaz et vers la cellule de récupération des gaz de fission.

* Le dispositif Cyrano a été étudié par le Service des Piles et réalisé par les Ateliers de Mécanique du CEN Grenoble (3). Les Sections d'Etude des Eléments Combustibles" et des "Techniques Avancées" des Services de Technologie du Département de Métallurgie ont collaboré à sa conception et à sa réalisation en ce qui concerne les liaisons métallurgiques délicates.

La figure 2 montre une vue éclatée de l'extrémité destinée à être irradiée. Le crayon constitué par un empilement de pastilles d'UO_2 gainées d'acier inoxydable, baigne dans un mélange de sodium et de potassium ; le métal liquide qui assure l'évacuation de la chaleur et permet l'application d'une pression hydrostatique sur le crayon combustible est contenu dans un tube étanche autour duquel est disposé un ensemble calorimétrique.

Cet ensemble est constitué d'une première résistance thermocoax Sodern 1 NC I 15 bobinée à spires lâches sur une hauteur de 130 mm et symétriquement par rapport au plan médian du crayon ; cette résistance permet de dissiper une puissance de 2 KVA. Sur un shoopage rectifié de nickel-chrome qui noie la résistance chauffante, est disposée en épingle, sur une hauteur de 180 mm, une résistance en thermocoax Sodern 1 NAC 10, qui permet de mesurer la puissance dissipée dans le volume qu'elle délimite. L'utilisation de ces deux résistances est précisée plus loin.

La résistance de mesure, noyée dans un shoopage de nickel-chrome rectifié, et par conséquent tout le volume interne, sont isolés thermiquement du tube extérieur de la capsule par un bourrage de laine de fer comprimée, de densité choisie pour assurer l'isolement thermique désiré ; la conductibilité thermique du gaz qui le baigne permet d'ajuster la valeur de cet isolement ; dans la pratique les gaz choisis ont été l'hélium ou l'azote.

La partie basse de la capsule contient trois enceintes étanches indépendantes :

a) - le crayon combustible, ou enceinte basse pression, rempli d'hélium sous une pression absolue d'environ 600 mm de Hg, surmonté de deux tubes concentriques dont l'un formant bouchon. Ces tubes permettent un balayage du volume d'expansion ménagé au-dessus de l'empilement de pastilles, où s'accumulent les produits de fission gazeux pendant l'irradiation. Les gaz de fission peuvent ainsi être extraits et recueillis dans une cellule de récupération qui sera décrite plus loin.

b) - l'enceinte contenant le Na-K est un tube d'inox NS-22 S ; au-dessus du Na-K, dans lequel est immergé le crayon, est appliquée une pression d'hélium de 60 bars. La mise sous pression se fait peu de temps avant l'irradiation par l'éclatement d'une fine membrane métallique qui constituait une protection étanche pour le Na-K.

c) - l'enceinte extérieure a été réalisée en acier inoxydable type 304-L dans Cyrano I, puis en zircaloy-2 dans les capsules suivantes ; elle travaille à basse température sous 50 bars de pression d'hélium, ce qui limite les contraintes mécaniques du tube d'acier inox contenant le Na-K, déjà sollicité par des contraintes thermiques.

Les différences de pression existant entre ces trois enceintes permettent la détection de fuites éventuelles et facilitent la mise en oeuvre des organes de sécurité.

B - MESURES THERMIQUES

1°) - Les températures

Le crayon est équipé de cinq thermocouples : deux sont placés dans l'UO_2 dans le plan médian de l'empilement, l'un au centre, l'autre en périphérie; les trois autres thermocouples sont fixés sur la gaine, deux dans le plan médian, le troisième à quelques millimètres sous le niveau du NaK pour en signaler la fuite accidentelle.

Quatre autres thermocouples, situés toujours dans le plan médian entre les épingles de la résistance de mesure, permettront, comme on le verra, un étalonnage dans un plan. Les forces électromotrices de tous ces thermocouples sont mesurées par des millivoltmètres potentiomètres MECI enregistreurs, type Speedomax.

2°) - La puissance

Pour mesurer la puissance on se sert de la résistance de mesure qui fonctionne en thermomètre à résistance : on relie une valeur de résistance électrique à une valeur d'énergie calorifique qui prend naissance à l'intérieur du volume délimité par la résistance de mesure R ; on étalonne ainsi le dispositif en dissipant des quantités de chaleur, parfaitement mesurées, dans la résistance chauffante et on trace une courbe $p = f(R)$. Dans la pratique, la puissance électrique disponible étant faible par rapport à la puissance nucléaire dissipée dans le crayon au régime envisagé, on procède comme suit :

a) - Etalonnage

Le dispositif étant dans le coeur de la pile dans les conditions normales de refroidissement, mais la puissance nucléaire étant nulle on mesure Ro ; puis on délivre successivement des puissances électriques p_1, p_2 .., p_n, au moyen de la résistance chauffante, et on mesure à l'aide d'un pont de Wheatstone, les valeurs R_1, R_2 .. R_n que prend la résistance de mesure R, on trace $p = f(R)$. Puis la puissance électrique étant nulle, la pile diverge et marque un palier à puissance telle que la résistance de mesure prenne une valeur $Ro < Ri < Rn$; on admet alors qu'à Ri correspond une puissance nucléaire égale à p_i interpolée sur la courbe d'étalonnage initiale. Puis, la puissance de la pile restant stable, on chauffe comme précédemment avec la résistance, pour poursuivre l'étalonnage jusqu'à un deuxième palier de pile, etc ...

On peut aussi étalonner le dispositif de la même manière que précédemment mais en traçant $p = f(\overline{T_1})$, $\overline{T_1}$ étant la moyenne des températures indiquées par les quatre thermocouples logés dans la laine de fer, au niveau de la résistance de mesure.

La validité de ces étalonnages est discutée en annexe I.

b) - Mesure

Le calcul de la puissance se fait de la manière suivante : lors de la construction du dispositif on a mesuré au pont de Wheatstone

la valeur de la résistance chauffante seule, puis la valeur totale de la résistance après soudure des conducteurs de liaison ; on admet que toute variation de résistance mesurée est due à l'élément chauffant, la résistance des lignes restant invariable pendant le temps de l'étalonnage.

Pour calculer la puissance, on écrira donc :

$p = VI - rI^2$

où V et I sont la tension et l'intensité mesurées avec des appareils pour courants alternatifs de classe 0,5 et r la résistance des lignes. On mesure la puissance à ± 2 %.

c) - Discrimination des échauffements

L'étalonnage thermique fait correspondre à un R mesuré une puissance globale Q qui peut être décomposée comme suit :

Q_1 - puissance calorifique déposée par les neutrons et les rayonnements β et γ provenant de la fission de l'uranium. La connaissance de Q_1 est nécessaire pour calculer le nombre de fissions.

Q_2 - puissance calorifique déposée dans l'UO_2 par les rayonnements provenant de l'environnement.

La somme Q_c de ces deux termes représente l'énergie déposée dans le combustible ; sa connaissance sert de base au calcul de la puissance spécifique moyenne et de l'intégrale de conductibilité.

Q_3 - puissance calorifique déposée par les γ dans les matériaux de structure à l'intérieur du volume délimité par la résistance de mesure.

Q_4 - puissance calorifique déposée par les neutrons (réaction n, γ) dans le volume défini ci-dessus.

$Q_s = Q_3 + Q_4$ est l'énergie déposée dans les structures à l'intérieur du volume délimité par R.

La mesure de R permet d'atteindre : $Q = Q_c + Q_s$

La discrimination entre les différentes sources d'énergie calorifique est basée sur la mise en oeuvre de techniques indépendantes : mesures spécifiques des flux de neutrons et des flux γ à proximité de la capsule, étalonnage des flux de neutrons sur maquette irradiée à basse puissance, mesures relatives par activation d'argon ; ces méthodes permettent d'obtenir, généralement avec une bonne approximation, les composantes de la puissance globale mesurée. Les techniques dosimétriques utilisées pour les expériences Cyrano I et II et les résultats des mesures sont donnés en annexe II.

C - RECUEIL ET MESURE DES GAZ DE FISSION

1°) - Circuit de recueil

Le schéma de l'installation de prélèvements est représenté sur la figure 3. Elle comprend essentiellement une cellule blindée contenant une pompe Toepler et des capacités de stockage reliées au crayon de combustible par des canalisations métalliques. La pompe Toepler utilisée, d'un type un peu particulier, est représentée en figure 4. Elle est réalisée en verre.

Pendant l'irradiation le combustible est maintenu dans une atmosphère d'hélium purifié sous une pression de 600 mm Hg.

2°) - Techniques de prélèvement

Les gaz émis par le combustible sont prélevés en cours de fonctionnement ou pendant les périodes d'arrêt du réacteur ; deux techniques ont été utilisées :

a) - Prélèvement sous vide partiel

On extrait les gaz à l'aide de la pompe Toepler jusqu'à abaisser la pression à 10 mm de mercure, puis après une purge réalisée avec l'hélium contenu dans la capacité située en tête de capsule, on fait une seconde extraction semblable à la première ; la totalité des gaz

extraits est homogénéisée à l'aide de la pompe Toepler et stockée dans une des capacités métalliques situées dans l'enceinte en plomb.

On a trouvé, tant au laboratoire qu'avec le dispositif Cyrano I, que cette technique permettait d'extraire la totalité des gaz dégagés dans le crayon. La durée d'un tel prélèvement est d'environ 30 minutes.

b) - Prélèvement par balayage

Il consiste à repousser les gaz, à l'aide d'un courant d'hélium purifié, dans la pompe Toepler et une capacité préalablement vidées. Après homogénéisation, les gaz sont stockés dans la capacité métallique. Un tel prélèvement a une durée de 3 à 5 minutes.

En laboratoire on a trouvé en circuit-maquette que ce type de prélèvement avait un excellent rendement (de l'ordre de 98 %). Par contre, dans Cyrano II, le rendement de l'extraction n'est que de 80 %. Cette différence d'efficacité s'explique par une erreur de montage : la partie plongeante du tube amenant l'hélium de balayage à la base du volume d'expansion des gaz ayant été oubliée dans cette capsule. Le prélèvement par balayage a été finalement retenu après essais, pour les raisons explicitées en annexe III.

3°) - Piégeage et mesure

Les gaz contenus dans la capacité métallique et dans les canalisations intérieures à la cellule en plomb sont piégés, après décroissance, sur du charbon actif, à la température de l'azote liquide.

a) - Gaz rares

Les xénons et kryptons de fission sont analysés par spectrométrie γ et par spectrométrie de masse.

Les analyses de xénons et kryptons par spectrométrie γ sont grandement facilitées si on les sépare préalablement par chromatographie gazeuse. Les isotopes à vie courte ^{135}Xe et ^{85m}Kr sont déterminés par rapport au ^{133}Xe sur une faible fraction (environ 10^{-4}) du prélèvement. ^{133}Xe et ^{85}Kr sont mesurés après décroissance dans la totalité du prélèvement.

L'analyse par spectrométrie de masse procure une mesure des xénons stables ^{131}Xe, ^{132}Xe, ^{134}Xe, ^{136}Xe, des kryptons stables ^{83}Kr, ^{84}Kr, ^{86}Kr et du ^{85}Kr radioactif de longue période (10,76 ans)*.

b) - Halogènes

Des extractions effectuées lorsque le réacteur ne fonctionne plus (fin d'irradiation ou chute de barres) permettent de déterminer les quantités minimales d'iodes déposées dans les tuyauteries du dispositif.

* Ces analyses sont effectuées par le laboratoire du Service des Isotopes Stables du Département de Physico-Chimie.

II - EXPERIENCE A BASSE PUISSANCE RESULTATS CONCERNANT CYRANO I

Le dispositif Cyrano I a été irradié pendant trois cycles :

- du 24 mai au 14 juin 1965
- du 21 juin au 12 juillet 1965
- du 6 septembre au 27 septembre 1965

dans le trou grille 51 du réacteur Siloé à Grenoble, respectivement en positions 1, 4 et 3 de la boite à eau (fig. 5).

A - DEFINITIONS PARTICULIERES ET CONDITIONS EXPERIMENTALES

1°) - Le combustible et le crayon

Leurs caractéristiques précises sont définies en annexe IV.

2°) - Atmosphère gazeuse

Dans les trois circuits on a utilisé de l'hélium purifié sur tamis moléculaire. La pression interne du crayon était de 600 mm de Hg absolus ; la pression dans l'enceinte Na-K de 60 bars. La pression dans l'enceinte extérieure était de 50 bars. Ces conditions ont été inchangées pendant toute la durée des trois cycles. Toutefois le gaz de remplissage de l'enceinte extérieure, initialement de l'hélium, a été remplacé au troisième cycle par de l'azote pour augmenter l'isolement thermique du dispositif.

B - MESURES THERMIQUES

1°) - Etalonnage

Le tableau I, donné à titre d'exemple, et les courbes des figures 6, 7 et 8 rassemblent et illustrent les données thermiques. Les valeurs moyennes des températures indiquées par les thermocouples placés dans la laine de fer ont été indiquées pour mémoire (voir annexe I).

2°) - Résultats

Le tableau II donne, pour les trois positions occupées successivement par la capsule, la puissance mesurée et ses différentes composantes calculées, d'une part d'après des mesures de dosimétrie par activation de détecteurs effectuées dans la géométrie réelle, d'autre part d'après la connaissance du flux de neutrons et du flux γ dans la boite à eau, en position 1, 3 ou 4. Une boucle à activation d'argon disposée autour de la capsule a permis de faire des recoupements (voir annexe II). Enfin les dosages quantitatifs de gaz de fission de période longue formés dans le combustible, exposés au paragraphe suivant, ont également fourni des informations indépendantes.

La puissance déposée dans le combustible n'est que de 50 à 60 % de la puissance totale mesurée ; elle est estimée à 10 - 12 % près.

La température mesurée dans le combustible n'a pas dépassé 920°C. L'analyse des évolutions de température et de puissance montre qu'à la précision près de ces mesures, les intégrales de conductibilité que l'on en déduit sont cohérentes avec les mesures faites précédemment (4).

Nous avons également évalué la chute de température dans l'interface UO_2-gaine : le flux calorifique superficiel variait de 30 à 40 W cm^{-2} ; la résistance thermique, de 1,35°C W^{-1} cm^2 pour une température de gaine de 280°C s'abaisse à 1,1°C W^{-1} cm^2 lorsque la gaine est à 450°C.

Enfin nous avons tenté de mettre en évidence l'effet de l'irradiation sur la conductibilité thermique :

le tableau III donne les températures relevées au début du premier cycle d'irradiation, les doses d'irradiation exprimées en fissions/cm^3, ainsi que le paramètre $\frac{Q}{T_c - T_e}$, proportionnel à la conductibilité thermique moyenne de l'UO_2 dans l'intervalle de température considéré, qui est resté stable. Aucun effet notable n'est visible qui traduirait une variation de la conductibilité thermique du matériau lorsque la dose augmente jusqu'à $3,7.10^{18}$ fissions par cm^3. D'après les résultats admis de la littérature (5, 6) pour de tels taux d'irradiations, aux températures de l'UO_2 indiquées, on devrait s'attendre à une diminution de conductibilité thermique de l'ordre de 15 %.

Nous avons ensuite porté la température de l'oxyde à 500°C en moyenne (T_c = 552°C ; T_s = 460°C), pendant 24 heures, à l'aide de la résistance chauffante. On remarquera sur le tableau III, qu'après ce recuit, la conductibilité thermique moyenne demeure inchangée, ce qui est logique.

C - GAZ DE FISSION

1°) - Flux neutroniques et taux de combustion

On sait que plus de 99 % des gaz de fission sont retenus par le combustible dans les conditions d'irradiation de Cyrano I.

Après irradiation, un échantillon du combustible a été prélevé et dissous à 700°C dans du pyrosulfate de potassium fondu. Les gaz de fission, totalement dégagés dans cette opération ont été analysés par spectrométrie γ.

La mesure du ^{133}Xe (période 5,27 jours) a fourni une indication sur le flux neutronique moyen durant le troisième cycle ; on a trouvé 3.10^{13} n cm^{-2} s^{-1}.

La mesure du ^{85}Kr (10,76 années) dans le gaz recueilli permet de connaitre le nombre de fissions pendant les trois cycles ; avec cette valeur on calcule le flux neutronique moyen qui est :

$Q = 2,5.10^{13}$ n cm^{-2} s^{-1}

La concordance entre ces valeurs et celles déduites des données thermiques est bonne (tableau II) ; aussi avons-nous utilisé ces dernières pour l'exploitation des résultats.

2°) - Prélèvements des gaz de fission

Le schéma de la figure 9 indique, en regard de l'histoire de l'irradiation, les prélèvements effectués.

Les tableaux IV, V et VI rassemblent les résultats relatifs aux gaz prélevés durant les trois cycles d'irradiation de Cyrano I.

Dans ces tableaux figurent :

- les nombres d'atomes de ^{133}Xe recueillis dans chaque prélèvement
- les nombres d'atomes de xénon qui se seraient accumulés hors du combustible si l'on n'avait pas fait de prélèvements
- le rapport des quantités de ^{133}Xe dégagé au ^{133}Xe présent (F)
- les quantités de ^{133}Xe dégagées sous forme xénon (ces valeurs sont déduites des quantités d'iode qui s'accumulent dans la boucle et dont on mesure la décroissance en xénon à la fin de l'irradiation)
- le dégagement moyen par seconde lors de chaque prélèvement ; cette valeur a l'avantage de rendre le résultat de chaque prélèvement comparable aux autres.

Enfin on a porté des résultats concernant le ^{135}Xe et le ^{85m}Kr obtenus dans le deuxième et le troisième cycle.

1er cycle

Le tableau IV montre qu'aux températures considérées (inférieures à 600°C) la fraction de gaz dégagés est vraiment très faible : de l'ordre de 5.10^{-5} à l'équilibre. De plus une partie importante du xénon recueilli a été dégagée sous forme d'iode.

En figure 10, nous avons représenté, d'une part la cinétique de dégagement de ^{133}Xe trouvé expérimentalement, d'autre part deux courbes théoriques correspondant respectivement, pour le même isotope, à une émission par recul seul et à une émission par éjection ("knock-out") conformément aux conclusions d'Hairion (*).

La comparaison suggère une intervention prépondérante de ce dernier mécanisme.

2ème cycle

La figure 11 représente la variation du taux moyen d'émission (en nombre d'atomes/sec.) de ^{133}Xe, ^{135}Xe et ^{85m}Kr correspondant à chaque prélèvement. Les deux tracés relatifs à ^{135}Xe représentent les deux possibilités offertes suivant que cet isotope reste dans le flux neutronique ou migre dans les canalisations où il n'est plus soumis au flux et donc ne se transforme plus en ^{136}Xe stable.

a) - le prélèvement 10 et le prélèvement 11 ont été effectués alors que le dispositif était chauffé à l'aide de la résistance de chauffage. Sur les trois isotopes le dégagement est légèrement plus important.

* travaux non publiés (à paraître).

b) - les prélèvements de courte durée indiquent un dégagement plus important de ^{133}Xe ; comme cela est discuté en annexe III l'élévation de température (due à la technique de prélèvement par le vide) peut être responsable de cet effet particulièrement sensible lorsque la durée du prélèvement n'est pas très courte par rapport à la durée du palier de puissance. Ce type de prélèvement est donc à proscrire.

c) - si l'on suppose que le gaz reste dans le flux de neutrons, aux pics de ^{133}Xe correspondent des creux pour ^{135}Xe, ce qui est pour nous sans explication. Par contre, si l'on considère que les gaz rares migrent dans les canalisations pour se placer hors du flux neutronique, nous voyons que les dégagements de courte durée contiennent des bouffées de cet isotope (à une petite anomalie près dans le prélèvement 10, certainement due à un mauvais comptage, car cette anomalie se retrouve sur le ^{85m}Kr).

Cette migration des gaz a également eu lieu dans le dispositif Cyrano II, jusqu'à provoquer une activité autour de la tête de boucle. Dans les dispositifs suivants nous avons dû placer sur les canalisations des vannes électromagnétiques immergées, pour supprimer la remontée des gaz jusqu'à la surface libre de la piscine.

3ème cycle

Lors de ce cycle l'hélium baignant la laine de fer à l'extérieur du NaK a été remplacé par de l'azote plus isolant, et les températures repérées par les couples placés dans le combustible sont plus élevées que lors des deux premiers cycles.(voir figure 9).

Les quantités de gaz recueillies sont indiquées dans le tableau VI.

La figure 12 représente le dégagement moyen par seconde de ^{133}Xe et de ^{135}Xe.

Nous ne donnons pas pour ce cycle la fraction dégagée (rapportée à la quantité existant dans l'échantillon) car les prélèvements 21 et 24 sont inexploitables (fuites sur les pièges). Il faut cependant constater que les quantités sorties sont absolument comparables aux deux premiers cycles : la fraction dégagée est encore de l'ordre de 5.10^{-5}.

Lors des prélèvements 23, 24, 25 la capsule étant maintenue sous vide (10 mm de mercure) le dégagement moyen n'est pas très accru. Ceci confirme que la température du combustible, lorsqu'elle est inférieure à 1000°C, n'est pas un paramètre très important pour le dégagement des gaz de fission.

3°) - Conclusions

Les conclusions à tirer du fonctionnement de Cyrano I, en ce qui concerne le dégagement des gaz, lorsque l'irradiation a lieu à une température inférieure à 1000°C, sont les suivantes :

- le taux de dégagement est très faible, inférieur à 10^{-4}, au moins tant que le taux d'irradiation reste petit ($< 10^{19}$ fissions cm^{-3}).
- les gaz ne restent pas confinés dans la capsule, mais migrent dans les canalisations.
- le dégagement a lieu en grande partie sous forme de prédécesseur (au moins lorsque la période de celui-ci n'est pas très courte).
- un accroissement de température augmente peu le taux d'émission des atomes de gaz de fission,
- deux mécanismes d'émission sont probablement responsables : le recul des fragments de fission et l'éjection, ce dernier étant prépondérant.

III - EXPERIENCE A PUISSANCE ELEVEE RESULTATS CONCERNANT CYRANO II

Le dispositif Cyrano II est analogue à Cyrano I, à quelques détails près :

- modification des bouchons
- mise en place d'un moniteur de flux
- remplacement du shoopage nickel-chrome par un shoopage de molybdène absorbant moins les neutrons
- remplacement de la laine de fer par de l'inox fritté
- remplacement du tube extérieur de la capsule en inox, sur une longueur de 500 mm, par un tube de zircaloy (utilisation d'un joint diffusé)
- adjonction d'un troisième fil sur la résistance de mesure pour éliminer d'éventuelles variations de la résistance des lignes (incorporation de chaque ligne dans une branche du pont de Wheatstone).

La définition complète du crayon est donnée en annexe V.

A - HISTORIQUE DE L'IRRADIATION

Le dispositif a été irradié dans le trou 51 de Siloé en position 3 de la boite à eau (figure 5).

L'irradiation a débuté le 30 mars 1966 vers 14 heures ; le réacteur a augmenté sa puissance par paliers successifs pour permettre l'étalonnage. Le palier à 15 MW a été atteint vers 19 heures et maintenu jusqu'à 20 h 30.

Le 1er avril après une montée en puissance par paliers de courte durée, le dispositif a fonctionné à pleine puissance entre 12 h et 21 h 40, heure à laquelle il a dû être retiré de sa position d'irradiation, par suite d'un défaut d'étanchéité entre les enceintes haute pression et basse pression.

Puis Cyrano II, dont les enceintes avaient été remises à la pression atmosphérique, a été irradié le 25 avril entre 10 h et 17 h pour mesures dosimétriques.

Enfin il a été remis en pile pour un second cycle de Siloé, sans pression sur la gaine et sans indications des thermocouples logés dans le combustible.

La figure 13 montre les variations de la puissance Q_c et de la température centrale, pour le premier cycle d'irradiation. Les prélèvements de gaz de fission y sont également repérés.

B - MESURES THERMIQUES

1°) - Etalonnage

Les résultats de l'étalonnage thermique du dispositif effectué au début du premier cycle se trouvent représentés figure 14. Le principe de dépouillement a été exposé précédemment.

Remarque

Lors de l'étalonnage, la valeur de la résistance de mesure est déterminée au moyen d'un pont de Wheatstone AOIP (R_p). Au cours de l'irradiation elle est enregistrée, pendant la durée du cycle, sur un enregistreur MECI speedomax (R_m) ; on se sert d'un pont à éléments Asopreci qui fonctionne en déséquilibre et on dilate 1 ohm sur une échelle totale de MECI, soit une plage de puissance de 700 W de part et d'autre de la position d'équilibre. Ces enregistrements permettent ensuite d'intégrer la puissance dans le temps et de calculer le taux de combustion.

2°) - Discrimination des échauffements

Les données thermiques permettant de tracer une courbe intégrale de conductibilité sont rassemblées dans le tableau VII ; celui-ci appelle les remarques complémentaires suivantes :

La résistance de mesure permet de connaitre la puissance calorifique Q qui prend naissance dans le volume qu'elle délimite. Seule nous intéresse Q_c qui est dissipée dans le crayon. Pour atteindre cette valeur nous utilisons les résultats de l'expérience Cyrano I en position 51-3 ; pour une puissance de 15 MW du réacteur et pour un flux neutronique moyen perturbé de 3.10^{13} n cm^{-2} s^{-1}, la quantité de chaleur totale déposée dans les matériaux de structure considérés (Q_s) a été trouvée égale à 931 W (tableau II). Nous admettrons que cette puissance est également déposée dans Cyrano II ; notre choix

est légitime puisque la dosimétrie nous indique, pour une capsule type Cyrano II placée dans le même trou, que le flux moyen perturbé est de $3,05.10^{13}$ n cm^{-2} s^{-1} pour une puissance de pile de 15 MW.

Si on adopte cette valeur de flux et par référence à Cyrano I on obtient, dans la capsule à pleine puissance :

q_1 = 486 W cm^{-3} ; Q_1 = 4548 W

q_2 = 35,89 W cm^{-3} ; Q_2 = 336 W

Q_s = 931 W

Q = 5815 W

soit : $\frac{Q_1}{Q} = 0,782$

$\frac{Q_2}{Q} = 0,0578$

$\frac{Q_c}{Q} = 0,84$

Nous allons admettre que la valeur de 84 % se conserve dans l'emplacement d'irradiation considéré (51-3) quelle que soit la puissance du réacteur et calculer ainsi directement la puissance dans le crayon.

L'évaluation de l'erreur commise sur Q_c montre que la précision sera meilleure que dans Cyrano I du fait de la différence des enrichissements. En effet, l'erreur sur l'évaluation des quantités de chaleur déposées dans les structures, estimée à 10 % pour Cyrano I, est réduite ici à 1,5 % environ ; les taux de fission sont évalués avec une précision du même ordre.

Dans Cyrano II, l'incertitude due à la discrimination des échauffements étant négligeable, la quantité de chaleur dissipée dans le crayon est mesurée à $(^{+0\ \%}_{-4\ \%})$.

3°) - Intégrale de conductibilité

Elle n'a été mesurée que lors des montées en puissance du premier cycle ; les deux thermocouples UO_2 étaient hors d'usage lors du second cycle. Connaissant q_c, la puissance spécifique moyenne dans le combustible, pour tracer $\int_{T_e}^{T_c} k dT = \frac{q_c a^2}{4} . A$, il faut connaitre T_c, T_e et a, A étant pris égal à 0,93 (voir tableau VII).

a) - Tenue des thermocouples

Pour apprécier la validité des indications des thermocouples nous avons représenté la courbe des variations des températures correspondant aux trois montées en puissance du premier cycle. La figure 15 indique une bonne reproductibilité des mesures relatives au thermocouple central, au moins jusqu'à 2050°C ; elle montre aussi des anomalies de fonctionnement du thermocouple de surface. Nous sommes amenés à supposer que les points expérimentaux relatifs à la première montée en puissance sont valables et qu'il y a lieu de prolonger l'alignement de ces points pour obtenir les températures les plus probables aux puissances élevées ; la défaillance de ce thermocouple pourrait être imputable, croyons-nous, à sa fragilisation mécanique par appui sur le fond du trou.

On verra plus loin que le thermocouple central a été détérioré par diffusion du tantale de la gaine dans l'oxyde. Il est raisonnable d'admettre que ce phénomène a débuté au-delà de 2000°C, ce qui rend un peu douteuse la mesure faite à 2280°C lors de la troisième montée en puissance.

b) - Répartition longitudinale de la puissance

La mesure des températures se fait dans le plan médian du crayon, et la mesure de q_c est une moyenne sur tout le crayon. Est-il légitime d'admettre que q_c est représentatif du plan de mesure ? Oui si l'on admet que la répartition longitudinale du flux représentée en figure 16, qui résulte des mesures dosimétriques sur maquette (voir appendice II), est conservée dans Cyrano II, ce qui est vrai à 2 % près.

c) - Mesure de la température de surface

Cette mesure est sujette à plusieurs incertitudes dues au gradient de température élevé dans cette région, et à la perturbation des isothermes par le trou dans lequel se trouve placé le thermocouple. Nous avons utilisé l'hypothèse de travail suivante : la température indiquée par le thermocouple est celle de l'isotherme non perturbée passant par son axe.

La cote radiale exacte du trou latéral au niveau de la soudure chaude du thermocouple a été mesurée après irradiation : son axe est au rayon 4,45 mm. Le diamètre du trou étant de 0,72 mm, les cotes extrêmes de la soudure chaude sont 4,34 et 4,56 mm. La résistance thermique de l'interface, pour les différentes positions possibles, prend une valeur négative pour a = 4,34 mm, de 0,1°C W^{-1} cm^2 pour a = 4,45 mm et 0,4°C W^{-1} cm^2 pour a = 4,56 mm Cette dernière valeur, cohérente avec l'expérience (7), a été adoptée pour le tracé de l'intégrale de conductibilité ; d'autres valeurs de a, comprises entre 4,56 et 4,80 mm, cote de la paroi froide de la cavité, seraient également admissibles du point de vue des résistances thermiques d'interface qui s'en déduiraient ; il n'est donc pas exclus que le tracé proposé en figure 17 donne une évaluation de conductibilité thermique légèrement par défaut.

4°) - Exploitation thermique du second cycle d'irradiation

En ce qui concerne les conditions thermiques au second cycle, les thermocouples placés dans le combustible étant détériorés, nous ne pouvons faire que des hypothèses sur les distributions de température. Il nous a semblé légitime de considérer comme valable la variation de l'intégrale de conductibilité déterminée ci-dessus. Le choix de la résistance thermique au contact UO_2-gaine tient compte également des valeurs observées au premier cycle ; mais étant donné l'absence de pression gazeuse sur la gaine, nous avons adopté pour le calcul des températures $\rho \simeq 0,75$°C W^{-1} cm^2.

La figure 18 donne les résultats de l'étalonnage de puissance et la figure 19 le diagramme de puissance du réacteur, la puissance mesurée dans le combustible, la température centrale calculée et les repères des prélèvements de gaz.

C - COMPORTEMENT INSTANTANE DES GAZ DE FISSION

1°) - Flux neutronique et taux de combustion

Après irradiation, des carottes de diamètre 1,2 mm ont été prélevées dans les zones corticales du combustible, zones qui, portées à des températures inférieures à 1400°C, renferment après irradiation la quasi totalité des gaz qui y furent formés. Ces carottes ont été évaporées sous vide et le ^{85}Kr libéré pendant cette opération a été recueilli et analysé par spectrométrie γ.

Les résultats suivants, relatifs aux tronçons T_3, T_4 et T_5 (voir fig. 20) ont été obtenus :

Carottes tronçon	Rayon de prélèvement (mm)	Poids (mg)	Atomes ^{85}Kr en fin d'irradiation	Atomes ^{85}Kr par mg d'UO_2	Fissions/cm^3
T_3	4,2	35	$3,02.10^{14}$	$8,63.10^{12}$	$3,12.10^{19}$
T_4	4,7	31,2	$2,69.10^{14}$	$8,63.10^{12}$	$3,12.10^{19}$
T_5	4,5	42,15	$3,055.10^{14}$	$7,24.10^{12}$	$2,62.10^{19}$
T_4	4,9	32,7	$1,94.10^{14}$	$5,93.10^{12}$	$2,14.10^{19}$

en adoptant pour rendement de fission du ^{85}Kr 0,293 %.

On peut penser que la première mesure T4 R 4,9 est erronée (perte de gaz, évaporation incomplète), ou alors qu'il y a une certaine hétérogénéité de flux dans une même tranche de combustible, selon que l'on prélève la carotte servant à la mesure du côté du coeur du réacteur ou du côté opposé*.

Par ailleurs il faut appliquer une correction de dépression de flux à ces valeurs du taux de combustion périphérique pour trouver une valeur moyenne. La correction appliquée est représentée en figure 21.

Nous obtenons :

	Correction	Fissions/cm^3 Rayon extérieur	Fissions/cm^3 Valeur moyenne
T3 R 4,2	1,01	$3,12.10^{19}$	$3,07.10^{19}$
T4 R 4,7	1,05	$3,12.10^{19}$	$2,97.10^{19}$
T5 R 4,5	1,035	$2,62.10^{19}$	$2,53.10^{19}$
T4 R 4,9	1,065	$2,14.10^{19}$	$2,01.10^{19}$

.../...

* En fait un examen systématique du combustible irradié dans les dispositifs qui ont suivi Cyrano II a montré le bien fondé de cette hypothèse : dans la zone corticale des pastilles d'UO_2 une fluctuation de la densité de fission de l'ordre de 25 % a été mise en évidence suivant l'orientation par rapport au coeur du réacteur.

La valeur moyenne des taux de combustion est $2,6 \cdot 10^{19}$ fiss./cm^3 elle correspond à un flux neutronique moyen de $2,7.10^{13}$ n cm^{-2} s^{-1}. Cette valeur est très proche de celles déterminées à l'aide des mesures thermiques et neutroniques qui sont respectivement 2,68 et $2,69.10^{13}$ n cm^{-2} s^{-1}.

2°) - Prélèvements de gaz

Durant le premier cycle, deux prélèvements ont été effectués sous vide partiel (cf. §I.C.2.a). Les inconvénients impliqués par cette méthode, commentés en annexe III ont été jugés inacceptables dans les conditions de puissance de Cyrano II, notamment l'activité γ au voisinage du circuit du prélèvement.

Ces raisons nous ont conduits à n'utiliser que la seconde méthode de prélèvement décrite (balayage) lorsque le combustible est à température élevée ; cette technique a été employée pour tous les prélèvements effectués au cours du second cycle.

La séquence des prélèvements opérés au cours du second cycle est donnée en figure 19 en regard du diagramme de puissance. Les recueils faits au cours des arrêts sont destinés à analyser l'iode déposé dans les canalisations. Ils permettent aussi d'apprécier les rendements des prélèvements.

a) - ^{133}Xe et ^{85}Kr

Les résultats relatifs au ^{133}Xe et au ^{85}Kr sont indiqués dans le tableau VIII.

Les courbes de la figure 22 représentent les fractions de ^{133}Xe et ^{85}Kr dégagées.

Nous avons groupé les gaz dégagés dans les prélèvements 10 et 11 d'une part, 13 et 14 d'autre part pour tenir compte du rendement médiocre (80 %) du balayage dans le cas particulier de Cyrano II (voir § I.C.2.b).

Remarque

La quantité d'iode semble être à l'équilibre dans le dispositif. Malheureusement, il n'est pas possible de savoir si le dégagement du xénon issu de l'iode déposé dans les canalisations est le même lorsque la pile est en fonctionnement ou arrêtée. Pour cette raison, nous pensons que la valeur calculée pour l'iode représente un minimum; elle permet d'affirmer qu'au moins la moitié du xénon 133 recueilli est sorti sous forme d'iode.

b) - Gaz stables

Nous reportons dans le tableau IX les quantités de xénons et kryptons stables recueillis lors des différents prélèvements ainsi que, pour chaque isotope, le rapport entre la quantité dégagée et le rendement de fission de cet isotope.

Ces résultats de spectrométrie de masse sont obtenus avec une marge d'incertitude variant de ± 5 % à ± 15 % suivant les analyses

et suivant les isotopes. Cependant, bien qu'étant affectés de la marge d'incertitude la plus importante les résultats obtenus pour le ^{85}Kr correspondent très bien aux résultats obtenus par spectrométrie γ :

	^{85}Kr spectro γ	^{85}Kr spectro de masse
Prélèvement 10 + 11	1,21 mm^3 TPN	1,13 mm^3 TPN
Prélèvement 13 + 14	1,59 mm^3 TPN	1,537 mm^3 TPN

Dans le tableau IX figure également, pour chaque prélèvement, le "rapport normalisé" :

$$\frac{\text{volume dégagé d'un isotope i}}{\text{rendement de fission de i}} \times \frac{\text{rendement de fission } ^{86}Kr}{\text{volume } ^{86}Kr}$$

Le ^{86}Kr a été choisi en raison de son rendement de fission assez élevé et de l'absence de prédécesseur. Remarquons que si tous les isotopes étaient dégagés proportionnellement à leur production ce rapport serait égal à 1.

La constance de ce rapport pour les différents kryptons et le ^{134}Xe traduit un dégagement identique pour toutes ces chaines.

La valeur 0,92 obtenue pour le ^{136}Xe dans chaque prélèvement s'explique aisément par le fait qu'une partie du ^{135}Xe se trouve placée dans une région de plus faible flux neutronique. Les valeurs 0,55 et 0,80 obtenues pour le ^{131}Xe traduisent assez bien la mise en équilibre de son précurseur l'iode 131 de 8 jours de période ; le dégagement de ^{131}Xe, comme celui de ^{133}Xe, doit intervenir partiellement sous forme de son précurseur, les gaz recueillis provenant à la fois de la décroissance de l'iode accumulé dans les canalisations et du xénon dégagé entre deux prélèvements.

Des observations plus sélectives faites dans la boucle Médicis (8) ont permis depuis d'établir la prépondérance de la participation des prédécesseurs dans la plupart des chaines.

Les valeurs du "rapport normalisé" de 1,15 et 1,12 pour le ^{132}Xe dans les prélèvements 13 et 14 sont assez nettement en dehors des incertitudes expérimentales, estimées à ± 4,8 % pour le prélèvement 13 et ± 5,3 % pour le prélèvement 14. Nous pensons que le tellure 132, de période 77 heures, est cause de cet écart. Le comportement particulier de cet isotope, confirmé par les analyses faites dans le combustible, sera plus finement examiné dans les expériences suivantes.

3°) - Gaz retenus dans le combustible

Des analyses locales de gaz de fission contenus dans le matériau irradié ont été effectuées. Les résultats seront présentés après avoir discuté les aspects macro et microstructuraux du combustible après irradiation.

D - EXAMENS APRES IRRADIATION

Le dispositif Cyrano II a été tronçonné et le crayon examiné en cellule chaude.

1°) - Exploration γ du crayon *

Le crayon a été soumis à une analyse spectrométrique γ par défilement. La figure 23 montre l'activité totale recueillie à travers un trou circulaire de 2 mm de diamètre. Les pics d'activité dans la partie supérieure du crayon correspondent à l'activation du tantale de la gaine du thermocouple (voir plus loin autoradiographies). Un défilement effectué en réglant le spectromètre sur le pic du ^{95}Zr donne une courbe plate en moyenne, avec quatre pics d'activité, deux correspondant aux extrémités, et deux aux interpastilles 1-2 et 2-3 (fig. 24). Si l'on excepte le relèvement aux extrémités, la répartition longitudinale du flux est homogène, compte tenu de la sensibilité de la spectrométrie γ.

* Mesures effectuées par les Laboratoires de très haute activité SPLHA - CENG.

2°) - Microstructures

Les pastilles ont été examinées optiquement. La planche de la figure 25 montre les macrophotographies et les autoradiographies des plans de coupe repérés en figure 20. Le plan de mesure des températures est très voisin de T4. La figure 26 est une coupe longitudinale axiale du crayon dans la région des thermocouples. Les images montrent la destruction du thermocouple central avec migration du tantale de la gaine qu'on retrouve concentré dans les fissures et notamment dans les joints entre pastilles. Cette localisation explique la position des pics de tantale des spectres γ.

L'appauvrissement en activité du centre de la pastille correspondant au tronçon supérieur (voir aussi figure 25) indiquerait un effet de drainage des produits de fission par la diffusion du tantale.

La figure 27 montre l'aspect micrographique d'une coupe radiale au niveau T3 : on y voit quelques pores lenticulaires, une accumulation de porosités près du trou central, les fissures sont peu nombreuses et surtout radiales.

3°) - Distribution radiale des gaz de fission

Des prélèvements de carottes de diamètre 1,2 mm ont été effectués à différents rayons et dans différents tronçons du combustible. Ces échantillons ont été évaporés par chauffage sous vide à une température supérieure à 2300°C ; pendant cette opération les gaz contenus dans le combustible ont été recueillis et analysés (9).

a) - ^{85}Kr

Le tableau X indique les quantités de ^{85}Kr extraites de chaque carotte, ainsi que le nombre d'atomes par milligramme d'UO_2 et la fraction restante rapportée à la quantité théoriquement formée à ce rayon (en tenant compte de la dépression de flux neutronique).

La fraction retenue dans la zone extérieure est prise égale à 100 % (cf. § III.C.1). Les fluctuations des concentrations de ^{85}Kr dans les régions périphériques peuvent être dues à la marge d'incertitude de la méthode mais aussi, comme on l'a vu, au flux de neutrons incident non homogène.

Il y a une assez grande incertitude sur le poids des carottes, surtout pour les échantillons de faible volume, à cause de la difficulté d'éliminer la résine d'enrobage ; les poids indiqués peuvent donc être erronés par excès. Le prélèvement T3 RO face C contient les fragments de combustible entourant le trou central ; nous pensons que le chiffre cité n'est pas entaché d'erreur et traduit une concentration élevée des gaz de fission au centre par rassemblement des pores lenticulaires (voir figure 28).

b) - Gaz stables

Les résultats de spectrométrie de masse sur les gaz stables confirment ceux obtenus par spectrométrie γ sur le krypton 85. Dans les tableaux XI, XII et XIII pour chaque carotte sont exposés les résultats de spectrométrie de masse. Du fait de la faible quantité de gaz à analyser et du grand volume de gaz résiduels (H_2, N_2 + CO) les résultats sont à la limite de sensibilité de l'appareil. Pour améliorer ces mesures nous procédons actuellement à un enrichissement en xénon et krypton en éliminant une partie importante des gaz résiduels par passage sur du titane + zirconium à 900°C.

Dans le cas du krypton 85, nous avons également indiqué les résultats de la spectrométrie γ, qui donnent toujours des rapports normalisés plus cohérents avec ceux des autres kryptons :

- dans les régions extérieures du combustible les xénons et kryptons ont des comportements tout à fait semblables.
- dans les carottes prélevées dans la région centrale on note dans tous les cas un comportement singulier du xénon 132 : alors que le xénon 134 et le xénon 136 sont en général en même proportion que les kryptons, le xénon 132 est situé à 60, 70 % de leur valeur commune ; ce résultat confirme les analyses faites pendant l'irradiation : on avait noté en effet un excès de ^{132}Xe dans les prélèvements 13 et 14 (voir tableau IX).

La concentration de ^{132}Xe est particulièrement faible (relativement aux autres isotopes) dans l'échantillon T3 RO face C ; ce comportement est constaté également pour ^{131}Xe et ^{83}Kr.

E - DISCUSSIONS

1°) - Intégrale de conductibilité thermique

L'intégrale de conductibilité thermique mesurée dans Cyrano II confirme les résultats hors pile et en pile obtenus précédemment (4) ; ainsi est justifié, a posteriori, l'emploi de la courbe intégrale de conductibilité établie hors pile, pour le calcul des distributions de température dans l'élément combustible EL4.

Pour les calculs futurs, nous recommandons désormais l'usage des valeurs fournies par Cyrano II, qui ne comportent pas d'incertitude de correction de densité comme les résultats obtenus hors pile.

Nous nous proposons d'ailleurs de discuter des résultats de conductibilité thermique dans un rapport futur concernant les dispositifs Cyrano IV, V, VI et VII où d'autres mesures d'intégrale de conductibilité sur des UO_2 de densité variable ont pu être faites.

2°) - Grossissement de grain

a) - Les limites de grossissements de grains sont les suivantes :

Face examinée	Limite de grossissement de grains équiaxes (mm)	Limite de grossissement de grains basaltiques (mm)
T_2D	2,9	1,78
T_3C	3,64	2,5
T_3B	3,68	2,48
T_4A	3,45	2,45
T_5E	2,9	indéterminé

A partir de ces indications on peut tracer l'enveloppe de la zone de grossissement de grain équiaxe (fig. 29). L'allure de celle-ci ne contredit pas les résultats de la spectrométrie γ par défilement ; au contraire nous pensons que la symétrie de cette frontière par rapport au plan médian du crayon indique une répartition longitudinale homogène du flux et un refroidissement symétrique.

b) - Pour comprendre les circonstances de la formation de la microstructure observée, nous avons tracé les profils de température établis au cours de trois états de puissance principaux auxquels a été soumis le combustible (fig. 30) :

- L'état a correspond au profil de température moyen établi pendant les premier et deuxième paliers en puissance du premier cycle d'irradiation (fig. 13) ; le profil indiqué résulte des mesures par thermocouples. Durée totale : 12 heures.

- L'état b correspond au profil de température moyen établi pendant le troisième palier en puissance du premier cycle : la température centrale, calculée par la courbe intégrale de la figure 17, était de 2320°C. Durée totale : 5 heures 30.

- L'état c correspond au profil de température moyen pendant le second cycle ; les températures sont également calculées en utilisant la courbe de la figure 17. Durée totale : 21 jours.

Quels ont été les rôles respectifs de ces états de puissance successifs dans la recristallisation du matériau ?

Nous remarquons que les frontières des domaines de recristallisation équiaxe et basaltique, qui sont reportées sur la figure 30 correspondent respectivement à 1375 ± 35°C et 1695 ± 30°C pour l'état a, 1430 ±30°C et 1730 ± 10°C pour l'état c. Ces limites seraient de 1660°C et 2000°C d'après la courbe b.

Les données de la littérature, critiquées à Vienne (1), s'accordent pour assigner à ces frontières de recristallisation, à l'équilibre, des températures voisines de 1500 et 1700°C. Il serait donc logique d'admettre ici que l'état de puissance n'a pas été, ou peu, perturbé par l'état b. C'est ce que nous croyons. En effet :

La dose d'irradiation à la fin des deux premières montées en puissance était de $6,8.10^{17}$ fissions/cm^3 ; or, on sait (10) qu'une certaine stabilisation des joints de grains est obtenue dans ces conditions. Il est donc admissible que les 5 h 30 de séjour à 1660°C aient peu ou pas modifié la position de la frontière du grossissement de grains équiaxes.

Un déplacement de la limite extérieure des grains basaltiques devrait normalement résulter d'un long séjour dans les conditions de l'état b, par suite du déplacement de nombreux pores lenticulaires. Dans le cas présent, le maintien à puissance élevée n'ayant duré que 5 h 30 m, nous pensons d'une part que, pendant la période considérée, les conditions favorables à la formation de ces pores (présence de vides, fissures, etc...) n'existent pas, d'autre part que leur déplacement est trop lent pour leur permettre de balayer quantitativement toute la région comprise entre les rayons R_{eq} et R_b.

En tout état de cause, l'observation d'un pore lenticulaire au rayon R # Req (voir figure 31), dans le tronçon T4, montre que les conditions propices au transport par évaporation-condensation ont pu y régner à un instant donné de la vie du combustible.

3°) - Comportement des gaz de fission

a) - Cinétiques

La technique de prélèvement au cours d'un palier de puissance stable, qui a été mise en oeuvre dans l'expérience Cyrano II, a permis la mesure des quantités de gaz de fission échappés du combustible dans les conditions thermiques du second cycle, soit :

température de surface $UO_2 \simeq 640°C$
intégrale de conductibilité ~ 34 à 36 W/cm.

La figure 22 montre que les fractions dégagées de ^{133}Xe et ^{85}Kr croissent dans le temps ; ceci étant également vrai pour la plupart des gaz stables (les "rapports normalisés" présentés tableaux IX, XI, XII et XIII sont constants), il est donc clair que l'émission des espèces stables, à puissance constante, est gouvernée par une cinétique telle qu'un régime permanent de sortie n'est pas encore établi après deux semaines d'irradiation.

b) - Participation de différentes zones du combustible au dégagement total

L'examen des valeurs des tableaux X, XI, XII et XIII montre que les concentrations des différents isotopes stables en un point donné du

combustible sont à peu près proportionnelles à leurs rendements de fission*.

Il est donc logique de considérer comme paramètre significatif la fraction contenue dans le combustible.

Si l'on admet, ce qui semble résulter de nombreuses expériences précédentes, que la microstructure visible à la fin d'une irradiation conduite à puissance constante s'établit pendant les premiers instants - disons pendant les premières heures - de ce régime de puissance, on peut supposer que les fractions volumiques des différentes zones de recristallisation sont stables au cours du second cycle. Ainsi :

- la zone de croissance basaltique occupe 15 % du volume total et a retenu 30 % des gaz de fission stables qui y ont été formés (carottes T3 Ro face C et T4 R 1,3) ;
- la zone de grossissement équiaxe des grains représente 20 % du volume total ; le taux de rétention y est de 95 % (carotte T4 R 3,3) ;
- la zone de microstructure inchangée, dans laquelle ont été prélevées les carottes T3 R 4,2 ; T4 R 4,7 et T5 R 4,5 contient en fin d'irradiation tous les gaz qui y ont été formés.

*Les anomalies à ce comportement, présentées par certaines espèces au voisinage immédiat du centre du combustible (tableaux XI : T3 RO faces C et B ; XII : T4 R 1,3 ; XIII : T5 R 0,5), sont discutées plus loin.

Le bilan de cette analyse des concentrations permet de calculer un taux de dégagement F global de 11,5 %, alors que les prélèvements de gaz indiquent un dégagement de 15,1 % (tableau VIII).

Notons que la zone de recristallisation basaltique participe pour 90 % à l'émission des gaz de fission dans le régime thermique considéré.

4°) - Hypothèses sur les régimes d'échappement

La proportionnalité entre les quantités de chaque isotope présentes dans le combustible irradié et les rendements de fission des différentes chaînes indique que localement le nombre d'atomes émis dépend linéairement de la concentration de l'espèce correspondante ; la plupart des mécanismes activés par la température satisfont à cette condition. En outre le dégagement des kryptons est identique à celui des xénons.

Plusieurs faits suggèrent que dans les conditions d'irradiation du combustible de Cyrano II, la sortie des gaz se fait par migration de bulles :

a) - des pores de type lenticulaire sont observés dans le combustible irradié

b) - la carotte centrale T3 Ro face C contient beaucoup plus de gaz qu'il n'en a été formé dans le volume correspondant du combustible ; ceci indique que la concentration globale (solide + porosités) et la température ne sont pas les paramètres déterminants. Le rôle essentiel serait joué par les pores lenticulaires dont la vitesse de déplacement dépend de la température et de la tension de vapeur de l'oxyde, mais aussi du gradient thermique. Ainsi les gaz migrent vers la zone centrale

tant qu'ils ne rencontrent pas de fissures ; au centre le gradient thermique macroscopique étant très faible le déplacement des pores est moins rapide et l'on peut y observer en fin d'irradiation l'accumulation des gaz de fission qui s'y est faite aux dépens des zones voisines.

c) - dans toutes les carottes centrales les quantités de gaz rares présents ne suivent pas la loi générale de proportionnalité aux rendements de fission, les écarts à cette loi n'étant pas explicables par les incertitudes des méthodes d'analyse.

Dans les chaînes présentant cette anomalie, principalement chaîne 131 et chaîne 132 et en partie chaîne 83, les gaz rares ont des prédécesseurs à période relativement longue :

^{131}I	8,05 jours
^{132}Te	77 heures
^{132}I	2,4 heures
^{83}Br	2,4 heures

Les disproportions constatées suggèrent que "le rendement du balayage" est fonction de la nature chimique de l'isotope, ou que les prédécesseurs des gaz rares ont un mode propre de déplacement beaucoup plus rapide que celui des gaz rares.

D'autres observations qualitativement en accord avec celles-ci ont été faites sur des échantillons irradiés à plus fortes doses (11). Nous discuterons en détail leur signification dans un rapport ultérieur.

CONCLUSIONS

Un dispositif permettant l'irradiation d'un crayon combustible à température et puissance contrôlées a été construit (3). Le présent rapport décrit l'utilisation d'un tel dispositif pour l'étude du comportement d'un crayon EL4 1er jeu ; une importance particulière est donnée à la présentation des méthodes de mesure et à leur exploitation.

L'utilisation de thermocouples tungstène, tungstène-rhénium permet le repère des températures centrales jusqu'à plus de 2000°C et la mesure de la puissance nucléaire dégagée est faite en continu avec une précision de 5 %.

Plusieurs aspects du comportement de l'oxyde d'uranium fritté dans les conditions de service du premier jeu du réacteur EL4 ont été précisés. Les principaux résultats recueillis au cours des deux premières expériences du programme (Cyrano I et II) sont les suivants :

1°) Lorsque l'irradiation a lieu à une température inférieure à 1000°C, le taux de dégagement des gaz de fission est inférieur à 10^{-4}, au moins tant que la dose ne dépasse pas 10^{19} f.cm^{-3}. Le dégagement a lieu en grande partie sous forme des prédécesseurs des gaz rares et le principal mécanisme responsable est l'éjection.

2°) L'intégrale de conductibilité thermique, mesurée jusqu'à 2300°C, confirme les résultats obtenus précédemment, hors pile et en pile, au C.E.A.

3°) L'examen du combustible irradié suggère que la microstructure s'établit pendant les toutes premières heures de l'irradiation ; après un certain taux d'irradiation elle n'est pas modifiée par une pointe de puissance de quelques heures.

4°) La mesure semi-continue des quantités de gaz de fission échappés du combustible à puissance constante (intégrale de conductibilité $\simeq 34,7\ Wcm^{-1}$, température de gaine $\simeq$ 610°C), indique que l'émission des espèces stables obéit à une cinétique telle que la fraction de gaz dégagée est encore largement croissante après 12 jours d'irradiation (600 MWj/t).

Dans ces conditions, la concentration locale des gaz rares stables dans le combustible irradié est à peu près uniforme dans la zone de croissance basaltique, dont le taux de rétention est de l'ordre de 15 % à 1000 MWj/t.

5°) Lors d'une irradiation conduite à une température moyenne de 380°C jusqu'à une dose de $3,7.10^{18}$ fissions/cm^3, aucune modification de conductibilité thermique n'a été notée, contrairement à ce qui est admis.

ANNEXE I

VALIDITE DES ETALONNAGES DE PUISSANCE

Faisons tout d'abord une remarque sur la signification des pentes des courbes d'étalonnage :

la résistance de mesure fonctionne comme un thermomètre à résistance, c'est-à-dire qu'elle mesure la variation de température $\Delta\theta$ du milieu où elle est située ; $R-R_o$ est proportionnel à $\Delta\theta$.

Si on appelle β la résistance thermique par unité de surface de tous les matériaux disposés en aval de la résistance de mesure, θ_o la température de surface du dispositif, prise constante *, et W_R la densité de chaleur sur la surface qui délimite la résistance de mesure R, on peut écrire :

$$\theta - \theta_o = \beta\ W_R$$

Donc, quand on trace Q en fonction de $R-R_o$, la pente $\frac{\Delta Q}{\Delta(R-R_o)}$, qui s'exprime en $W\Omega^{-1}$, est une grandeur proportionnelle au coefficient de conductibilité thermique total des matériaux situés en aval de la résistance de mesure.

* Elle varie de 2 à 3°C au maximum pendant la période d'irradiation.

. Nous donnons ci-dessous les valeurs que prend ce paramètre pour Cyrano I et II.

	$\frac{\Delta Q}{\Delta (R-R_o)}$	Isolement
Cyrano I cycle I	1038 W Ω^{-1}	Laine d'acier sous 60 kg He
" cycle II	1046	id.
" cycle III	571	Laine d'acier sous 60 kg N_2
Cyrano II cycle I	1531	Inox fritté sous 60 kg He
" cycle II	1350	Inox fritté sous 2 kg He

Pour que l'étalonnage soit rigoureux :

1°) - Il faut que l'écoulement de la chaleur se fasse entièrement dans le sens radial, c'est-à-dire que la résistance de mesure soit traversée par toute la chaleur engendrée dans le volume qu'elle délimite.

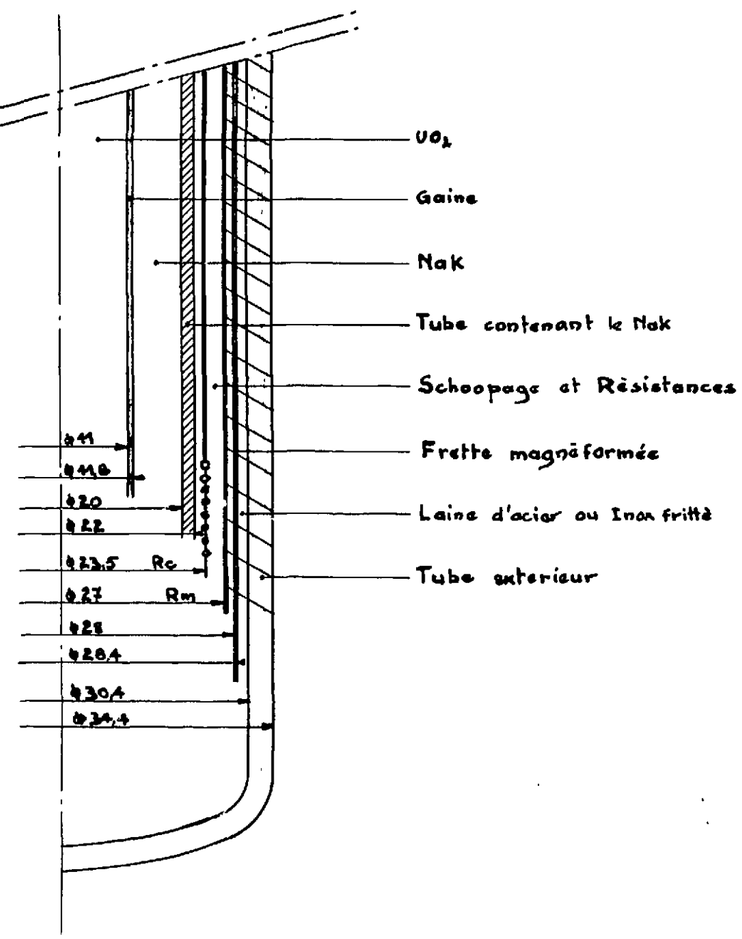
2°) - Il faut que, quelle que soit l'origine de l'énergie calorifique, (nucléaire ou effet Joule), la résistance de mesure, traversée par un même flux de chaleur, prenne une même valeur de résistance électrique* Il est nécessaire pour cela que restent identiques les conditions d'isolement et de refroidissement, quel que soit le mode d'échauffement.

* Notons que la valeur que prend R ne dépend pas de la répartition de la densité de flux de chaleur.

Nous allons voir dans quelle mesure ces deux conditions sont satisfaites dans la pratique.

Condition 1

a) - Rappelons (schéma ci-après) que la résistance chauffante est située au diamètre 23,5 mm sur une hauteur de 130 mm, et la résistance de mesure sur une hauteur de 180 mm au diamètre 27 mm. Donc, par construction, toute la chaleur dissipée dans la résistance chauffante s'écoule à travers R.



b) - La distance entre la surface du crayon et R est de 8 mm. La résistance de mesure dépasse de 65 mm en hauteur la première pastille d'UO_2, isolée sur sa face supérieure par une pastille d'alumine. Les pertes thermiques par la gaine vers le bouchon et l'hélium qui ne seraient pas "vues" par la résistance de mesure doivent être très faibles.

Par contre, à la partie inférieure du bouchon il y a un volume de NaK important non enveloppé par la résistance de mesure*. Il y a donc perte par conduction à travers ce NaK et le bouchon. Ces pertes, difficiles à calculer, peuvent être évaluées par analogie avec les mesures faites en maquette hors pile, à moins de 5 %.

Condition 2

La seconde condition n'est pas réalisée à coup sûr, parce que dans le cas de l'échauffement nucléaire il y a création de chaleur par rayonnement γ dans les structures en aval de la résistance de mesure.

Cas de Cyrano I

Calculons le ΔT dû à l'échauffement γ.

Le poids du volume hachuré (structure en aval de R) est d'environ 500 g. Faisons le calcul dans le cas du cycle 3 où le flux γ est maximal et où il est de l'ordre de 1,2 W g^{-1} $(MW)^{-1}$ (on admet, pour ce calcul, que le flux γ est proportionnel à la puissance de la pile exprimée en MW).

* Ce volume a été très réduit dans Cyrano II.

- On écrira : $\Delta T_i = \frac{1}{\lambda i} \frac{qi}{4} (a_i^2 - b_i^2) - 2 b_i^2 \ln \frac{a_i}{b_i}$

quand il y a création de chaleur en chaque point du tube cylindrique considéré, constitué par un matériau de nature i, de rayon intérieur b_i et extérieur a_i, λ_i étant la conductibilité thermique moyenne du matériau et q_i la quantité de chaleur créée par cm^3.

- On écrira : $\Delta T_j = \frac{1}{\lambda_j} \frac{Q_{ie}}{2 \pi rj}$

quand la quantité de chaleur précédente traverse le tube de nature j immédiatement en aval, où Q_i est la quantité de chaleur par cm de hauteur déposée dans le tube précédent, rj le rayon de la fibre moyenne du tube et e son épaisseur.

- Dans le shoopage Ni-Cr :

$$\Delta T_1 \simeq 5.10^{-2} \text{ °C } (MW)^{-1}$$

- Dans la laine de fer :

$\Delta T'_2$ provenant de l'échauffement γ dans le shoopage Ni-Cr

$$\Delta T'_1 \simeq 0,30\text{°C } (MW)^{-1}$$

ΔT_2 provenant de l'échauffement γ dans la laine de fer

$$\Delta T_2 \simeq 0,40\text{°C } (MW)^{-1}$$

- Dans le zircaloy :

$\Delta T'_3$ provenant de l'échauffement γ dans les structures précédentes

$$\Delta T'_3 = 0,14\text{°C } (MW)^{-1}$$

ΔT_3 provenant de l'échauffement γ dans le zircaloy

$$\Delta T_3 = 0,11°C\ (MW)^{-1}$$

d'où ΔT global $= \Delta T_1 + \Delta T'_2 + \Delta T_2 + \Delta T'_3 + \Delta T_3 \simeq 1°C\ (MW)^{-1}$

On remarque que l'augmentation de température provient, pour la plus grande part, de la résistance thermique opposée par la laine de fer au flux de chaleur qui la traverse. La conductibilité thermique de ce matériau a été mesurée et trouvée voisine de 0,02 W $cm^{-1}°C^{-1}$ (cette valeur peut être considérée comme maximale, donc ΔT comme minimal).

L'application numérique de ce qui précède au cas où la laine de fer est baignée par de l'hélium, conduit à une erreur par excès de 0,6 % par mégawatt.

A l'erreur par défaut due aux fuites par les extrémités du crayon se superpose donc une erreur par excès due à l'échauffement γ des structures situées en aval de la résistance de mesure. Au total, les valeurs mesurées pourraient être trop fortes de 5 % à pleine puissance.

Cas de Cyrano II

La mesure par excès de $\theta - \theta_0$ estimée pour Cyrano I, cycle 1 et 2, à 1°C MW^{-1}, se réduit ici à 0,75°C MW^{-1}, suivant les valeurs de $\frac{\Delta Q}{\Delta (R-R_0)}$ indiquées plus haut, ce qui fournit une mesure de + 2,5 % à 15 MW. Si l'on tient compte des pertes en bout, évaluées à environ 5 %, les valeurs mesurées pourraient être trop faibles de 2,5 %.

Remarques sur la validité de l'étalonnage en utilisant les températures mesurées dans la laine de fer

Si la valeur de la résistance de mesure, dont la variation en fonction de la température est linéaire, ne dépend pas de la répartition de la densité de flux de chaleur, il n'en est pas de même de la valeur de la température indiquée par les thermocouples placés dans la laine, qui dépend du gradient de température au niveau de la soudure chaude, donc du flux de chaleur dans le plan de mesure.

Ainsi donc pour un même flux calorifique W_R, la température des thermocouples de laine sera plus élevée lorsque la puissance est délivrée électriquement (hauteur de l'enroulement 130 mm, faible distance entre couple et résistance de chauffage) que lorsque cette puissance est d'origine nucléaire et transmise par la lame de NaK de hauteur 150 mm.

La valeur de la puissance déterminée à l'aide des thermocouples laine serait donc, si l'écoulement de chaleur était totalement radial, inférieure de 14 % $(1 - \frac{130}{150})$ à la valeur déterminée par la résistance de mesure.

De fait pour Cyrano I, 1er cycle, on trouve :

$$\frac{\text{Puissance "laine de fer"}}{\text{Puissance résistance de mesure}} = \frac{449}{472} = 0,95 \text{ (voir tableau I).}$$

Au troisième cycle, l'isolement ayant changé, ce rapport est égal à 0,89 et pour Cyrano II il prend la valeur 1,015.

En fait, l'écoulement ne se fait jamais parfai tement au droit de la résistance de mesure, ni au droit de la colonne de NaK, les mouvements de convection de ce dernier tendent, de plus, à homogénéiser les températures même dans le cas du chauffage électrique et provoquent divers battements qui rendent imprécises, dans ce cas, les déterminations des températures de laine.

Ces quelques remarques montrent que pour ce type d'étalonnage il est dangereux d'estimer les puissances à partir d'indications de thermocouples placés dans un plan médian.

En conclusion, les étalonnages fournissent des valeurs de puissance qui semblent par excès dans Cyrano I et légèrement par défaut dans Cyrano II ; en toute rigueur, les causes d'incertitude étant multiples, il est difficile de donner une marge d'erreur. Toutefois, l'accord entre les résultats de taux de combustion déduits des mesures thermiques, des mesures dosimétriques et des mesures de quantité de gaz de fission est tel que les puissances sont connues certainement à mieux que 5 %.

ANNEXE II

DOSIMETRIE DES BOUCLES CYRANO 1 ET 2

J. Berger
G. Pleyber
Service des Piles - CENG

I - MESURE DES FLUX NON PERTURBES

Les flux régnant dans les emplacements d'irradiation, numérotés comme l'indique la figure 5, ont été mesurés au cours d'un palier de puissance du réacteur Siloé à 5 MW.

Ces flux sont donnés ci-dessous pour une puissance du réacteur de 15 MW.

Position d'irradiation	ϕ_γ (W g^{-1})	ϕ_{th} 10^{13} n cm^{-2} s^{-1}	ϕ_R 10^{13} n cm^{-2} s^{-1}
1	1,38	7,2	1,41
2	1,62	7,5	1,62
3	2,02	8,4	2,22
4	2,16	7,8	2,30

ϕ_γ désigne la puissance calorifique due au rayonnement γ déposée dans du graphite ; elle a été mesurée à l'aide d'un calorimètre type TM.

ϕ_{th} désigne le flux thermique conventionnel (à 2200 m/s)

ϕ_R désigne le flux de neutrons rapides d'énergie supérieure à 1 MeV.

II - MESURES DES FLUX THERMIQUES MOYENS DANS LES CRAYONS D'UO_2

1°) - Principe

Les mesures sont faites à l'aide de maquettes nucléaires comportant des crayons réels correspondant à l'enrichissement des crayons irradiés dans les boucles 1 et 2. Ces mesures sur maquettes doivent se faire obligatoirement à faible puissance (~ 200 kW). Le rapport entre ce niveau de puissance et celui de 15 MW est mesuré à l'aide du même dispositif B.O.A.* associé soit à la maquette, soit à la boucle réelle.

Deux types de maquettes sont utilisées :

Une maquette n° 1 reproduisant le bas de Cyrano I .

Une maquette n° 2 moins absorbante, reproduisant le bas de Cyrano II.

Chacune de ces maquettes peut recevoir un crayon d'UO_2 amovible. Ces crayons sont démontables pour permettre l'introduction et la récupération de détecteurs de cobalt de même diamètre que le crayon et de 0,1 mm d'épaisseur, placés entre les pastilles d'UO_2.

* c'est un dispositif de mesure continue de flux de neutrons thermiques par activation d'argon.

En outre, un détecteur est situé dans la partie inférieure du crayon hors de l'UO_2, dans la même position que celle des moniteurs de flux qui accompagnent les crayons dans les boucles réelles (il est désigné ci-après dans les tableaux par "moniteur").

Le flux de neutrons thermiques donné dans les tableaux ci-dessous est la densité volumique des neutrons d'énergie inférieure à 0,5 ev multipliée par la vitesse 2200 m/s. La section efficace de la réaction n, γ sur le ^{59}Co est prise égale à 38b. La dépression de flux thermique dans le détecteur est égale à 0,928, et l'activation épithermique du détecteur estimée à 8 %.

2°) - Résultats des mesures sur maquettes

a) - Maquette de Cyrano I

Crayon UO_2 naturel - flux exprimés en 10^{11} n cm^{-2} s^{-1}

	Cote mm / Pos.	0	10	28	46	64	82	100	Moniteur	Observations
Maq. n° 1	3	5,3	5,2	5,05	4,95	4,95	4,7	4,85	5,9	S = 1,6 10^9
Maq. n° 2	3	6,15	6,0	5,85	5,7	5,6	5,5	5,45	7,2	S = 2,0 10^9

Où S est la sensibilité du dispositif B.O.A. en n/cm^2 par impulsion comptée.

Remarque

Le gain en neutrons est de 16 % environ entre la maquette n° 2 et la maquette n° 1 compte tenu de la reproductibilité du niveau de puissance.

b) - Maquette de Cyrano II

Crayon UO_2 enrichi à 4 % - Flux exprimés en 10^{11} n cm^{-2} s^{-1}

	Cote / Pos.	0	20	40	60	80	100	Moniteur	Observations
Maq. n° 2	3	5,9	5,15	5,1	5,0	4,95	6,0	6,9	S = 1,69 10^9
Maq. n° 2	1	5,25	4,53	4,5	4,4	4,35	5,15	6,2	S = 1,27 10^9

Remarque

Le gradient de flux entre les positions 3 et 1 est égal à 1,13 environ compte tenu de la reproductibilité du niveau de puissance d'une irradiation à l'autre.

c) - Flux moyen dans les différents crayons exprimés en 10^{11} n cm^{-2} s^{-1}

Pos.	Maq.	% U^{235}	Flux moyen	Rapport $\frac{\text{flux moyen}}{\text{flux moniteur}}$
3	1	0,7	5,05	0,86
3	2	0,7	5,8	0,81
3	2	4	5,15	0,75
1	2	4	4,55	0,73

d) - Flux moyen dans Cyrano II et I à 15 MW

Dans la position d'irradiation 3, le dispositif B.O.A. qui équipait Cyrano II, donne pour le flux moyen à 15 MW, lors de la divergence du 1er avril, un facteur de multiplication de 59 par rapport aux mesures à 200 KW. On calcule ainsi la valeur de $3,05.10^{13}$ n $cm^{-2}s^{-1}$ Si on applique ce facteur à Cyrano I dans la même position d'irradiation, on trouve un flux thermique moyen égal à $2,98.10^{13}$ n cm^{-2} s^{-1}.

III - CALCUL DE Q_c

1°) - Cas de Cyrano I

a) - Avec les données figurant en annexe III, on calcule en adoptant pour l'énergie libérée par une fission 182 MeV

$$Q_1 = 264,7\ 10^{-13}\ \overline{\Phi}\ (1 + \alpha)$$

où $\overline{\Phi}$ est le flux moyen de neutrons thermiques dans le crayon, et α le terme correctif tenant compte des fissions épithermiques ($\alpha \simeq 0,02$).

b) - Le calcul de l'énergie déposée par les γ de la pile dans le combustible est fait à partir de mesures effectuées dans le réacteur Triton avec des calorimètres à noyau de graphite et à noyau de plomb. Les mesures faites sur le plomb sont intéressantes car le numéro atomique est proche de celui de l'uranium et les chiffres peuvent être aisément extrapolés.

L'échauffement spécifique de l'uranium est 2,5 fois plus élevé que celui sur graphite pour de petits échantillons ; en outre, dans le cas d'un barreau d'oxyde d'uranium de 11 mm de diamètre, on calcule que le coefficient de dépression de flux γ est égal à 0,67,

d'où

$$p_\gamma (W/g) \text{ dans } UO_2 \simeq 1,66\ p_\gamma (W/g) \text{ dans le graphite}$$

p_γ est la puissance déposée dans le graphite mesurée en plaçant un calorimètre type TM dans le canal d'eau de la boucle,

d'où pour la position d'irradiation 3 :

$$Q_c = (1,66)\ (2,02) + (264,7)\ (2,98)\ (1,02)$$
$$= 1140\ W.$$

2°) - Cas de Cyrano II

En utilisant les données de l'annexe V on calcule $Q_1 = 1497,5.10^{-13}\ \Phi (1 + \alpha)$, et de la même manière que précédemment, pour la position d'irradiation 3 :

$$Q_c = 1,66\ (2,02) + (1497,5)\ (3,05)\ (1,02)$$
$$= 4994\ W$$

IV - CALCUL DE Q_s

L'effet principal est celui du rayonnement γ et en deuxième lieu, celui des réactions (n, γ).

1°) - Puissance calorifique due au rayonnement du coeur

On utilise pour cela les résultats de mesures de flux γ à l'aide de calorimètres à noyau de graphite pour les matériaux de structure.

Soient :

W_G	puissance spécifique mesurée dans le graphite	en W/g
$\overline{\mu}_e$	coefficient d'absorption d'énergie moyen des γ dans les matériaux de la capsule	en cm^2/g
μ_{eG}	coefficient d'absorption d'énergie du graphite	en cm^2/g
D	facteur de dépression de flux γ dans la capsule.	

La puissance spécifique moyenne dans la capsule W est égale à

$$W = W_G \frac{\overline{\mu}_e}{\mu_{eG}} D$$

Les calculs sont faits en prenant pour D la valeur

$$D = D_o \left[1 + \frac{\overline{\mu} - \overline{\mu}_e}{\overline{\mu}} (1 - D_o)\right]$$

où D_o représente la probabilité moyenne, qu'a un γ entrant dans la capsule, de traverser sans choc

$\overline{\mu}$ le coefficient d'atténuation totale moyen des γ dans les matériaux de la capsule.

Les valeurs de D_o sont données dans le rapport CEA 2172.*

La méthode de calcul du facteur D est justifiée par une concordance convenable avec les résultats expérimentaux.

2°) - Effets des captures rayonnantes

La méthode de calcul est exposée dans le rapport CEA 2172.* La puissance moyenne en watt/g s'écrit :

$$W = 1{,}6.10^{-13} \; \Phi_o \, D_n \sum_j X_j \sum_i (p_i \Sigma_i E_{ij})$$

Les indices i sont relatifs aux différents corps, les j aux énergies.

(*) P. Millies, J. Berger, G. Naudet - Energie calorifique d'origine nucléaire dégagée dans les matériaux non fissiles. Rapport CEA 2172.

Φ_o flux neutronique non perturbé en $n/cm^2.s$

D_n facteur de dépression de flux neutronique

X_j probabilité moyenne d'absorption d'un γ d'énergie j né dans le matériau

p_i proportion pondérale du corps i dans la capsule

Σ_i section efficace de capture du corps i en cm^2/g

E_{ij} énergie γ émise entre j et j + 1 MeV lorsqu'une capture a lieu dans le corps i (valeur moyenne) en MeV

3°) - Echauffement des structures

La méthode de calcul précédente permet de calculer l'échauffement des structures par rayonnement γ et par réaction (n, γ).

Echauffement des structures	Position d'irradiation	Capsule type Cyrano I	Capsule type Cyrano II
Par rayonnement γ (W/g)	4	1,53	idem
	3	1,44	
	2	1,15	
	1	0,98	
Par réaction n, γ (W/g)	4	0,29	0,18
	3	0,31	0,19
	2	0,28	0,17
	1	0,27	0,16

ANNEXE III

CHOIX DU MODE DE PRELEVEMENT DES GAZ DE FISSION

Les prélèvements de gaz dans Cyrano I ont été effectués sous vide partiel suivant la première méthode décrite, alors que dans Cyrano II on a essentiellement utilisé la seconde méthode (par balayage) qui offre l'avantage de laisser aux gaz un faible temps de transfert (3 à 5 minutes) et d'éviter ainsi des dépôts trop importants de descendants radioactifs solides des xénons et kryptons (principalement ^{138}Cs et ^{88}Rb) en certains points non protégés des canalisations.

Un second argument a fait préférer le prélèvement par balayage : il a été constaté que la technique des prélèvements par le vide provoquait des élévations importantes des températures dans le combustible. La figure 32 représente en fonction de la pression absolue du gaz de remplissage et de sa nature (He ou H_2) les températures repérées dans Cyrano I par le thermocouple central et par le thermocouple de surface. Ces élévations de température se produisent sans modification de la puissance dégagée, ni des températures du NaK ou de la gaine.

Dans Cyrano II à plus haute température (environ 2000°C) un effet semblable a été observé.

Une interprétation de ce phénomène basé sur l'introduction d'un coefficient d'accommodation thermique pour compenser le saut de température qui se produit lorsque le libre parcours moyen des molécules gazeuses (He ou H_2) devient de l'ordre de grandeur de la distance UO_2 - gaine représente qualitativement les variations observées ; les données concernant les valeurs des coefficients d'accommodation sont trop incertaines pour que l'on puisse espérer un accord quantitatif.

ANNEXE IV

LE CRAYON CYRANO I

1°) - L'UO_2

Lot n° G. 3813	
Enrichissement :	naturel
Poudre : surface BET :	5 m^2/g
O/U :	2,09
Précompression :	1 tonne cm^{-2}
Granulation :	0 à 630 µ
Pressage :	4 t/cm^2 (densité en cru : 5,82)
Frittage :	H_2 1650°C 5 heures

Caractéristiques du fritté

Densité moyenne :	10,62
Porosité fermée :	3 %
O/U ≃	2,001

Impuretés ppm/U	Al	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Si	Zn	C	N	B	Cd	ΣequiB
	<0,20	<24	8	47	6	<25	<8	62	<50	119	5	0,1	<0,2	0,20

Pastille : ø : 11,02 ± 0,01 mm

l : 20 ± 0,01 mm

évidement : néant

2°) - Le crayon

- Combustible

ø : 11,02 ± 0,01 mm

L : 99,98 ± 0,03 mm

Trou central : ø : 1,19 mm)
latéral : ø : 1,19 mm) (sur ~ 50 mm de hauteur

Trou central : ø : 1,06 mm)
latéral : ø : 0,7 mm) (dans le plan de mesure

Distance entre thermocouple central et thermocouple de surface : 4,02 mm

- Thermocouples

Thermocouple central : chromel alumel, gaine acier inoxydable, ø 0,5 mm, code 2 AB AC 05

Thermocouple périphérique: chromel alumel, gaine acier inoxydable, ø 0,5 mm, code 2 AB AC 05

Thermocouple de gaine : chromel alumel, gaine acier inoxydable, ø 10 mm, code 2 AB AC 10

Thermocouple de laine : chromel alumel, gaine acier inoxydable, ø 10 mm, code 2 AB AC 10

- Gaine - acier inoxydable (Gilby Fodor) nuance 348

ø intérieur nominal : 11,07 mm

ø moyen : 11,086 mm

Epaisseur : 0,4 mm

Gainage du crayon sous pression hydraulique 1200 kg/cm^2

ø moyen extérieur après gainage : 11,835 mm

Flèche maximum : 0,6 mm

ANNEXE V

LE CRAYON CYRANO II

1°) - L'UO_2

Lot n° G 3814	
Poudre :	Christine X (BL 41348 du 14.2.64)
Enrichissement :	4,006 ± 0,004
Surface BET :	6 m^2/g
O/U :	2,12
1ère granulation :	de 0 à 160 µ
Pressage :	1 t cm^{-2}
2ème granulation :	de 0 à 630 µ
Pressage :	4 t cm^{-2}
Densité en cru :	5,66
Frittage :	H_2, t°C : 1650, durée : 5 heures

Caractéristiques du fritté

Densité moyenne :	10,58
Porosité fermée :	3,7 %
O/U :	$2,001_7$
Dimension moyenne du grain :	≃7 µ

impuretés 10^{-6}/U	Al	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Si	Zn	C	N	B	Cd	ΣequiB
	<20	5	5	73	< 3	<25	< 8	48	< 50	170	4	0,35	<0,2	0,44

Pastilles ø : 11,02 ± 0,01

1 : 20 mm ±0,01

Evidement hémisphérique :

largeur du méplat : # 0,5 mm

profondeur : # 0,5 mm

2°) - Le crayon

ø : 11,02 ± 0,01

L : 100 mm

Trou central : ø : 1,2 sur 50 mm de profondeur

latéral : ø : 1,2 sur 46 mm "

ø : 0,72 sur 4 mm "

Distance entre thermocouple central et thermocouple de surface : 4,44 mm ± 0,01

- Thermocouples

Thermocouple central : W Re 5 % - W Re 26 %, ø 1,016 (Continental Sensing), gainé tantale

Thermocouple périphérique : chromel alumel, gainé acier inoxydable, ø 0,5 mm, code AB AC 05

Thermocouple de gaine : chromel alumel, gainé acier inoxydable, ø 1 mm, code 2 AB AC 10

Thermocouple de laine : chromel alumel, gainé acier inoxydable, ø 10 mm, code 2 AB AC 10

- Gaine : acier inoxydable, série EL4 premier jeu, nuance 347

ø intérieur nominal : 11,07 mm

ø moyen : 11,088 mm

Epaisseur : 0,4 mm

Gainage du crayon sous pression hydraulique 1200 kg/cm^2 sans palier

ø moyen extérieur après gainage : 11,83 mm

SYMBOLES

V Tension mesurée aux bornes de la résistance chauffante et des lignes (volts)

I Intensité dans résistance chauffante (amp)

r Résistance des lignes (ohm)

p Puissance dissipée dans résistance chauffante (watts)

P Puissance nominale réacteur (MW)

R Valeur de la résistance de mesure (ohm)

T_1 Température mesurée dans la laine de fer (°C)

$\overline{T_1}$ Moyenne des températures mesurées par les thermocouples placés dans la laine de fer (°C)

T_g Température mesurée à l'extérieur de la gaine (°C)

T_e Température mesurée en périphérie du combustible (°C)

T_c Température mesurée au centre du combustible (°C)

T_s Température calculée à la surface du combustible (°C)

Q Puissance calorifique totale engendrée à l'intérieur du volume délimité par la résistance de mesure (W)

Q_1 Puissance déposée par les neutrons et les γ de fission dans le combustible (W)

q_1 Puissance spécifique correspondante (W cm^{-3})

Q_2 Puissance déposée par les γ de la pile dans le combustible (W)

q_2 Puissance spécifique correspondante (W cm^{-3})

Q_3 Puissance déposée par les γ de la pile dans les matériaux de structure situés à l'intérieur du volume délimité par la résistance R (W)

q_3 Puissance spécifique correspondante (W cm^{-3})

Q_4 Puissance déposée par réaction (n, γ) dans le volume défini ci-avant (W)

q_4 Puissance spécifique correspondante (W cm^{-3})

Q_c $Q_1 + Q_2$ (W)

Q_s $Q_3 + Q_4$ (W)

q_c Puissance spécifique moyenne dans le combustible (W cm^{-3}) = $q_1 + q_2$

Wi Flux de chaleur au rayon i (W cm^{-2})

ρ Résistance thermique à l'interface UO_2 - gaine (°C W^{-1} cm^2)

F Rapport du nombre d'atomes d'une espèce gazeuse sortis d'un certain volume de combustible au nombre d'atomes de cette même espèce formés dans le même volume au moment du prélèvement

BIBLIOGRAPHIE

(1) - Thermal conductivity of Uranium
Technical Reports Series n° 59 - IAEA - Vienna (1966)

(2) - R. Soulhier
Comportement des gaz de fission dans les éléments combustibles à oxyde d'Uranium. Tentative de synthèse des résultats expérimentaux, DM/1629.
Communication présentée à la 69° réunion annuelle de l'Am. Cer. Soc. New-York (29 avril - 4 mai 1967)

(3) - J. Berger
Capsule d'irradiation Cyrano. Etude nucléaire et thermique.
Sté européenne pour l'Energie Atomique - Grenoble (1965)

(4) - J.P. Stora et al
Conductibilité thermique de l'oxyde d'Uranium fritté dans les conditions d'utilisation en pile.
Rapport CEA-R 2586 (1964)

(5) - M. Bogaievki et al
New nucl. mat., including non-metallic fuels
I. IAEA - Vienne (1963) 307-22

(6) - D.J. Clough, J.B. Sayers
AERE - R 4690 (1964)

(7) - C. Ringot et al
Transfert thermique UO_2 - gaine. Application au cas de l'élément combustible du 1° jeu EL4.
Rapport CEA - R 2569 (1964)

(8) - P. Chènebault, J.P. Hairion
Am. Cer. Soc. Winter meeting Urbana (Illinois) (20.9.1967) - DM/1666.

(9) - P. Chènebault, G. Kurka, E. Le Boulbin
DM/1672 (1967) à paraître dans Nucl. Inst. and Methods

(10) - P. Chènebault, J.C. Janvier
(non publié)

(11) - J.C. Janvier, B. de Bernardy de Sigoyer, R. Delmas
Irradiation d'oxyde d'uranium en gaine résistante. Effet du jeu diamétral initial sur le comportement global, Programme CC-7 (1° et 2° tranches)
Rapport CEA - R 3358 (1967)

Manuscrit reçu le 6 août 1968

Tableau I

Cyrano I - premier cycle
Etalonnage
(Position 51-1 ; laine de fer sous hélium)

Résistance de chauffage (25°C) 19,33 Ω
Résistance des lignes r = 1,4 Ω

N°	P (MW)	V	I	p (W)	R - Ro (Ω)	TT (°C)	T_c (°C)	T_e (°C)	T_g (°C)
0	0	0	0	0	0	27,25			27,25
1	0	49,9	2,41	112,13	0,119	41,25			46,25
2	0	74,75	3,61	251,61	0,261	52,75			63,25
3	0	99,95	4,82	449,24	0,461	68,50			86,25
4	2	0	0	0	-	53,75			74,75
5	4,2	0	0	0	0,485	68,50	146	128	106,50
6	-	40,1	1,92	71,85	0,540	72	153	140	112,75
7	-	80,2	3,87	289,41	0,736	86,5	175	156	133,5
8	-	120,2	5,78	647,99	1,064	108,5	207	187	164,5
9	-	0	0	0	0,436	64,5	140	123	102,5
10	10,45	0	0	0	1,055	106	286	245	183
11	-	40	1,905	71,12	1,139	111	295	252	190
12	-	80	3,84	286,56	1,351	127	318	274	210
13	-	120	5,73	641,64	1,702	147	351	307,5	241
14	-	0	0	0	1,082	110	292	250	185

Tableau II

Cyrano I - Puissances

Cycle	Position	P (MW)	Flux n. th. ($n\,cm^{-2}\,sec^{-1}$)	$Q_c = Q_1 + Q_2$ (W)	Q_3 (W)	Q_4 (W)	Q_s (W)	$Q_c + Q_s$ (W)	Q mesurée (W)	Flux n. th.* dans UO_2 ($n\,cm^{-2}\,sec^{-1}$)
1	51-1	15	$7,2.10^{13}$	930	521	144	665	1595	1606	$2,65.10^{13}$
2	51-4	15	$7,8.10^{13}$	1114	814	154	968	2082	2230	$2,85.10^{13}$
3	51-3	15	$8,4.10^{13}$	1130	766	165	931	2061	2084	$3,0\ .10^{13}$

* On a pris pour valeur de l'énergie libérée par une fission 182 MeV

Tableau III

Cyrano I - premier cycle

Evolution des températures et des puissances

Date	Heure	T_c (°C)	T_e (°C)	Dose f.cm^{-3}	$\Delta T = T_c - T_e$	Q (W)	$\frac{Q}{\Delta T}$
24 mai	18	421	341	$8,9.10^{15}$	80	1650	20,6
	20	441	356	$2,7.10^{16}$	85	1672	19,7
	22	446	359	4,6. "	87	1702	19,6
	24	446	359	6,4. "	87	1702	19,6
-	2	429	347	8,3. "	82	1615	19,7
	4	421	341	$1,0.10^{17}$	80	1595	19,9
	6	420	341	1,2. "	79	1587	20,05
	8	418	338	1,4. "	80	1627	20,15
25 mai	10	410	335	1,6. "	75	1570	20,95
	12	415	335	1,8. "	80	1582	19,75
	14	412	335	1,9. "	77	1570	20,4
	16	410	335	2,1. "	75	1580	21,05
	18	410	332	2,3. "	78	1587	20,35
	20	409	332	2,5. "	77	1580	20,5
	22	408	332	2,7. "	76	1490	19,6
	24	407	329	2,9. "	78	1570	20,05
-	2	409	332	3,0. "	77	1565	20,15
	4	409	332	3,2. "	77	1568	20,4
26 mai	6	409	332	3,4. "	77	1568	20,4
	8	409	332	3,6. "	77	1587	20,6
	10	409	332	3,8. "	77	1587	20,6
	12	407	332	4,0. "	75	1577	21,0
	14	409	332	4,1. "	77	1595	20,7
	16	413	335	4,3. "	78	1610	20,65
	18	413	335	4,5. "	78	1607	20,6
. . . .	. . . .	. . . .	. . . .	. . . .	. . . .	. . . .	. . . .
10 juin		430	349	$3,7.10^{18}$	81	1732	21,35
Après recuit de 24 heures à 500°C							
11 juin		440	352	$3,9.10^{18}$	88	1773	20,2
12 juin		437	354	$4,1.10^{18}$	83	1755	21,1

Tableau IV

Cyrano I - premier cycle

Dégagement des gaz de fission

Date	Prélèvement n°	Durée de séjour en pile (s)	^{133}Xe dans le prélèvement (atomes)	^{133}Xe cumulé (atomes)	F (^{133}Xe)	^{133}Xe dégagé (at) sous forme Xe dans chaque prélèvement	^{133}Xe dégagé par seconde (atomes)	Remarques
31,5	1	$5,96.10^{5}$	$2,01.10^{13}$	$2,01.10^{13}$	$3,85.10^{-5}$	$0,5.10^{13}$	$5,12.10^{7}$	
8.6	2	12,9 . "	3,25. "	3,97. "	4,6 . "	0,96. "	7,6 . "	
10.6	3	14,5 . "	1,26. "	4,4 . "	4,88. "	0,52. "	9,28. "	entre le prélèvement 3 et le prélèvement 4 le combustible a été recuit à 500°C
11.6	4	15,35. "	1,04. "	4,9 . "	5,33. "	0,6 . "	12,25. "	
14.6	fin de cycle	18 . "		5,4 . "	5,57. "	1 . "	9,92. "	
	5		2,18. "					
	6		0,160."					

Tableau V

Cyrano I - deuxième cycle

Dégagement des gaz de fission

Date	Prélèvement n°	Durée de séjour en pile (s)	^{133}Xe dégagé dans le prélèvement (atomes)	^{133}Xe cumulé (atomes)	^{133}Xe dégagé par seconde (atomes)	F (^{133}Xe)	^{135}Xe dégagés (atomes)	^{135}Xe dégagé par sec. hors flux (atomes)	^{135}Xe dégagé par sec. sous flux (atomes)	^{85m}Kr dégagé dans prélèvement (atomes)	^{85m}Kr dégagé par sec. (atomes)
28.6	7	$5,97.10^{5}$	$4,2.10^{13}$	$4,2.10^{13}$	$11,4.10^{7}$	$6,2.10^{-5}$	$1,0.10^{12}$	$2,1.10^{7}$	$9,9.10^{7}$	$6,9.10^{10}$	$3,0.10^{6}$
"	8	6,02. "	0,1. "	4,3. "	26,4. "	6,3. "	0,1. "	2,3. "	2,7. "	1,7. "	4,1. "
6.7	9	12,57. "	6,5. "	8,1. "	16,5. "	8,2. "	1,0. "	2,1. "	9,9. "	4,9. "	2,2. "
"	10	12,64. "	0,5. "	8,4. "	67 . "	9,2. "	$9,4.10^{10}$	1,4. "	1,8. "	0,9. "	1,4. "
7.7	11	13,5 . "	2,0. "	9,3. "	25,5. "	10,1. "	$1,2.10^{12}$	2,9. "	11,8. "	12,4. "	5,6. "
	chute barres	14,11. "			(21,8. ")						
8.7	12	14,79. "	1,3. "	9,0. "	11,5. "	9,1. "	0,5. "			0,7. "	
9.7	13	15,58. "	1,4. "	8,1. "	1,9. "	9,9. "	$4 .10^{10}$				
	divergence	15,67. "									
12.7	14	18,08. "	2,7. "	8,2. "	13,5. "	10,6. "	$1,1.10^{12}$	2,4. "	11,1. "	6,4. "	2,8. "

Tableau VI

Cyrano I - troisième cycle

Prélèvement n°	Durée séjour en pile dans le cycle (s)	^{133}Xe dans le prélèvement (at)	^{133}Xe dégagé par seconde (at)	^{135}Xe dégagé (at)	^{135}Xe dégagé par seconde hors flux (at)	^{135}Xe dégagé par seconde sous flux (at)	Observations
17	$0,863.10^5$	$0,6\ .10^{12}$	$7,4\ .10^6$	$1,8\ .10^{11}$	$4,5\ .10^6$	$1,78.10^7$	
18	$2,44\ .10^5$	13,65. "	$9,8\ .10^7$	$1,6\ .10^{12}$	$3,4\ .10^7$	$15,9\ .10^7$	
19	$3,29\ .10^5$	9,9 . "	$12,6\ .10^7$	$0,8\ .10^{12}$	$2,1\ .10^7$	$5,9\ .10^7$	
20	$5,97\ .10^5$	30,1 . "	$14,4\ .10^7$	$0,8\ .10^{12}$	$1,8\ .10^7$	$5,9\ .10^7$	
(21) *	$6,81\ .10^5$	1,44. "	$1,79.10^7$	$5,4\ .10^{10}$	$1,4\ .10^6$	$5,3\ .10^6$	
22	$8,54\ .10^5$	29,1 . "	$19,6\ .10^7$	$1,04.10^{12}$	$2,25.10^7$	$10,3\ .10^7$	
23	$9,4\ .10^5$	28 . "	$34,2\ .10^7$	$1,32.10^{12}$	$3,3\ .10^7$	$13,1\ .10^7$	)
(24) *	$12,8\ .10^5$	0,92. "	$3,45.10^6$	$2,1\ .10^{10}$	$5\ .10^5$	$2\ .10^6$	(capsule sous
25	$13,74\ .10^5$	31 . "	$37\ .10^7$	$1,54.10^{12}$	$3,8\ .10^7$	$15,3\ .10^7$	) vide
26	$13,88\ .10^5$	5,7 . "	$38,8\ .10^7$	$3,1\ .10^{11}$	$2,5\ .10^7$	$4,96.10^7$	(
27	$15,4\ .10^5$	35 . "	$25,4\ .10^7$	$1,7\ .10^{11}$	$3,8\ .10^6$	$1,69.10^7$	
28	$18,02\ .10^5$	59,5 . "	$28,2\ .10^7$				
arrêt pile			$29,5\ .10^7$				
29	$18,16\ .10^5$	4,05. "		$2,19.10^{11}$	$1,8\ .10^7$	$3,5\ .10^7$	
30	$18,24\ .10^5$	0,605."					
31	$18,81\ .10^5$	2,57. "		(*) Fuite sur piège			
32	$21,5\ .10^5$	2,54					

Tableau VII

Cyrano II - Intégrale de conductibilité thermique

Puissance pile nom. (MW)	Q (W)	Q_c (W)	$\bar{q}$ (W cm^{-3})	$\int_{T_e}^{T_c} k dT$ (W cm^{-1})	T_c (°C)	T_e (°C)	T_g (°C)	W_s (W cm^{-2})	$\int_{T_s}^{T_c} k dT$ (W cm^{-1})	T_s (°C)	ρ (°C W^{-1} cm^2)
1	300	252	26,93	1,3	123	103	87	7,42	1,90	94	0,94
3	1120	941	100,56	4,86	345	246	175	27,70	7,10	194,5	0,71
5	1920	1613	172,38	8,32	583	378	262	47,49	12,18	295	0,69
7,5	2905	2440	260,76	12,6	924	548	350	71,84	18,42	403	0,74
10	3920	3293	351,92	17,0	1283	713	433	96,95	24,87	505	0,74
12,5	4920	4133	441,69	21,3	1695	875*	527	121,69	31,21	589	0,51
15	5870	4931	526,97	25,4	(2013)2056	1025*	(587)610	145,18	37,23	695	0,69
10	3955	3322	355	17,1	1240	715*	439	97,80	25,08	504	0,66
5	1890	1588	169,71	8,2	566	372*	253	46,75	11,99	291	0,81
10	3680	3049	325,85	15,7	1186	666*	421	89,77	23,02	477	0,62
12	4440	3730	398,6	19,2	1494	797*	493	109,81	28,16	544	0,46
13	4812	4042	431,97	20,9	1645	867*	515	119	30,52	581	0,55
14	5240	4402	470,5	22,7	1807	918*	545	129,6	33,24	596	0,32
15	5570	4679	500	24,15	1931	980*	575	137,75	35,33	628	0,38
15	5810	4880	521,53	25,2	2007	1018*	591	143,68	36,85	646	0,38
15	6620	5561	594,3	28,7	2280	1170*	668	163,7	41,99	730	0,38

* Températures corrigées (voir texte)

Tableau VIII

Cyrano II - deuxième cycle

Prélèvement	Durée d'irradiation (s)	Dose (fissions/cm^3)	^{133}Xe dégagé dans le prélèvement (atomes)	$F(^{133}Xe)$	^{85}Kr dans le prélèvement (atomes)	$F(^{85}Kr)$	^{133}I en fin d'irradiation (atomes)
9	$5,9\ .10^5$	$0,93.10^{19}$	1,8 à $2,3\ .10^{17}$	$8,8.10^{-2}$	$2,5\ .10^{16}$	$10,7.10^{-2}$	
10 + 11	10,46. "	1,66. "	2,75. "	9,7. "	3,25. "	14 . "	$3,8\ .10^{16}$
13 + 14	16,63. "	2,64. "	4,14. "	11,5. "	4,27. "	15,1. "	3,88. "

Tableau IX

Analyse des gaz stables par spectrométrie de masse

Isotopes		Rendement fission	Prélèvement 10 mm^3 TPN	Prélèvement 10 $\frac{mm^3\ TPN}{R dt.\ fiss.}$	Prélèvement 10 Rapport normalisé sur ^{86}Kr	Prélèvement 11 mm^3 TPN	Prélèvement 11 Rapport normalisé sur ^{86}Kr	Prélèvement 13 mm^3 TPN	Prélèvement 13 Rapport normalisé sur ^{86}Kr	Prélèvement 14 mm^3 TPN	Prélèvement 14 Rapport normalisé sur ^{86}Kr
Kr	83	0,54	1,55	2,87	1,01	0,532	0,98	2,13	0,99	0,586	0,95
	84	1	3,21	3,21	1,13	1,03	1,03	4,09	1,02	1,17	1,02
	85	0,293	0,855	2,92	1,03	0,275	0,94	1,16	0,99	0,377	1,11
	86	2,0	5,67	2,83	1	2,01	1	7,98	1	2,3	1
Xe	131	2,93	4,5	1,54	0,54	1,6	0,55	95	0,805	2,79	0,82
	132	4,35	12,25	2,82	1	4,46	1,03	19,9	1,15	5,61	1,12
	134	8,01	23,6	2,95	1,04	8,25	1,03	31	0,97	8,80	0,96
	136	11,15*	28,9	2,6	0,92	10,25	0,92	41	0,92	11,7	0,915

* En considérant la capture neutronique $^{135}Xe + n \rightarrow {}^{136}Xe$ pour un flux de $2,7.10^{13}$ n cm^{-2} s^{-1}

Tableau X

^{85}Kr contenu dans le combustible

Tronçons	Rayon moyen de carottage (mm)	Poids de la carotte (mg)	Volume recueilli (mm^3 TPN)	Nombre d'atomes ^{85}Kr par mg	Quant. restante / Quant. formée %
T3	4,2	35	$1,12.10^{-2}$	$8,63.10^{12}$	100
T3* face B	0	24,2	$2,07.10^{-3}$	$2,3\ .10^{12}$	32
T3** face C	0	10,83	$1,2\ .10^{-2}$	$2,99.10^{13}$	415
T4	4,7	31,2	$1,0\ .10^{-2}$	$8,63.10^{12}$	100
T4	3,3	40,7	$1,1\ .10^{-2}$	$7,13.10^{12}$	95
T4	1,3	47,35	$3,74.10^{-3}$	$2,13.10^{12}$	29,5
T5	4,5	42,15	$1,13.10^{-2}$	$7,24.10^{12}$	100
T5	0,5	26,35	$4,2\ .10^{-3}$	$4,28.10^{12}$	70

* voir figure 27
** " " 28

Tableau XI

Distribution des gaz de fission stables dans le tronçon T3

	Carotte R0 face B			Carotte R0 face C			Carotte R 4,2		
	mm^3 TPN	at/g UO_2	Rapport norm.**	mm^3 TPN	at/g UO_2	Rapport norm.	mm^3 TPN	at/g UO_2	Rapport norm.
^{83}Kr				$1,69.10^{-2}$	$0,42.10^{17}$	0,74	$2,12.10^{-2}$	$0,16\ .10^{17}$	0,93
^{84}Kr				4,03. "	1,0 . "	0,955	$4,45.10^{-2}$	0,34 . "	1,05
^{85}Kr				1,17. "	0,29. "	0,95	0,84. "	0,065. "	0,68
^{85}Kr*	$0,21.10^{-2}$	$2,3\ .10^{15}$	0,68	1,2 . "	0,3 . "	0,97	1,12. "	0,086. "	0,88
^{86}Kr				8,46. "	2,1 . "	1	8,46. "	0,65 . "	1
^{131}Xe	$2,76.10^{-2}$	$3,06.10^{16}$	0,75	0,093	$2,3\ .10^{17}$	0,75	0,141	$1,08\ .10^{17}$	1,14
^{132}Xe	2,76. "	3,06. "	0,51	0,061	1,5 . "	0,33	0,211	1,6 . "	1,15
^{134}Xe	8,5 . "	9,4 . "	1	0,311	7,7 . "	0,88	0,359	2,75 . "	1,05
^{136}Xe	14,4 . "	$1,6\ .10^{17}$	1,21	0,468	11,6 . "	1	0,506	3,9 . "	1,07

* Spectrométrie γ
** Sur ^{134}Xe

Tableau XII

Distribution des gaz de fission stables dans le tronçon T4

	Carotte R 1,3			Carotte R 3,3			Carotte R 4,7		
	mm^3 TPN	at/g UO_2	Rapport normalisé	mm^3 TPN	at/g UO_2	Rapport normal.	mm^3 TPN	at/g UO_2	Rapport normal.
^{83}Kr	$0,56.10^{-2}$	$0,32.10^{16}$	0,79	$1,64.10^{-2}$	$1,08.10^{16}$	1	$1,63.10^{-2}$	$0,14\ .10^{17}$	1
^{84}Kr	1,31. "	0,74. "	1	3,5 . "	2,3 . "	1,14	3,27. "	0,28 . "	1,08
^{85}Kr				0,62. "	0,41. "	0,7	0,98. "	0,084. "	1,11
^{85}Kr*	0,37. "	0,21. "	0,97	1,1 . "	0,72. "	1,23	1,0 . "	0,086. "	1,13
^{86}Kr	2,63. "	1,49. "	1	6,04. "	4,0 . "	1	6,04. "	0,52 . "	1
^{131}Xe	$4,0\ .10^{-2}$	$2,3\ .10^{16}$	1,04	0,095	$6,3\ .10^{16}$	1,07	0,088	$0,76\ .10^{17}$	1
^{132}Xe	4,1 . "	2,3 . "	0,72	0,14	9,2 . "	1,07	0,140	1,20 . "	1,07
^{134}Xe	10,6 . "	6,0 . "	1	0,249	16,5 . "	1,03	0,232	2,0 . "	0,96
^{136}Xe	16,2 . "	9,2 . "	1,11	0,355	23,4 . "	1,06	0,332	2,86 . "	1

* Spectrométrie γ

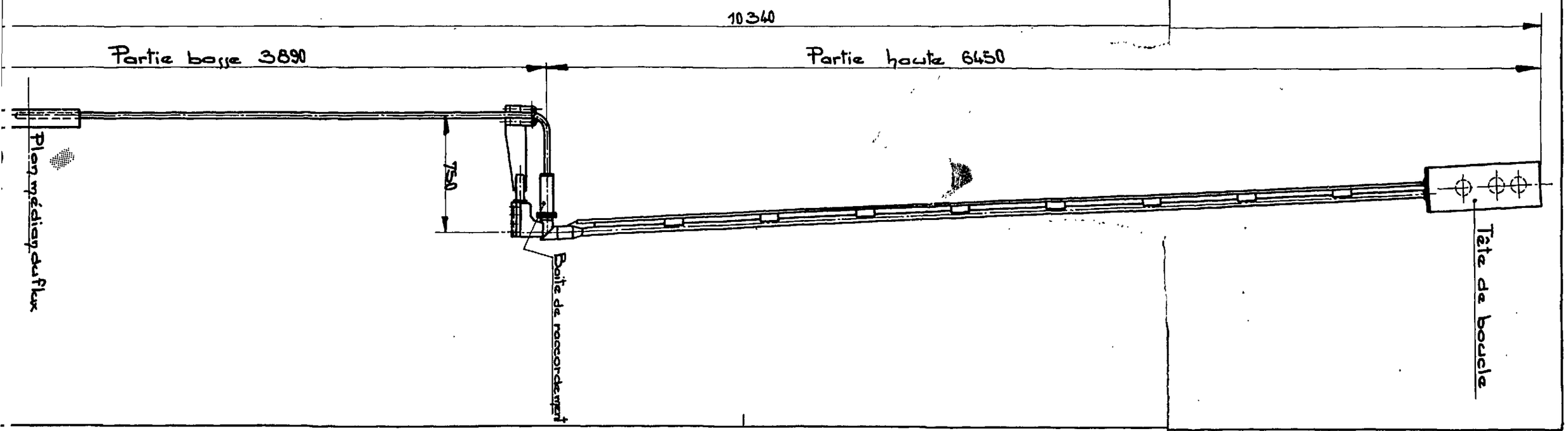
Tableau XIII

Distribution des gaz de fission stables dans le tronçon T5

	Carotte R 0,5			Carotte R 4,5		
	mm^3 TPN	at/g UO_2	Rapport normalisé**	mm^3 TPN	at/g UO_2	Rapport normalisé
^{83}Kr				$1,99.10^{-2}$	$0,126.10^{17}$	1,04
^{84}Kr				3,64. "	0,231. "	1,02
^{85}Kr				0,98. "	0,062. "	0,95
^{85}Kr*	$0,42.10^{-2}$	$0,43.10^{16}$	0,95	1,13. "	0,072. "	1,07
^{86}Kr				7,1 . "	0,45 . "	1
^{131}Xe	$4,52.10^{-2}$	$0,46.10^{17}$	1,03	0,097	$0,62\ .10^{17}$	0,935
^{132}Xe	4,6 . "	0,47. "	0,71	0,155	0,99 . "	1
^{134}Xe	12 . "	1,22. "	1	0,264	1,68 . "	0,93
^{136}Xe	17,5 . "	1,78. "	1,04	0,389	2,48 . "	0,99

* Spectrométrie γ
** Sur ^{134}Xe

- DISPOSITIF "CYRANO" - vue d'ensemble éch. 1/20



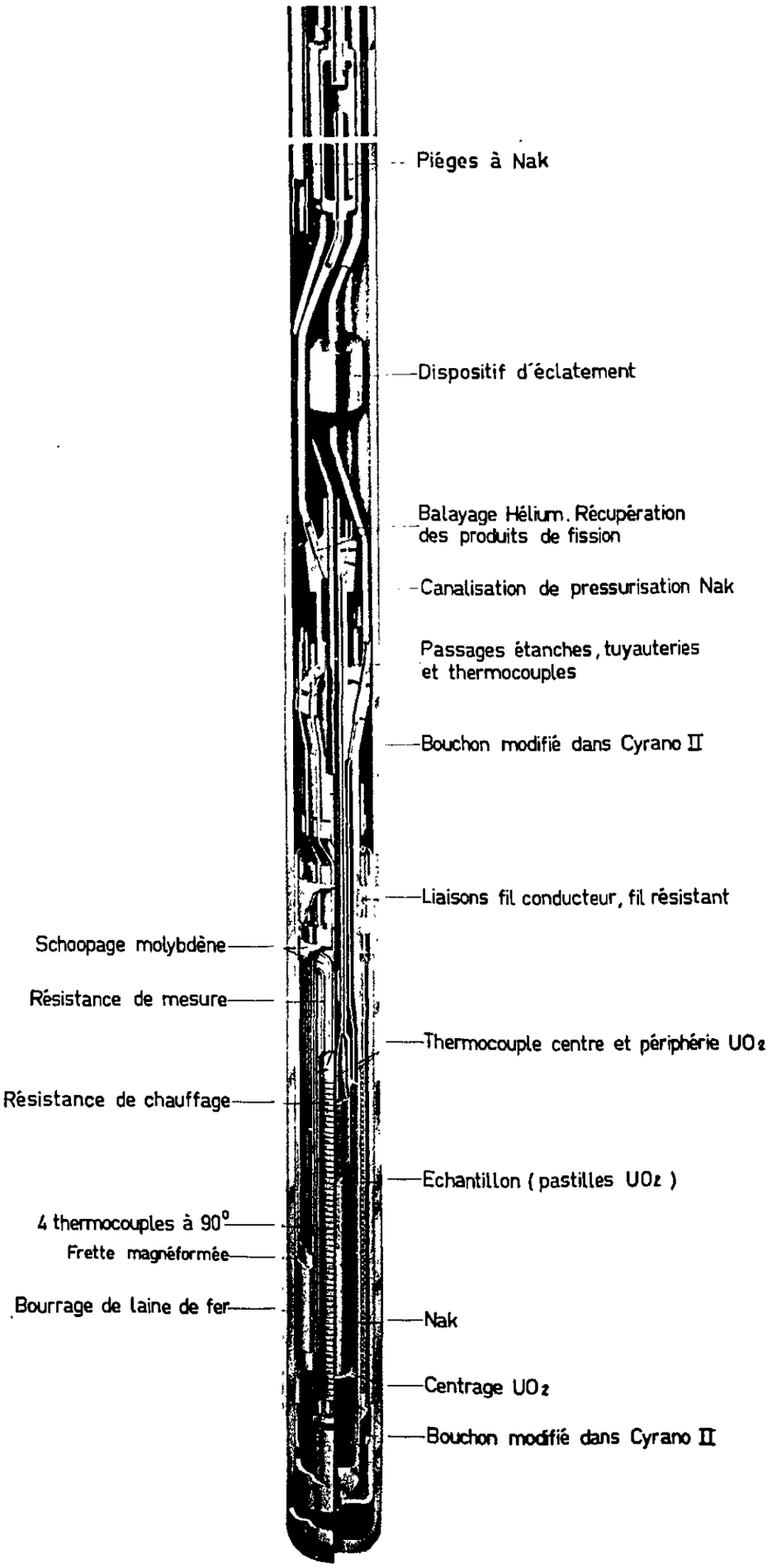

Piéges à Nak
Dispositif d'éclatement
Balayage Hélium. Récupération des produits de fission
Canalisation de pressurisation Nak
Passages étanches, tuyauteries et thermocouples
Bouchon modifié dans Cyrano II
Liaisons fil conducteur, fil résistant
Schoopage molybdène
Résistance de mesure
Thermocouple centre et périphérie UO_2
Résistance de chauffage
Echantillon (pastilles UO_2)
4 thermocouples à 90°
Frette magnéformée
Bourrage de laine de fer
Nak
Centrage UO_2
Bouchon modifié dans Cyrano II

Fig. 2

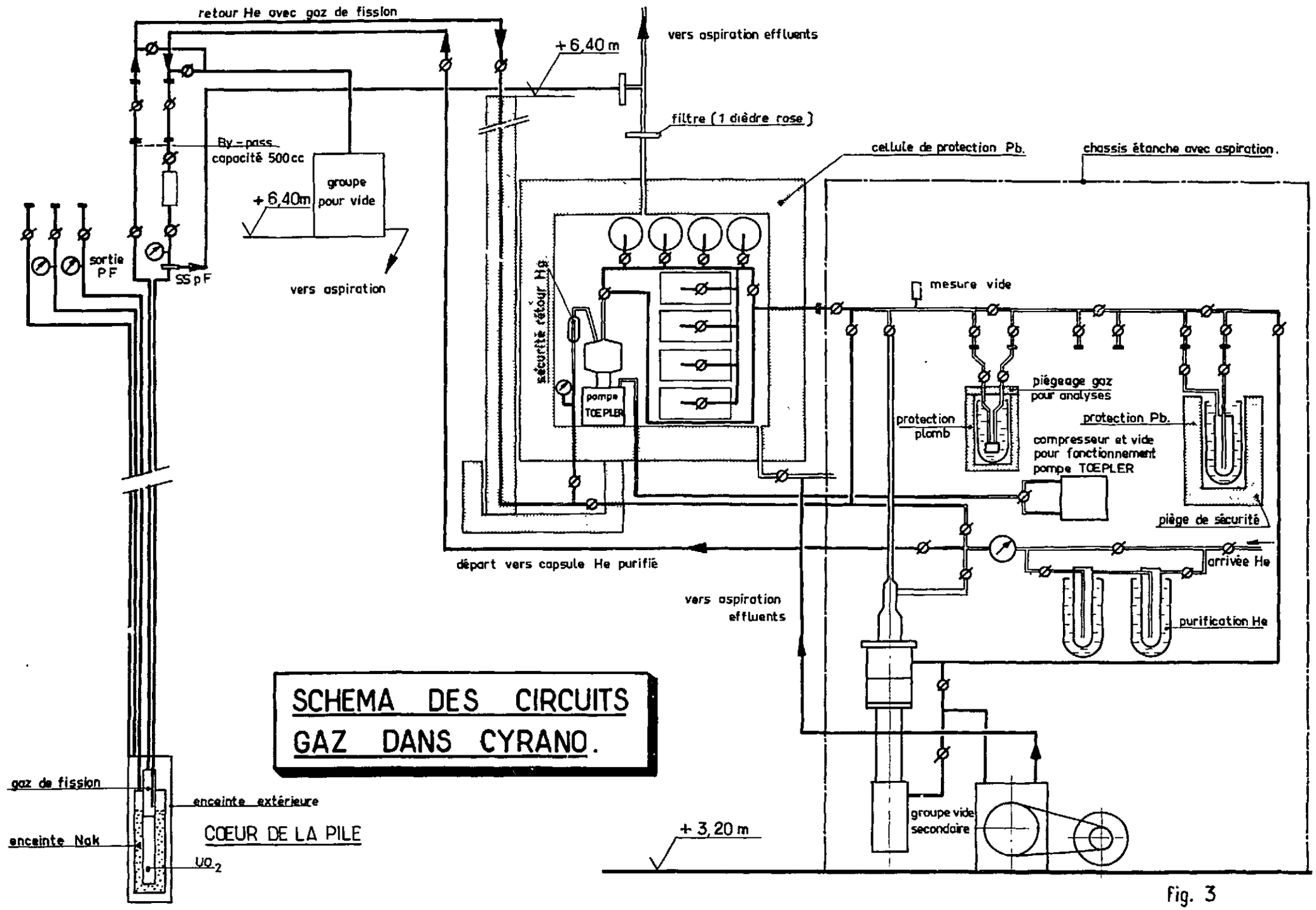
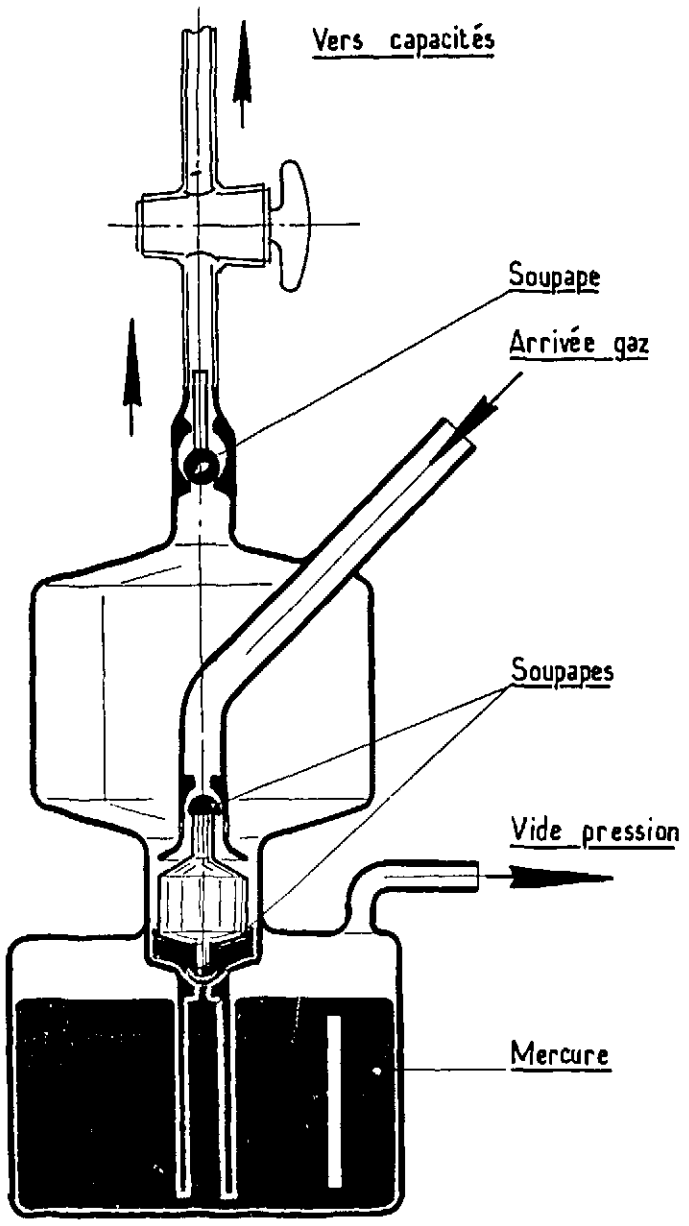

retour He avec gaz de fission
+6,40 m
vers aspiration effluents
filtre (1 dièdre rose)
By-pass
capacité 500 cc
groupe
pour vide
+6,40m
sortie
PF
SS pF
vers aspiration
cellule de protection Pb.
chassis étanche avec aspiration.
sécurité retour Hg
pompe
TOEPLER
mesure vide
piégeage gaz
pour analyses
protection
plomb
protection Pb.
compresseur et vide
pour fonctionnement
pompe TOEPLER
piège de sécurité
départ vers capsule He purifié
arrivée He
vers aspiration
effluents
purification He
SCHEMA DES CIRCUITS
GAZ DANS CYRANO.
gaz de fission
enceinte extérieure
enceinte Nak
CŒUR DE LA PILE
UO2
+3,20 m
groupe vide
secondaire

Fig. 3

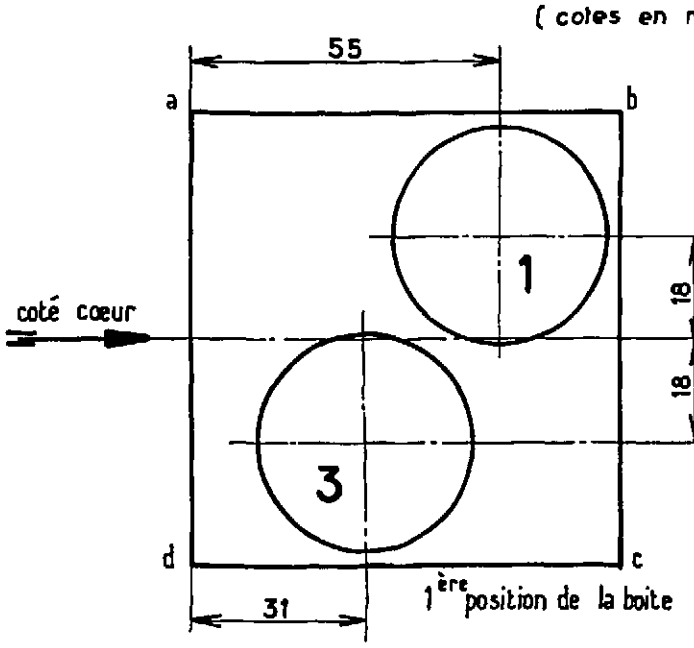


Pompe "TŒPLER"

Fig. 4

SCHEMA DE LA BOITE A EAU ET DES POSITIONS D'IRRADIATION.

(cotes en mm)



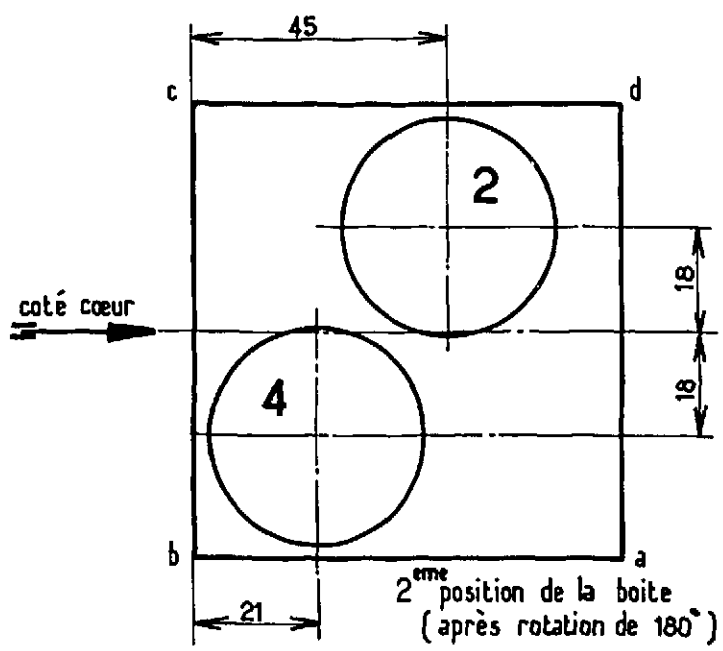


Fig. 5

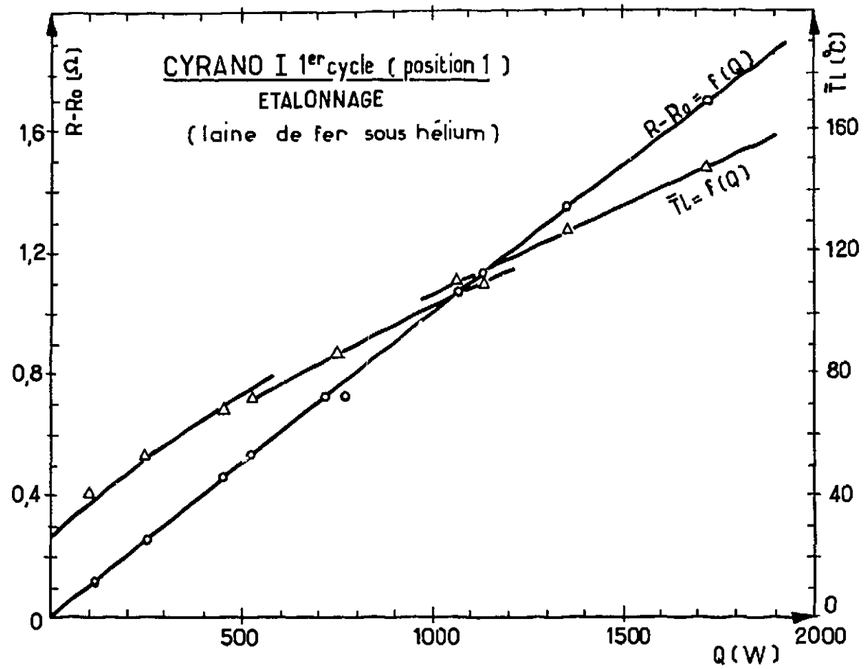


Fig. 6

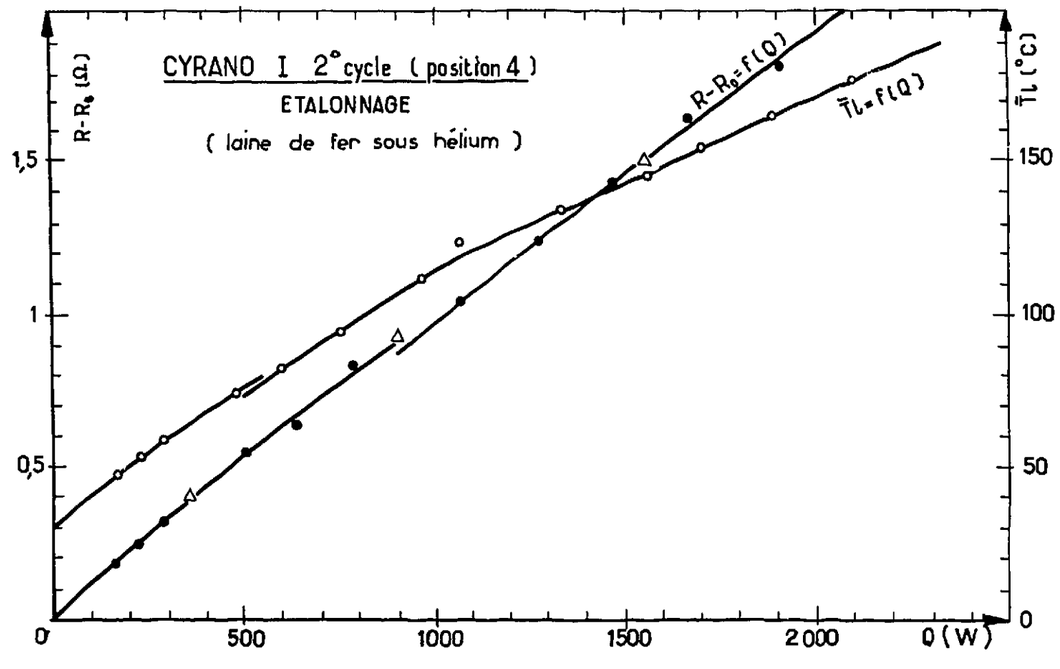


Fig. 7

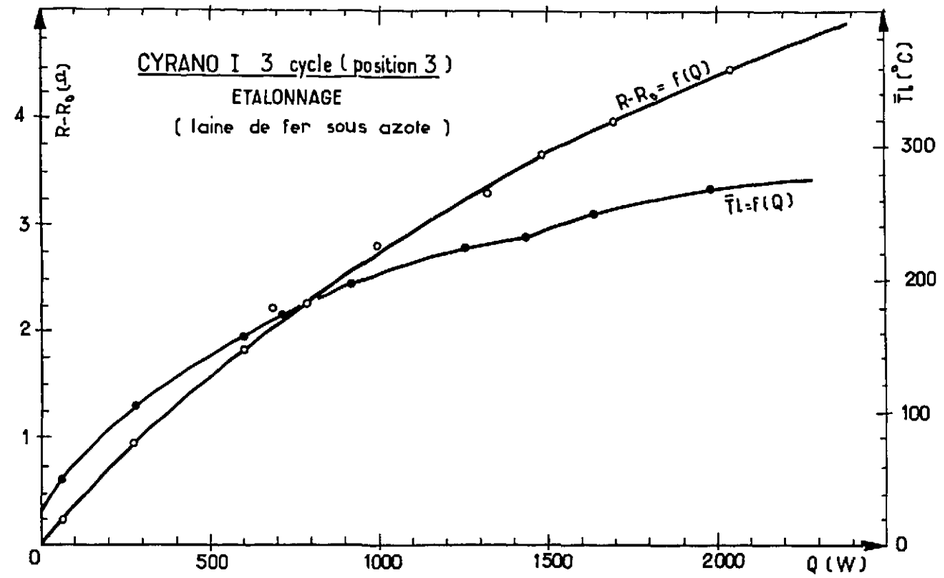
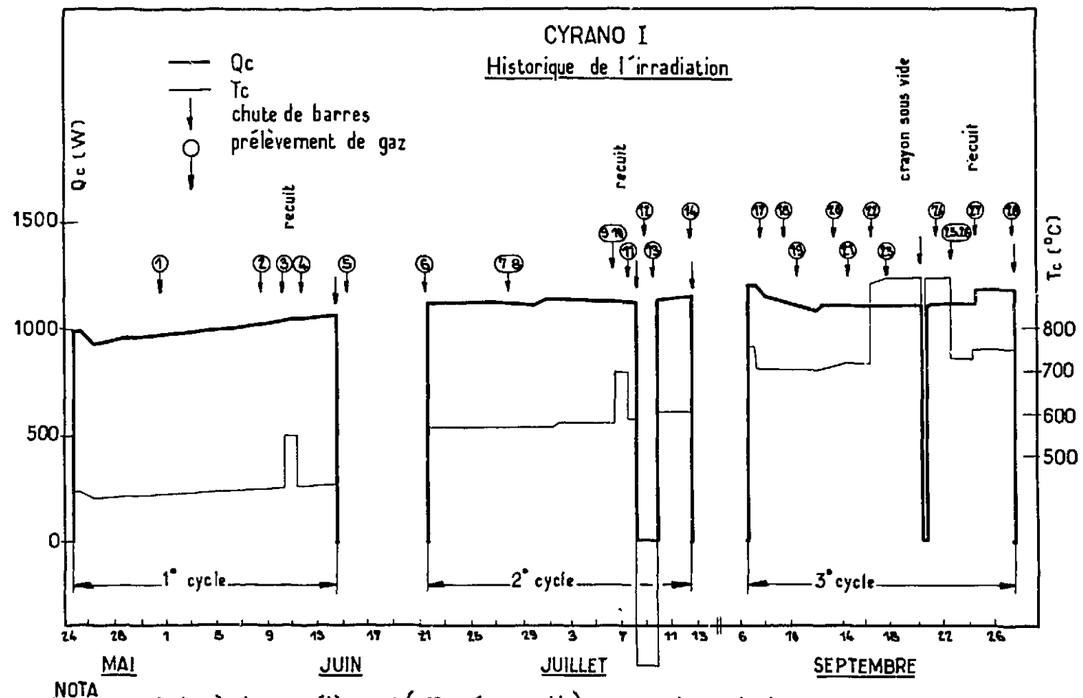


fig. 8



NOTA en principe à chaque prélèvement (effectué sous vide), correspond un pic de température non figuré ici.

fig. 9

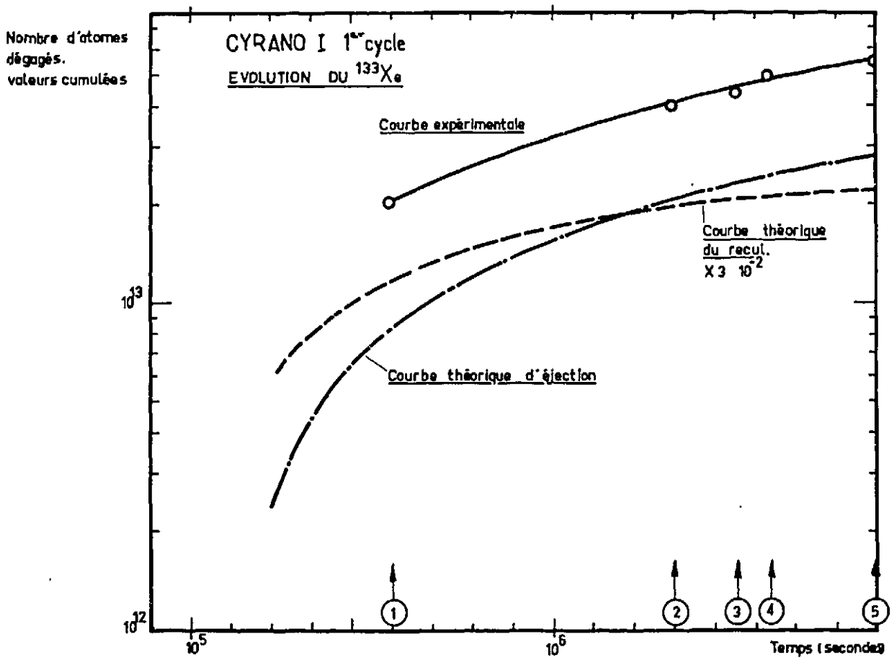


Fig.10

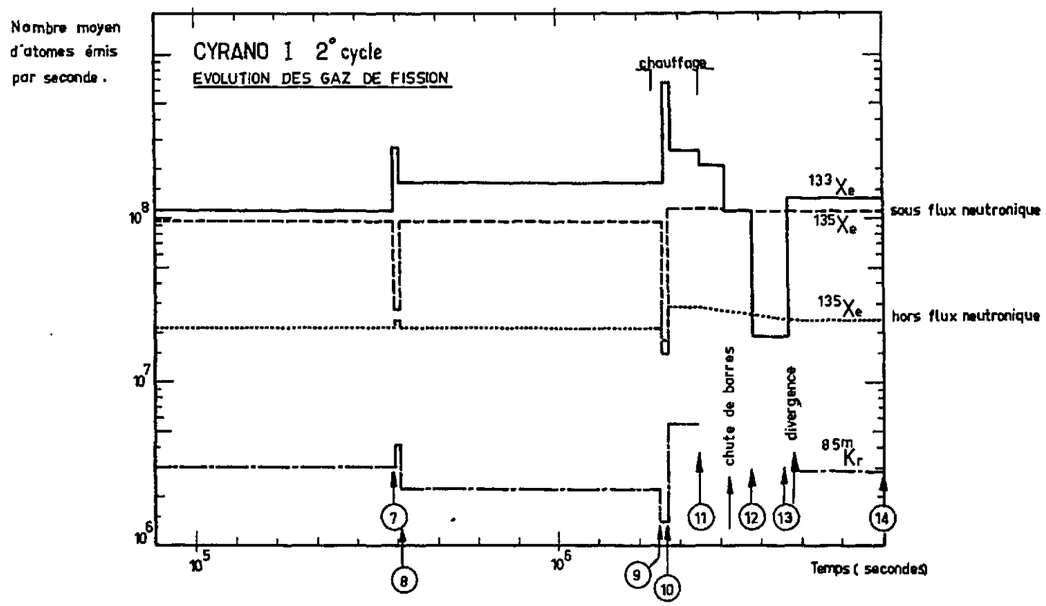


Fig. 11

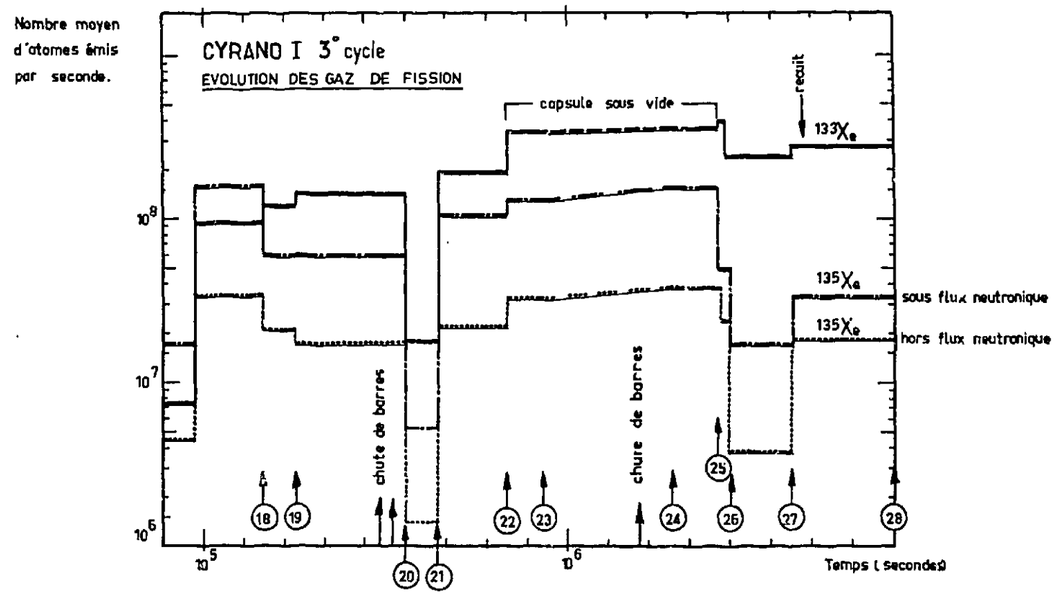


fig. 12

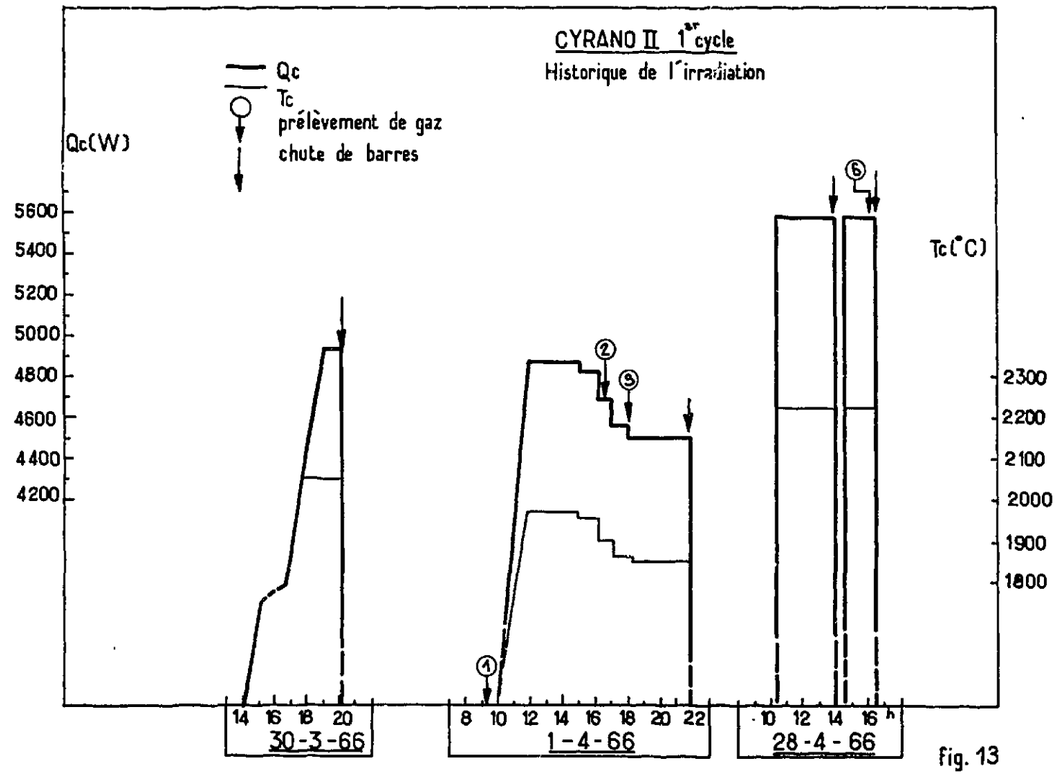


fig. 13

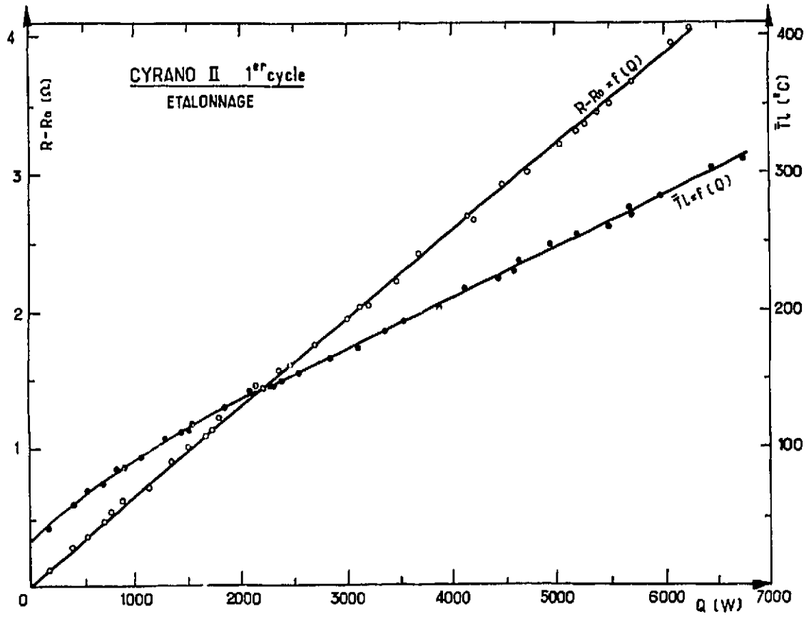


Fig. 14

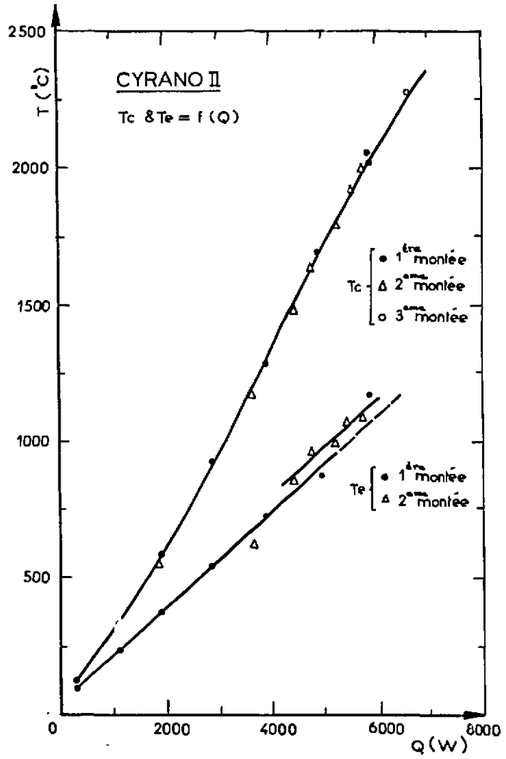


fig. 15

Répartition longitudinale du flux
d'après une dosimétrie sur maquette.

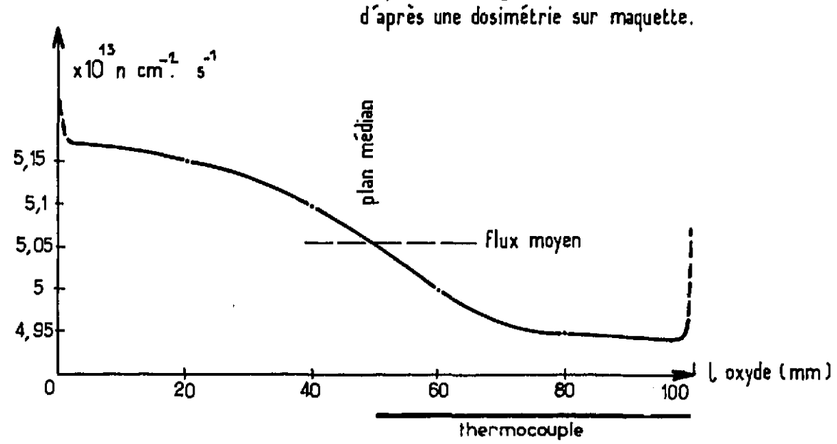


fig. 16

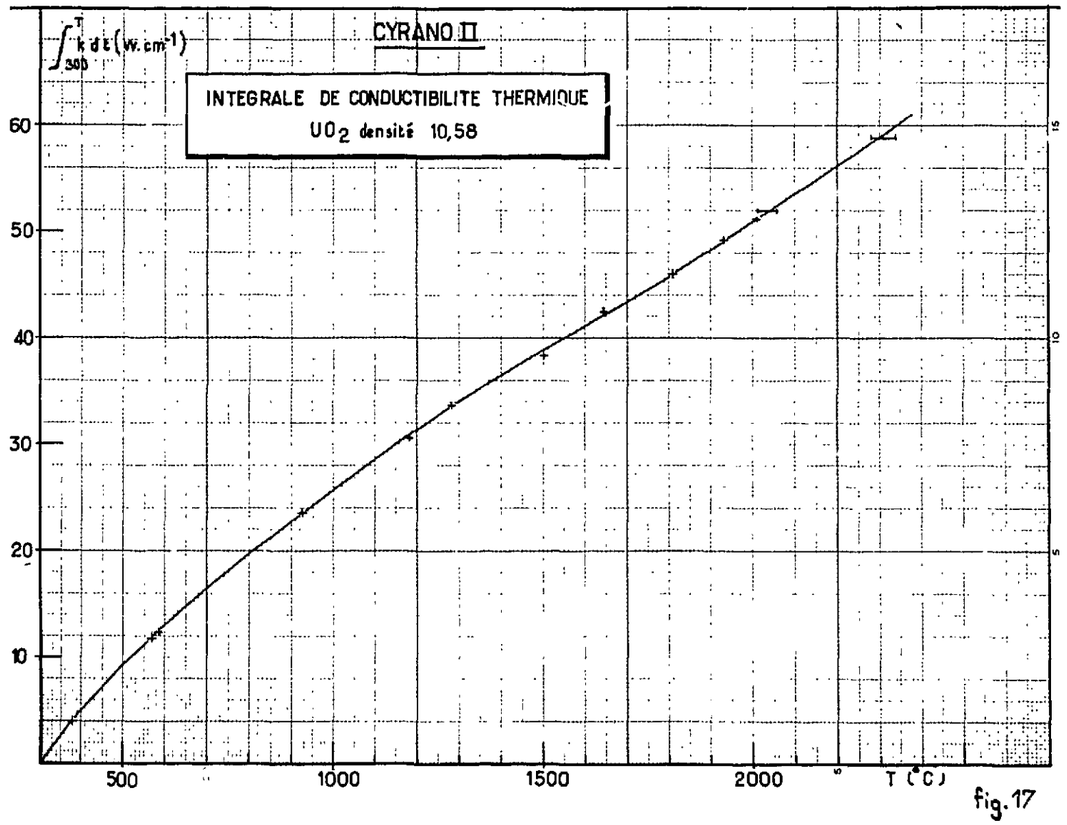


fig. 17

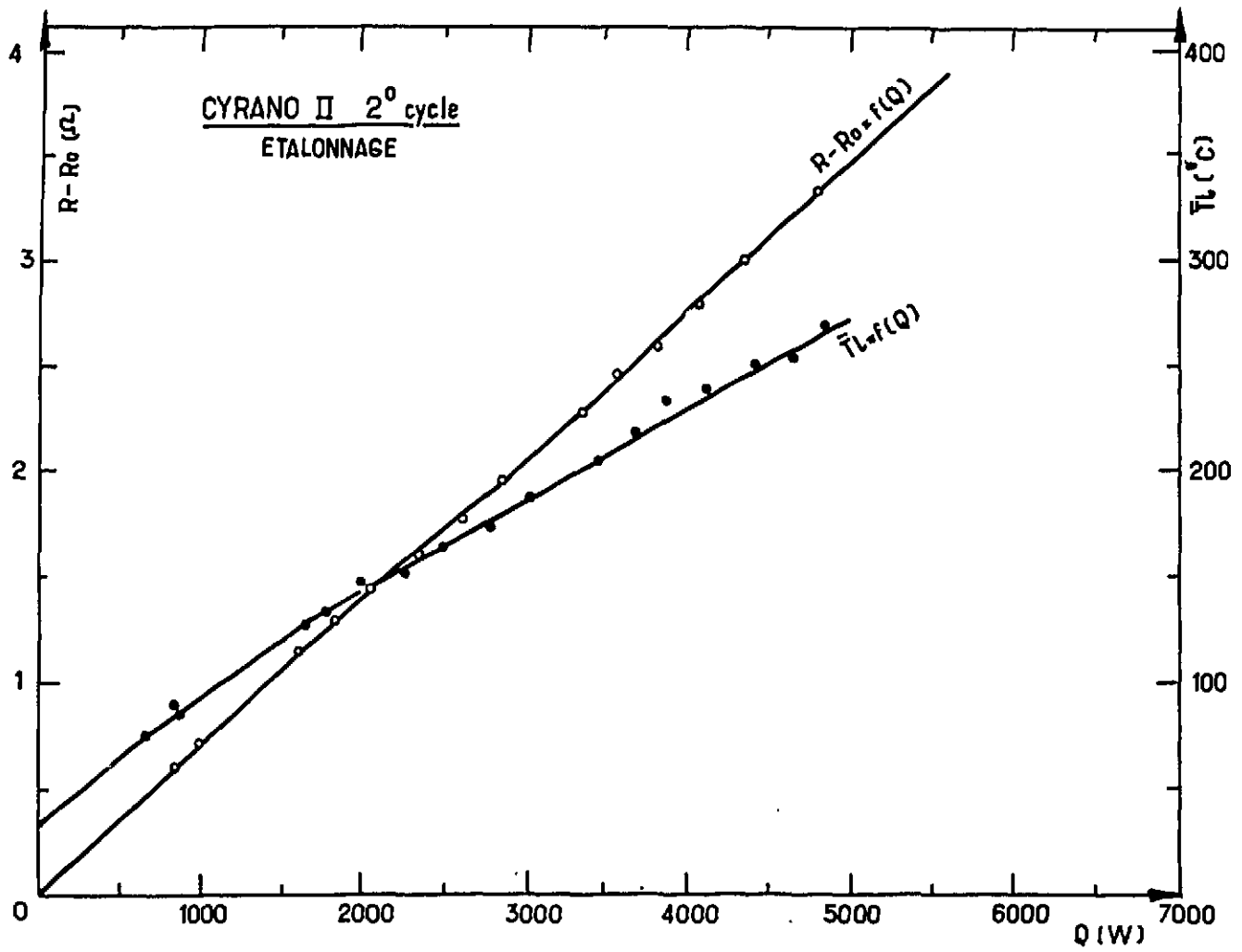

CYRANO II 2° cycle
ETALONNAGE
R-Ro (Ω)
Tl (°C)
R-Ro=f(Q)
Tl=f(Q)
Q (W)
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
1
2
3
4
100
200
300
400

Fig. 18

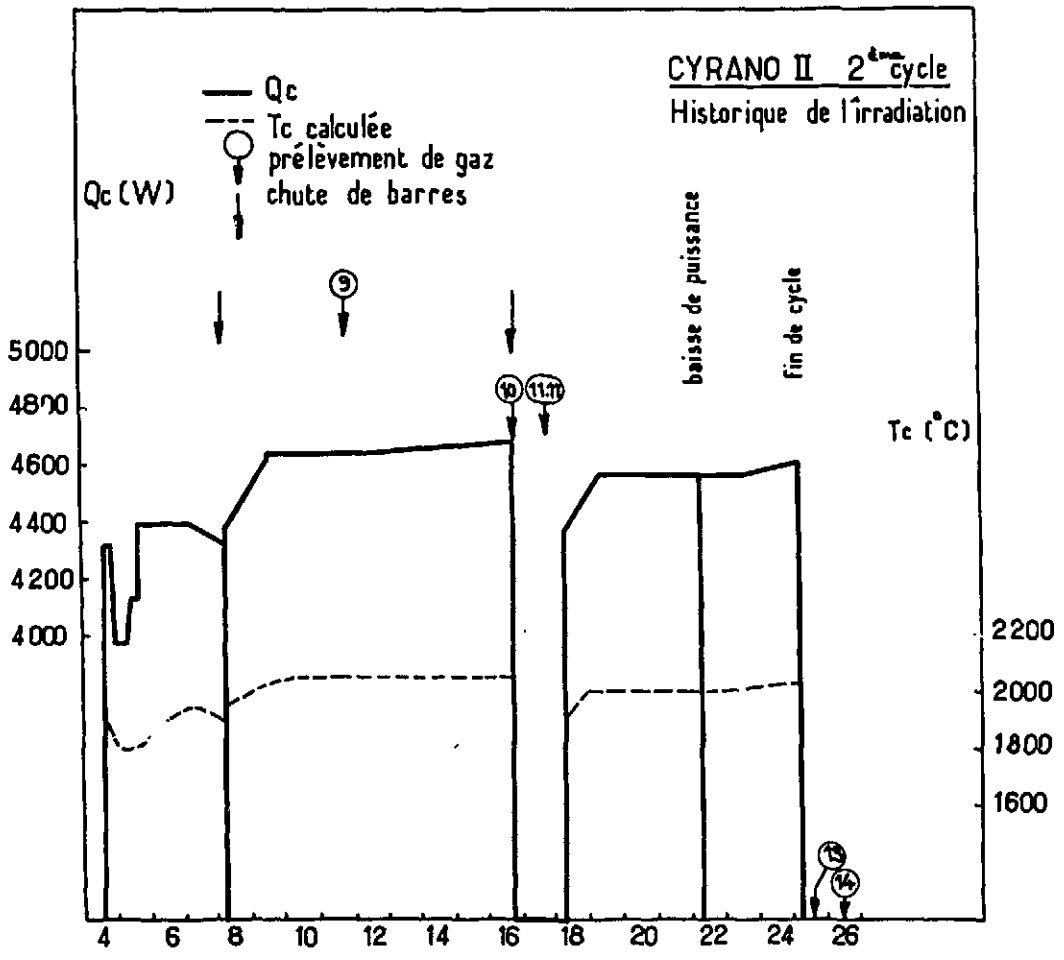

CYRANO II 2ème cycle
Historique de l'irradiation
Qc
Tc calculée
prélèvement de gaz
chute de barres
Qc (W)
Tc (°C)
baisse de puissance
fin de cycle
5000
4800
4600
4400
4200
4000
2200
2000
1800
1600
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26

Fig. 19

— CYRANO II —

PLAN DE TRONCONNAGE DU CRAYON. Ech 1

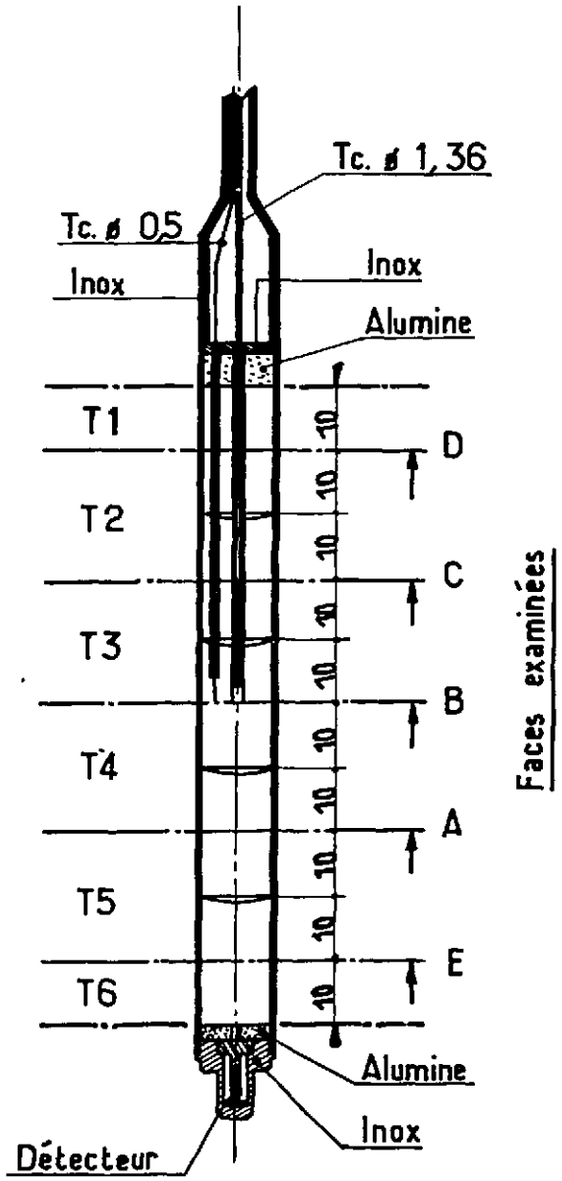


Fig. 20

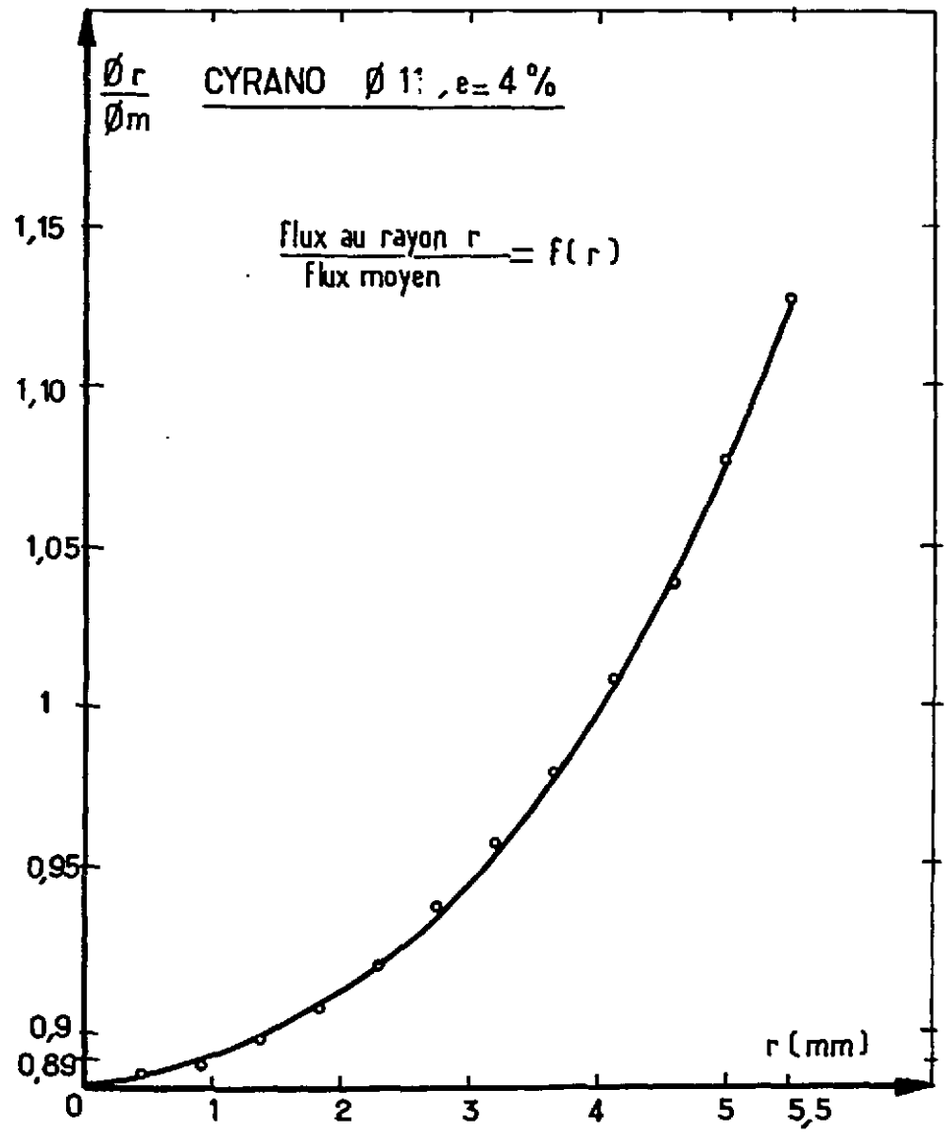


Fig. 21

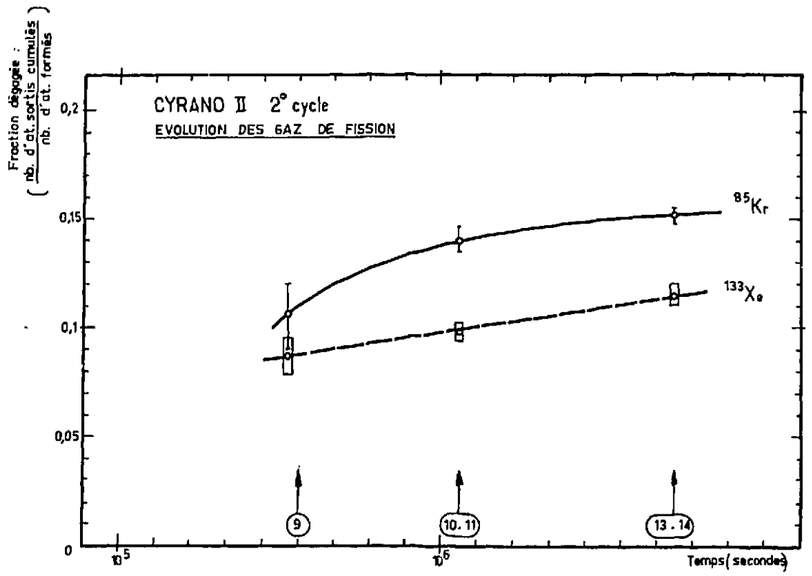


fig.22

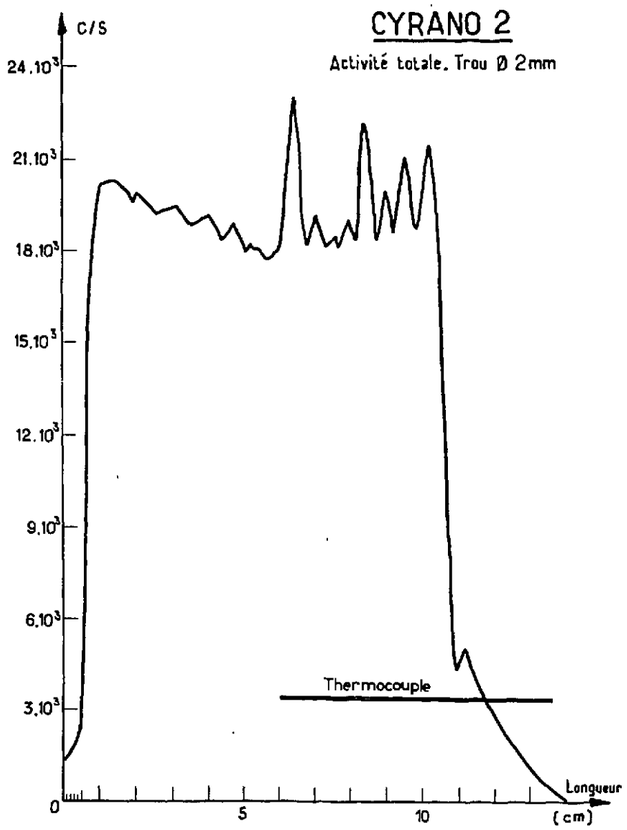


fig. 23

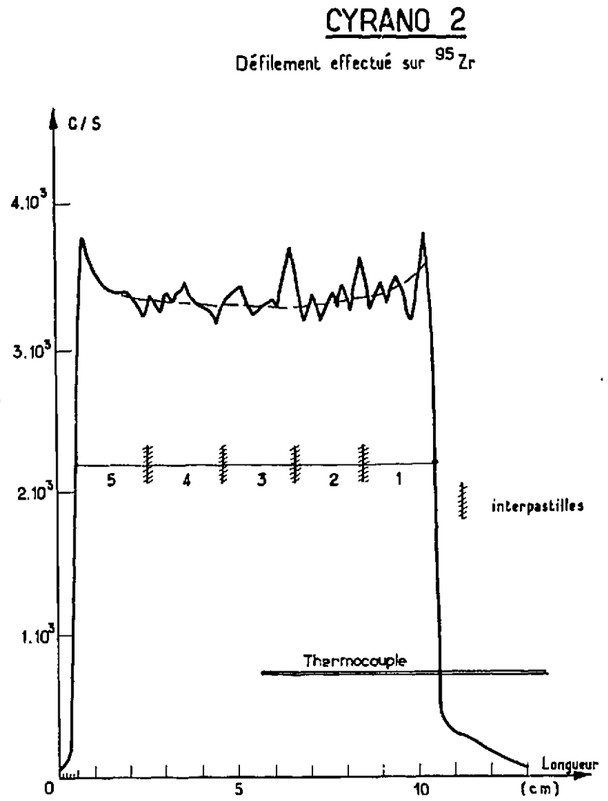
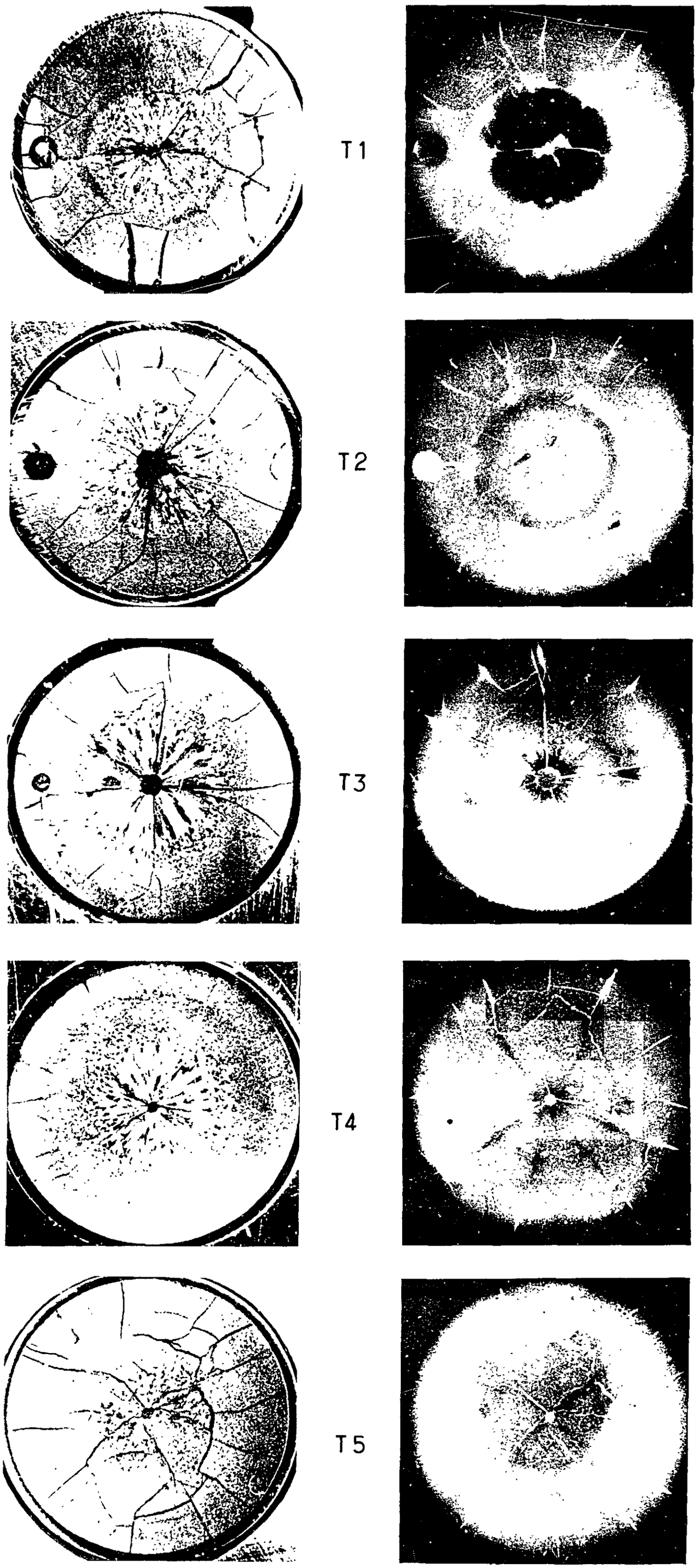


fig. 24



macrographie X 6

autoradiographie X 6

Fig. 25 CYRANO II

T1

T2

macrographie

X 6

autoradiographie

X 6

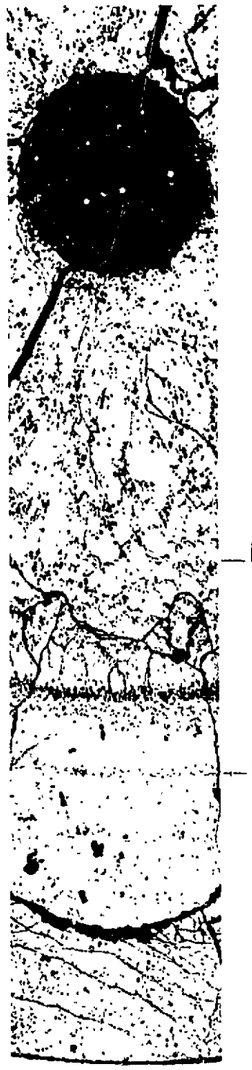
CYRANO II : coupe longitudinale.

fig. 26

CYRANO II T3 face B

X 25

fig. 27



CYRANO II T3 face C

X 25

fig. 28

CYRANO II _ TRACES DES GROSSISSEMENTS DE GRAIN ET DE LA CHEMINEE CENTRALE SUR UN DEMI PLAN PASSANT PAR L'AXE DE L'EMPILEMENT.
_ REPERES DE PRELEVEMENTS DE CAROTTES.

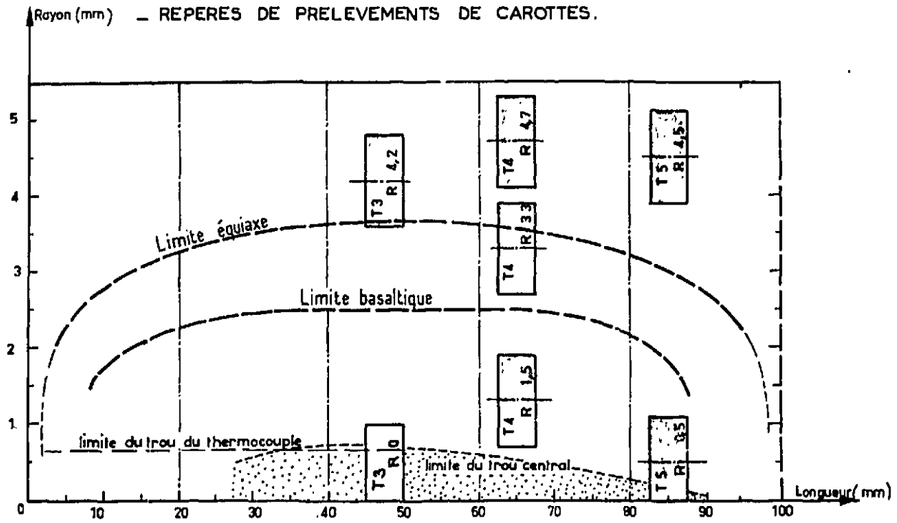


fig. 29

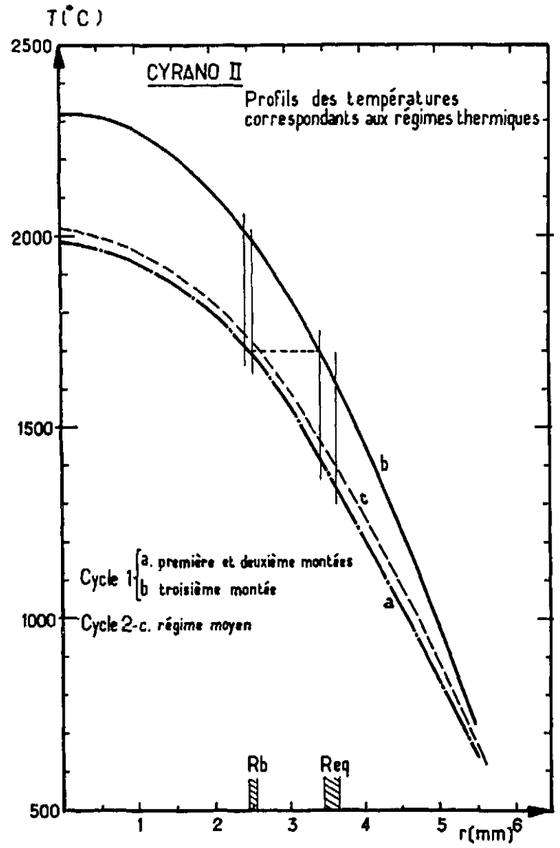
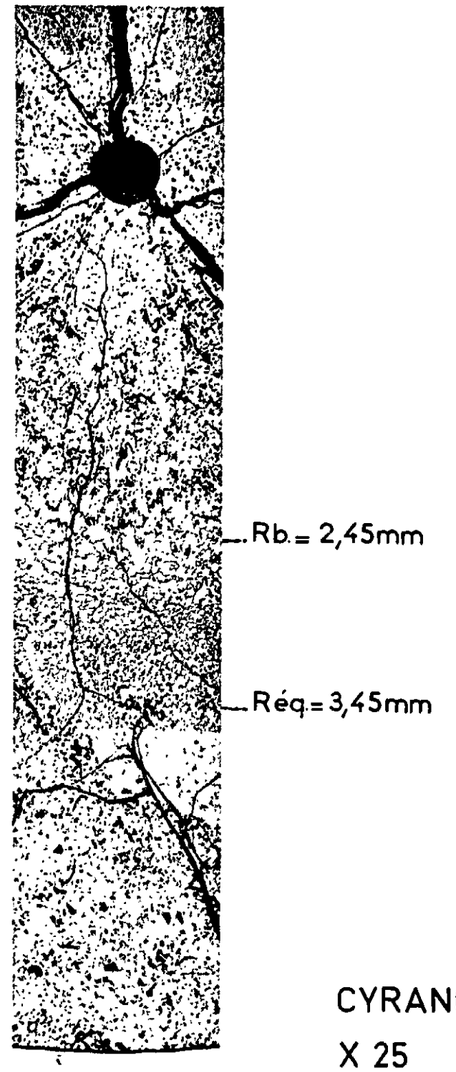


fig. 30



CYRANO II T4 face A
X 25

fig. 31

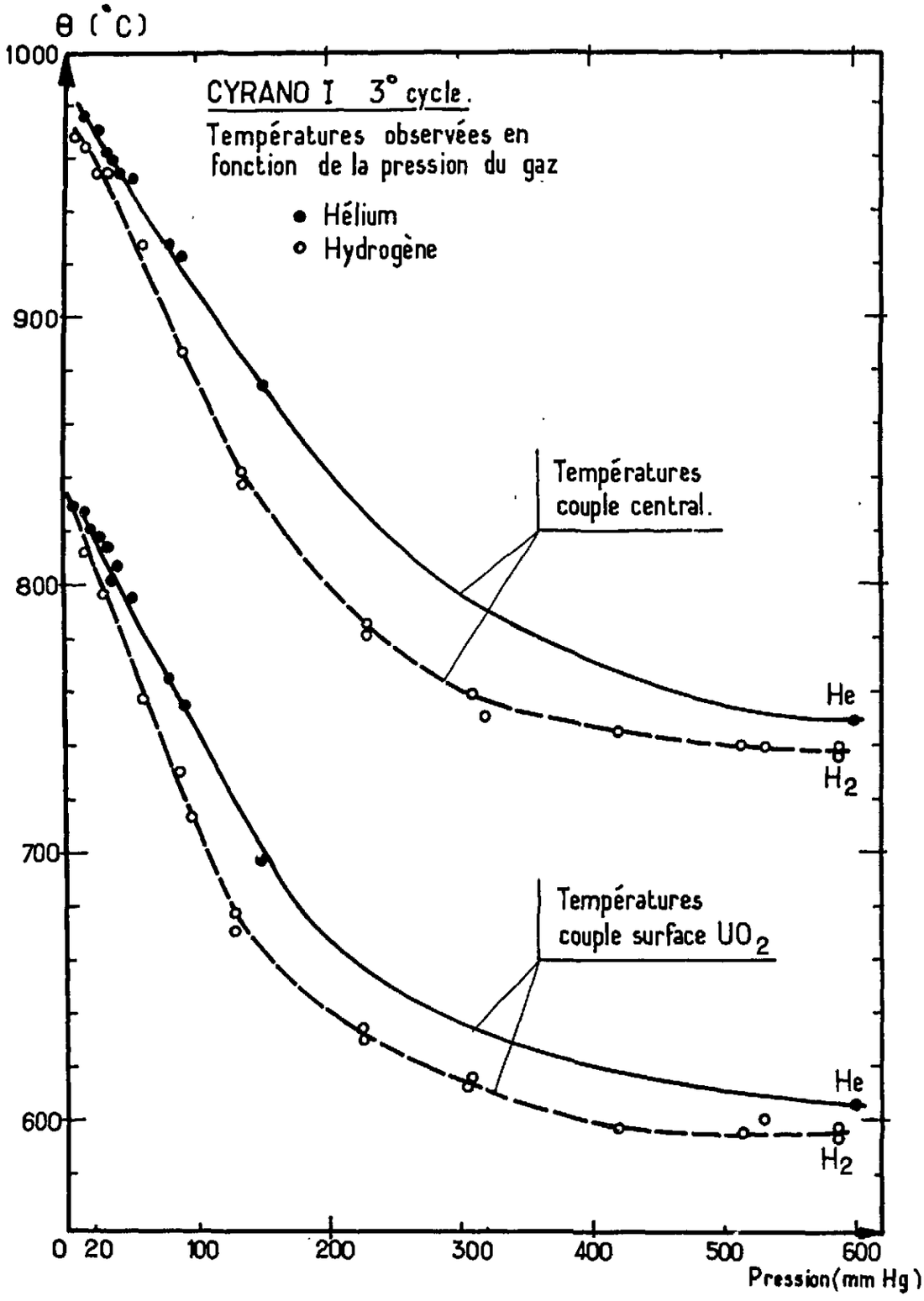

θ (°C)
1000
900
800
700
600
CYRANO I 3° cycle.
Températures observées en fonction de la pression du gaz
● Hélium
○ Hydrogène
Températures couple central.
He
H2
Températures couple surface UO2
He
H2
0
20
100
200
300
400
500
600
Pression (mm Hg)

fig. 32

FIN