

XVIIIème REUNION PLENIERE  
des "Laboratoires chauds et télémanipulation" d'EURATOM  
19 et 20 octobre 1978 au CEN.SACLAY

LES EXAMENS EN CELLULE CHAUDE  
DES COMBUSTIBLES IRRADIES DANS LES REACTEURS THERMIQUE DE PUISSANCE

par

J. BAZIN, B. HOUDAILLE, A. LHERMENIER, N. VIGNESOULT

Commissariat à l'Energie Atomique - CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE SACLAY (France)  
Département de Technologie - Service des Eléments Combustibles et Structures.  
Section d'Exploitation du L.E.C.I.

A.2.

I - INTRODUCTION

Les examens de combustibles irradiés dans les centrales de puissances sont effectués pour répondre aux questions posées par :

- les organismes effectuant des études de recherche et développement du combustible et les organismes de sûreté,
- les fabricants de combustibles
- les exploitants de centrales
- les sociétés de retraitement du combustible irradié.

Les examens peuvent être effectués sur le site du réacteur, dans la piscine de manutention et de stockage du combustible. Il s'agit généralement dans ce cas d'examens non destructifs d'assemblages permettant de faire un constat de fonctionnement. Le "Sipping" test est l'exemple type de ces examens statistiques. Certaines unités possèdent des moyens perfectionnés permettant de faire des examens visuels, des métrologies et des mesures de spectrométrie  $\gamma$  etc... Les examens en piscine présentent l'avantage de pouvoir être faits presque immédiatement après le déchargement du combustible, ils présentent cependant l'inconvénient d'être limités dans le temps (l'exploitant de centrale a des utilisations prioritaires pour sa piscine combustible) et de ne donner du combustible qu'une vue d'ensemble. C'est pour pallier ces deux inconvénients qu'il est nécessaire d'effectuer des examens en cellules chaudes : Examens détaillés très complets et totalement indépendants du fonctionnement de la centrale. Les examens en cellules chaudes peuvent de plus être destructifs et être utilisés pour les études de R et D du combustible : gaine, matériau fissile, composants de l'assemblage ainsi que pour des expertises : compréhension des mécanismes de rupture de gaine. La manutention et le démantèlement en cellule chaude, avant examen des assemblages de combustibles irradiés, présentent un certain nombre de difficultés qu'il faut maintenant examiner.

## II - PROBLEMES SPECIFIQUES AUX EXAMENS EN CELLULE D'ASSEMBLAGES PWR

Le premier problème se situe au niveau du transport : un assemblage irradié dans une centrale PWR de 900 MWe est longtemps après son déchargement, une source de chaleur importante, à titre d'exemple un assemblage irradié à sa combustion massive maximale et refroidi 3 mois possède une puissance résiduelle de l'ordre de 15 KW. Après un an, cette puissance est encore d'environ 6 KW [ 1 ]. Dès que l'on sort de l'eau un assemblage possédant une telle puissance résiduelle, la température des crayons qui le composent va s'élever de plusieurs centaines de degrés. Des mesures effectuées sur maquette d'assemblage, chauffée dans l'air avec une source de 6 KW répartie d'une manière homogène, ont montré [ 2 ] que les crayons centraux atteignent des températures maximales de l'ordre de 400°C.

Les études à effectuer sur les crayons combustibles nécessitant généralement que la température des gaines ne dépasse jamais 350°C : (température atteinte par leur surface externe pendant l'irradiation) il importe de programmer le transport de l'assemblage "à sec" suffisamment tard pour que cette température maximale ne soit pas atteinte. Nous venons de voir qu'il faut attendre plus d'un an. Pour diminuer ce temps il est nécessaire d'améliorer le refroidissement de l'assemblage pendant le transport en effectuant cette opération "sous eau". Le château IL 42 que nous utilisons a été conçu selon ce principe et peut transporter un assemblage combustible ayant une puissance résiduelle de 15 kW sans que la température de gaine ne dépasse 350°C. Il faut signaler tout de suite que dans ce cas il est indispensable de prévoir dans la cellule un système de refroidissement de l'assemblage qui prendra immédiatement le relais de celui du château au moment du déchargement.

Le second problème se situe au niveau de la cellule d'examens non destructifs et de démantèlement. Toutes les caractéristiques de l'assemblage (dimensions, masse de matière fissile, activité des produits de fission et d'activation formés au cours de l'irradiation) sont suffisamment différentes de celles des combustibles examinés jusqu'à ces dernières années dans les laboratoires chauds pour qu'il ait été obligatoire de reprendre entièrement les études des cellules, aussi bien sur le plan de la radioprotection et de l'exploitation (risque incendie, nécessité de refroidir l'assemblage en cellule) qu'au niveau de la surveillance du risque de criticité dans la cellule elle-même et de capacité de stockage intermédiaire qu'il est nécessaire de lui adjoindre. Nous verrons en détail ces points lors de la description de CELIMENE.

Le troisième problème est lié à la nécessité d'effectuer les examens en ne produisant qu'une quantité minimale de déchets; pour réaliser cette condition il est nécessaire de réinsérer l'assemblage combustible examiné dans le cycle combustible normal et en particulier de le faire admettre dans l'usine de retraitement. Les conditions posées par le retraiteur sont liées à son désir de ne pas perturber l'exploitation de l'usine, pour cela il exige :

- que l'assemblage puisse être géométriquement considéré comme identique à ceux du lot dont il a été extrait,

- que le retraitement de l'assemblage examiné puisse être effectué en même temps que celui des autres assemblages provenant du même cycle d'irradiation de la centrale. Cette dernière exigence peut influencer notablement sur le choix du mode de transport.

X La réalisation d'un ensemble d'examen d'assemblages combustibles irradiés est une opération complexe, nécessitant un investissement très important, qui doit obligatoirement comporter :

- un château de transport d'assemblage ,
- une cellule de réception des assemblages permettant d'effectuer les examens non destructifs et démantèlement,
- une installation de stockage intermédiaire,
- des cellules d'examen des crayons après démantèlement.

Nous allons maintenant décrire succinctement les moyens mis en place à Saclay pour réaliser la surveillance et l'expertise des combustibles irradiés dans les centrales 900 MWe construites dans le cadre du programme électronucléaire français. Cet ensemble, dont les premiers éléments ont été achevés en 1974, est opérationnel dans sa totalité depuis le début de cette année.

### III - REALISATION DES MOYENS DU CEA

Pour des raisons historiques et économiques les installations réalisées à Saclay sont dispersées dans 3 bâtiments.

#### 3.1 - La cellule CELIMENE (fig. 1)

Cette cellule  $\beta \gamma$ , dont le premier usage était l'assistance au réacteur EL 3, est une grande enceinte ventilée 6 m x 3 m de dimensions horizontales et de 5 m de hauteur. La protection biologique est assurée par des murs de béton baryté de 1 m d'épaisseur. Elle est équipée de deux postes de travail possédant chacun deux télé-manipulateurs maître esclave. A l'intérieur, deux manipulateurs de puissance permettent de déplacer des charges pesant jusqu'à 800 kg. De 1972 à 1975 CELIMENE a été entièrement réaménagée pour recevoir les assemblages PWR.

Cette cellule a maintenant une triple fonction :

- a) réception contrôle visuel et démantèlement d'un assemblage PWR,

- b) extraction des crayons de l'assemblage, examens non destructifs rapides et tri,
- c) reconditionnement de l'assemblage après examen pour qu'il puisse être réinséré sans difficulté dans le cycle normal du combustible.

Les transformations principales ont été :

3.1.1 - Mise en place d'un système permettant le déchargement vertical de l'assemblage PWR contenu dans le château IL 42. Ce château d'un poids total de 31 tonnes possède une protection de 25 cm de plomb. Son canal central contient un étui de section carrée dont les extrémités portent une protection de plomb de même épaisseur que celle du corps.

Le chargement de l'assemblage se fait sous eau. Le château étant posé verticalement sur le fond de la piscine, l'étui contenant l'assemblage est introduit. Le transport peut être effectué "à sec" ou "sous eau". Dans ce dernier cas, un ensemble de vidange est utilisé au moment de l'introduction dans la cellule. La vidange se fait en deux temps :

- a) après contrôle de la pression interne du château, vidange de l'espace entre canal et étui et accostage du château sur le toit de la cellule,
- b) introduction de l'étui en cellule et vidange de l'eau de l'étui.

Ces opérations doivent être effectuées dans un temps limite afin de ne pas atteindre les températures maximales autorisées sur les crayons de l'assemblage. Les opérations en sens inverse pour le retour de l'assemblage examiné, dans sa piscine de stockage sont évidemment possibles.

3.1.2 - Réalisation d'un puits de réception de l'assemblage équipé :

- a) d'un élévateur qui permet de régler la position de l'assemblage par rapport au plan de travail,
- b) d'un système de soufflage d'air réfrigéré qui assure le refroidissement éventuel de l'assemblage.

C'est à ce poste de travail que sont effectuées les opérations d'ouverture de l'étui, les examens non destructifs, les opérations de découpage de la tête de l'assemblage et d'extraction des crayons à examiner.

### 3.1.3 - Réalisation d'une capacité de stockage provisoire -

Ce stockage est divisé en deux parties :

a) stockage vertical au niveau du plan de travail pour les crayons qui sont en instance de transfert vers la piscine de stockage du centre ou vers les cellules d'examen des crayons,

b) stockage vertical en puits réfrigérés d'une capacité de 224 crayons. Cette capacité de stockage d'un accès plus difficile que celle du plan de travail est blindée et peut être conservée même en cas d'intervention humaine dans l'enceinte.

### 3.2 - La piscine de stockage temporaire des crayons

Cette piscine est constituée de 2 bassins de sept mètres de profondeur qui sont desservis par un pont de 15 tonnes. Dans cette piscine les crayons sont stockés soit dans des rateliers individuels, soit dans des étuis contenant chacun 40 crayons.

### 3.3 - Les cellules d'examens des crayons

Ces cellules sont situées dans le bâtiment du LECI. Elles ont déjà été longuement décrites [ 3 ]. Le transfert des crayons entre CELIMENE et les cellules LECI se fait à l'aide de la hotte IL 41 et des châteaux IL 40 ou IL 46 dont la masse est inférieure à 25 tonnes.

## IV - UTILISATION DE LA CELLULE CELIMENE

Lorsqu'un assemblage est introduit dans la cellule le premier examen qu'il subit est un contrôle visuel accompagné de prises de vues d'ensemble. Ensuite la tête est découpée et les crayons sont extraits, un par un, à l'aide d'une pince hydraulique équipée d'un dynamomètre permettant de limiter et d'enregistrer en continu la force nécessaire à l'extraction. Cette pince est suspendue à une potence qui permet de transporter le crayon au poste d'examen visuel et de contrôle par courant de Foucault.

Lors de l'examen systématique d'un assemblage tous les crayons subissent ces deux premiers contrôles qui permettent de faire un premier choix pour définir la suite des examens. Les crayons retenus peuvent alors être dirigés vers le LECI où ils seront soumis à l'ensemble des examens de détail.

#### V - EXAMENS NON DESTRUCTIFS DES CRAYONS

Les crayons subissent tous les examens non destructifs dans la cellule K1. Des développements importants de certaines des techniques exposées en 1973 [ 3 ] ont été réalisés, tout particulièrement dans le domaine de la neutronographie et de la spectrométrie  $\gamma$ . La figure 2 rappelle l'installation construite à Isis pour la neutronographie des crayons de grande longueur. Elle est effectuée sur un film continu de nitrate de cellulose positionné dans une camera spécialement conçue pour cet effet [ 4 ]. L'élément combustible placé verticalement subit une avance pas à pas devant le faisceau de neutrons; le film de nitrate de cellulose situé directement derrière le crayon et pressé entre deux convertisseurs  $\alpha$  est transporté par la camera pas à pas en synchronisation avec l'élément. L'exploitation de cette installation s'est révélée satisfaisante et la définition des images obtenues excellente.

L'équipement de spectrométrie  $\gamma$ , mis en place dans la cellule K1, permet maintenant d'accéder à la détermination quantitative de la combustion massique des crayons. Pour atteindre l'activité des produits de fission, il a été procédé d'une part à l'étalonnage de l'installation à l'aide de deux sources (une source de  $^{226}\text{Ra}$  et une source étalon de  $^{60}\text{Co}$ ), d'autre part à l'étude expérimentale des phénomènes d'autoatténuation sur plusieurs crayons soumis à des conditions d'irradiation très différentes (combustion massique et température).

La mesure de l'activité du  $^{137}\text{Cs}$  et du  $^{106}\text{Ru}$  conduit à déterminer la combustion massique à + 6 %

#### VI - EXAMENS DESTRUCTIFS

##### 6.1 - Constat statistique de fonctionnement des crayons

Les techniques d'examens destructifs classiques utilisées aussi bien pour les éléments irradiés en réacteur de puissance qu'en pile expérimentale (perçage, métallographie, microanalyse X ...) ont peu évolué depuis 1973, mais leur excellent fonctionnement dû à leur simplicité et robustesse ont permis d'effectuer de nombreux examens et d'obtenir des résultats semi-statistiques sur le comportement de l'élément PWR en fonctionnement normal.

Ainsi, à titre d'exemple, les nombreux prélèvements et analyses de gaz de fission réalisés sur les crayons ont conduit à établir :

- des corrélations expérimentales entre teneurs isotopiques des xénon et krypton et combustion massique. La figure 3 donne l'exemple, pour des crayons de même enrichissement, irradiés dans le réacteur BR3, de la corrélation obtenue pour le rapport  $132/131$  Xe. Ainsi, ces rapports isotopiques permettent, pour des assemblages irradiés dans un réacteur donné de connaître immédiatement après récupération et analyse de gaz, la combustion massique atteinte par le crayon,
- des corrélations entre les différents paramètres suivants :  
fraction dégagée, combustion massique, température centrale de l' $UO_2$ .  
On a déterminé, pour des éléments en géométrie "15 x 15", l'évolution de la fraction dégagée en fonction de la température centrale pour des combustions massiques de 5.000 - 15.000 - 20.000 - 25.000 MWJ/td'U. On remarque une augmentation de la fraction dégagée avec la combustion massique à puissance linéaire ou température centrale donnée.

Les examens de détail (métallographie, microanalyse X) ont amené une connaissance précise des conditions de formation de la couche d'uranate de césium entraînant des risques d'accrochage entre oxyde et gaine. La figure 4 montre, en fonction des paramètres d'irradiation (combustion massique et gradient thermique dans l'oxyde) les domaines dans lesquels ce risque existe.

## 6.2 - Equipements nouveaux

Pour connaître le comportement de certaines structures des assemblages (par exemple les propriétés mécaniques des grilles) ou le fonctionnement des crayons combustibles en régime accidentel (LOCA) ou en "suivi de réseau" (variations nombreuses de puissance) de nouveaux équipements ont été mis en place.

### 6.2.1 - Détermination des propriétés mécaniques des grilles

L'importance de la connaissance des propriétés mécaniques des structures des assemblages à amener à concevoir des dispositifs permettant très facilement de :



- déterminer les efforts axiaux de pénétration et de glissement des crayons dans les alvéoles des grilles,
- mesurer la raideur des ressorts afin de connaître les variations sous irradiations des propriétés élastiques de l'inconel.

### 6.2.2 - Essais LOCA

Les analyses de sûreté concernant le comportement de l'élément combustible, lors d'un éventuel incident de dépressurisation du circuit primaire d'un réacteur PWR, ont conduit à l'étude d'un appareillage permettant de soumettre un échantillon de gaine à des variations de pression et de température, représentatives d'un accident de perte de caloporteur. Ce dispositif en cours d'étude, proche de celui déjà réalisé en laboratoire froid au CEA, doit être implanté dans une cellule du LECI. Un tronçon d'un élément combustible sera dégainé par ultra-sons sur 200 mm, la gaine sera positionnée verticalement, sous contrainte, à l'aide de deux têtes d'amarrage qui assurent également l'amenée de puissance pour le chauffage par effet Joule et la pressurisation. L'éprouvette sera soumise à un cycle température-pression sous vapeur d'eau. Elle sera placée avec son bâti support dans une enceinte, comportant des hublots stabilisés chauffés sur l'une de leur face et traités optiquement. La déformation diamétrale des tubes, au cours des essais, sera photographiée par impulsion ou à cadence rapprochée (2 images/sec) par un appareil photo télécommandé et motorisé Robot (format 24 x 24) (fig. 5). Cet appareil de conception très simplifié sera positionné avec son optique dans une enceinte de protection en cellule. Seul le chargeur de 580 vues, léger et compact, très facilement manipulable à distance, fera la navette entre la cellule et l'extérieur afin de récupérer le film de l'essai. Ce dernier sera mesuré au moyen d'un banc optique à l'extérieur de la cellule. Cette installation sera opérationnelle courant 1979.

### 6.3 - Fabrication des crayons en cellule

Les assemblages devant fonctionner dans les réacteurs en "suiivi de réseau", des moyens ont dû être mis en oeuvre pour connaître le comportement, lors de variations de puissance, de crayons fragilisés par l'irradiation. Dans ce but le LECI a équipé une cellule pour fabriquer de "nouveaux crayons" à partir de tronçon de crayons déjà irradiés dans les réacteurs de puissance.

Les différents appareillages permettent de fabriquer des crayons de 6 à 14 mm de diamètre, leur longueur pouvant atteindre 1500 mm. L'atmosphère interne peut être constitué d'He pur ou d'un mélange He/Xe + Kr en proportions définies; la pression interne est ajustée suivant les besoins entre 1 et 60 bars.

Pour éviter la présence de vapeur d'eau à l'intérieur des crayons reconstitués, des étuvages sont effectués à chaque stade de la fabrication. Celle-ci comprend les étapes suivantes :

- après découpage et contrôle du tronçon initial, extraction des pastilles aux extrémités et empilement des composants neufs (pastilles isolantes, ressort).

Cette opération est une des plus délicates à réaliser car il ne faut pas ébranler ou déplacer la colonne fissile.

- soudage et queusotage des bouchons d'extrémité. Cette séquence, réalisée par soudage argon-arc, est identique à celle mise au point pour la fabrication de crayons non irradiés, mais les conditions opératoires ont dû être modifiées du fait de la présence de composés de césium volatils dans la colonne fissile.

Après fabrication, le crayon est décontaminé et est contrôlé par :

- radiographie pour vérifier la qualité des soudures,
- spectrométrie  $\gamma$  et neutronographie pour contrôler la position et l'état de la colonne fissile et des composants neufs,
- courants de foucault pour connaître l'état de la gaine,
- métrologie pour caractériser les déformations de la gaine avant réirradiation.

Depuis la mise en service en 1977, une vingtaine de crayons ont été fabriqués et sont en cours de réirradiation ou d'examen.

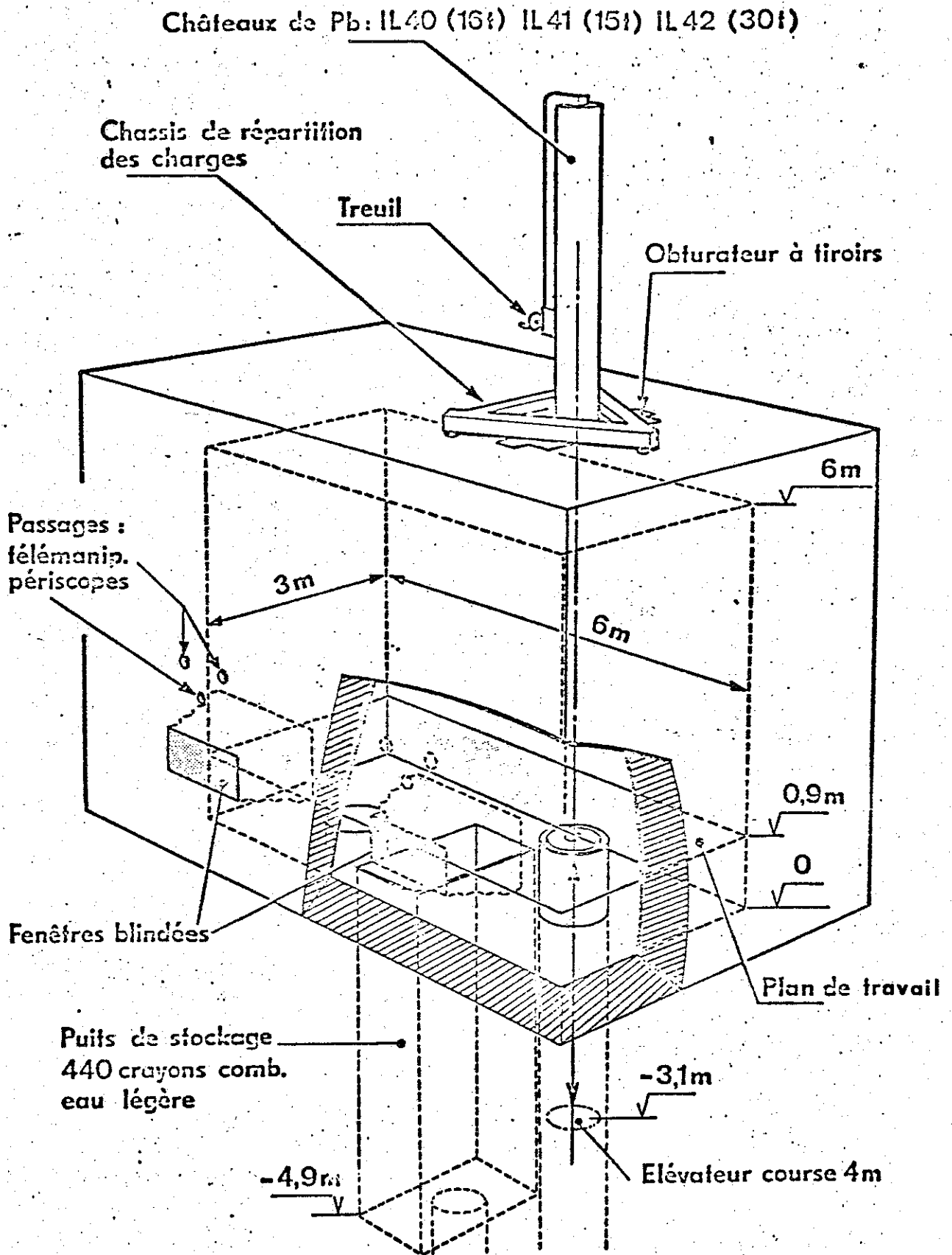
VII - CONCLUSION

Les dispositifs, mis en place depuis le début des années 70 sur le Centre d'Etudes Nucléaires de SACLAY, sont maintenant tous opérationnels et permettent de réaliser tous les examens qui concernent les assemblages combustible et leurs composants irradiés dans les réacteurs thermiques de puissance. Ces installations conçues pour supporter le programme électronucléaire français peuvent également être utilisées dans le cadre de contrats internationaux.

- BIBLIOGRAPHIE -

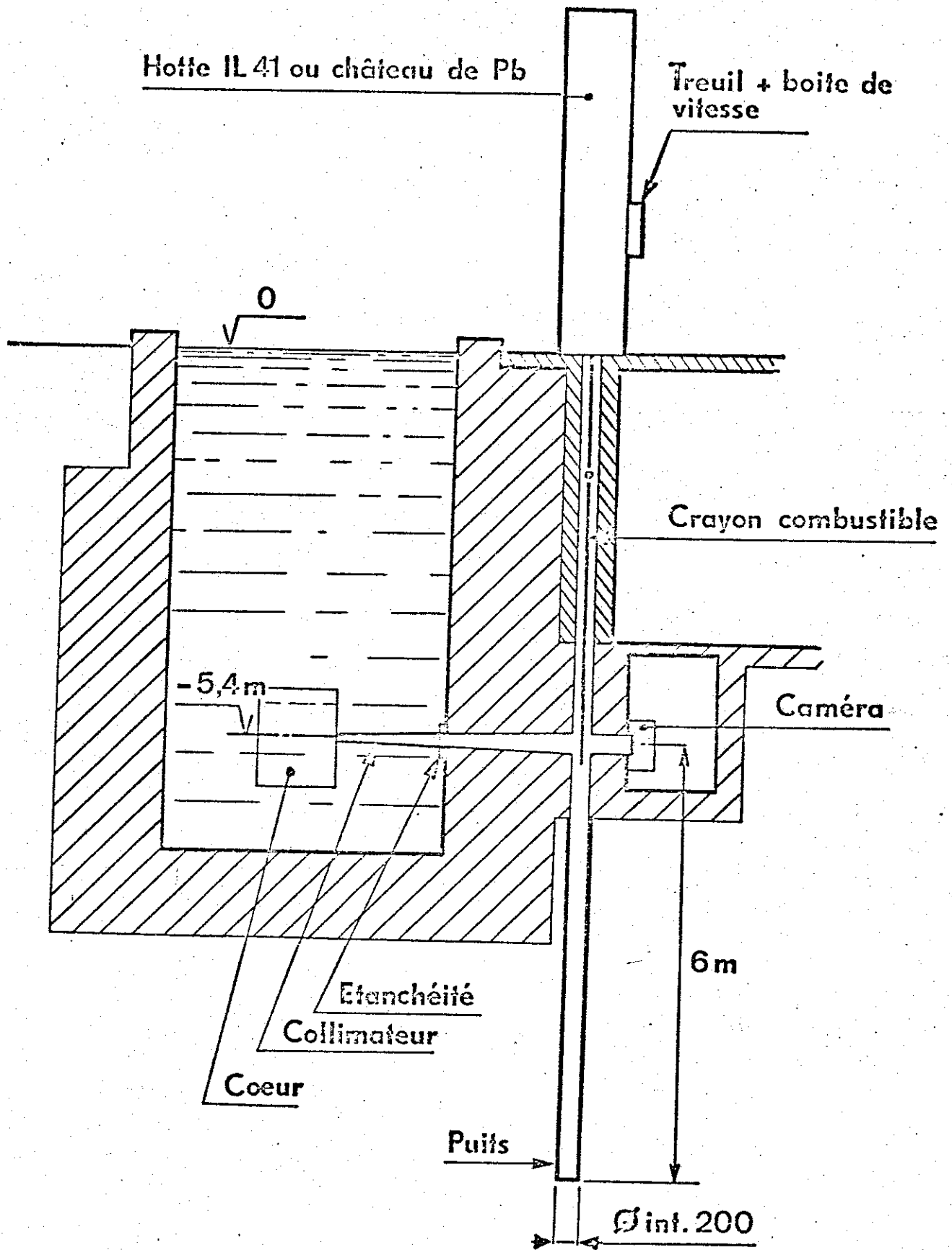
---

- [ 1 ] Activité  $\beta$ ,  $\alpha$ , neutronique, spectre d'émission  $\gamma$  et puissance résiduelle d'un combustible irradié.  
Communication personnelle.
- [ 2 ] Etude du comportement du combustible usé en piscine en cas de dénoyage  
Communication personnelle.
- [ 3 ] Moyens mis en oeuvre au CEN.SACLAY pour le transport, le stockage, la télémanipulation et les examens des éléments combustibles de la filière eau légère.  
E. ROUSSEL  
XVème Comité des labos Chauds d'EURATOM, Juin 1973
- [ 4 ] Neutron radiography with a nitrocellulose film camera for fuel element testing  
R. BARBALAT, G. FARNY  
Kerntechnik 18 Jahrgang 76 N° 2, p. 83-84

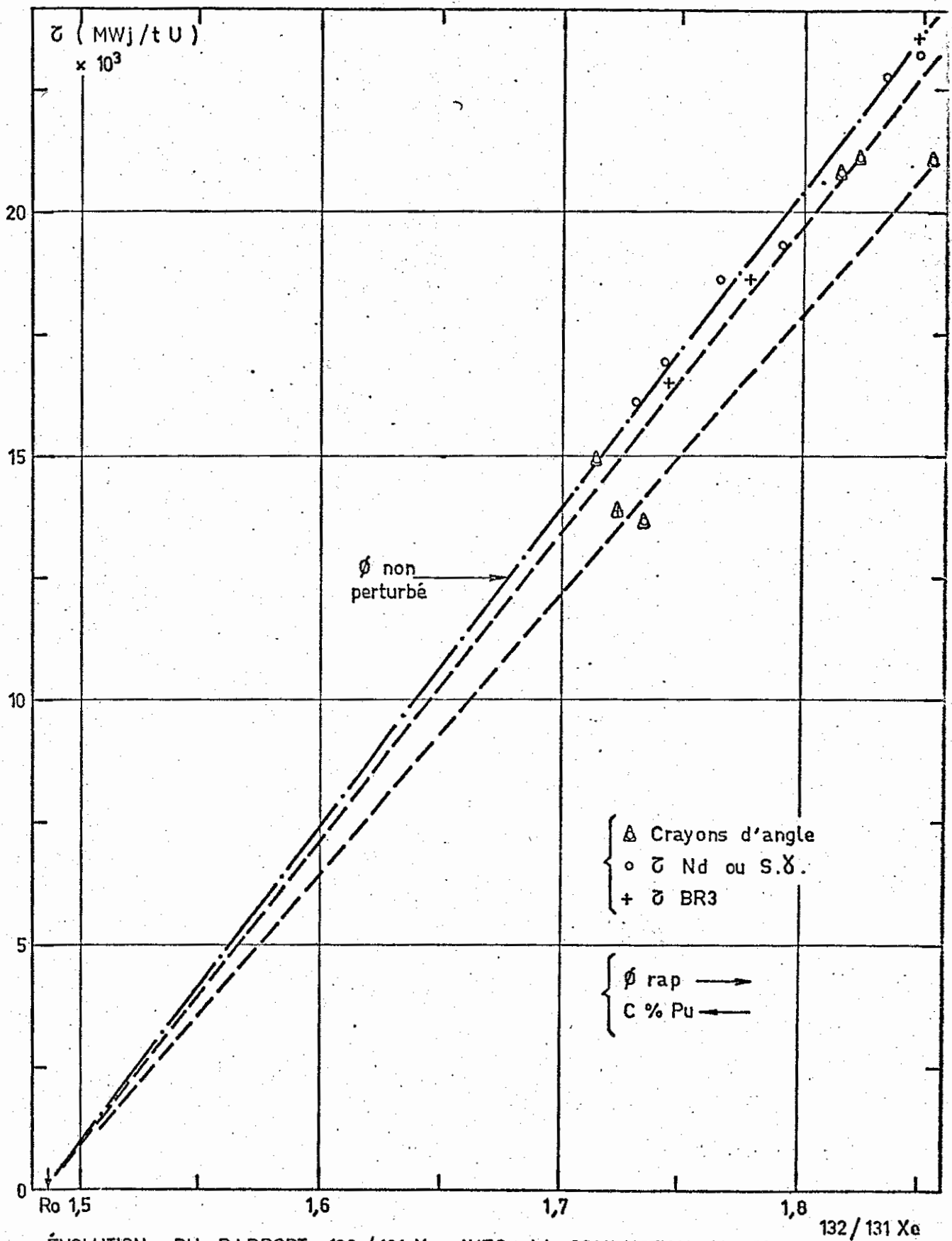


FILIERE EAU LEGERE  
 CELL. CELIMENE "EQUIP. EAU LEGERE"

Fig.1



**FILIERE EAU LEGERE  
 INSTALLATION DE NEUTROGRAPHIE  
 REACTEUR ISIS**



ÉVOLUTION DU RAPPORT  $^{132}/^{131}\text{Xe}$  AVEC LA COMBUSTION MASSIQUE IRRADIATION BR3-2B ( $e = 4,47\%$ )

FIGURE 3

FILIERE EAU LEGERE.

CONDITIONS DE FORMATION DE LA REACTION  
OXYDE GAINE

Combustion massique en fonction du gradient  
thermique dans la pastille

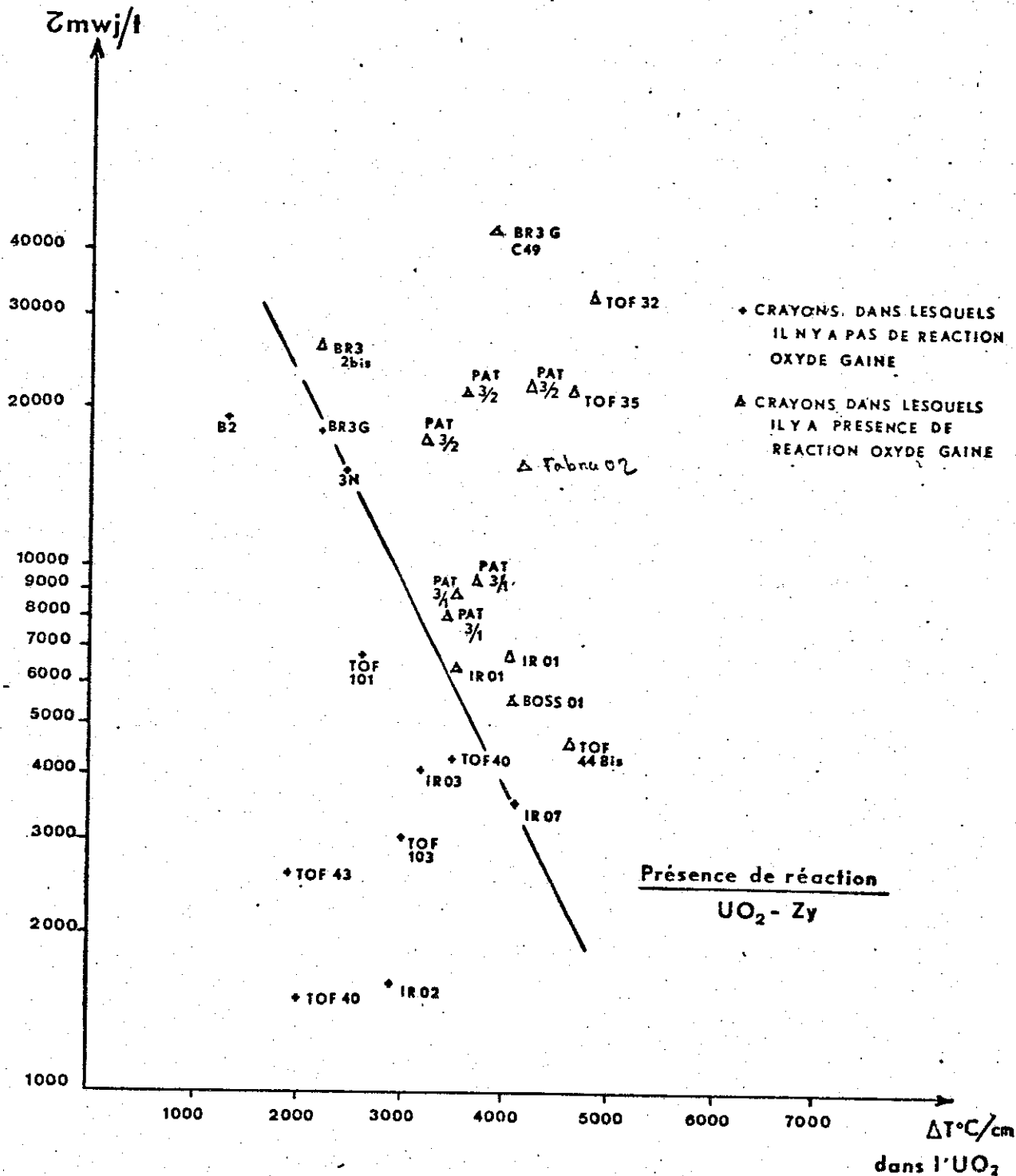


Fig. 4



SCHEMA DU DISPOSITIF EDGAR EN CELLULE

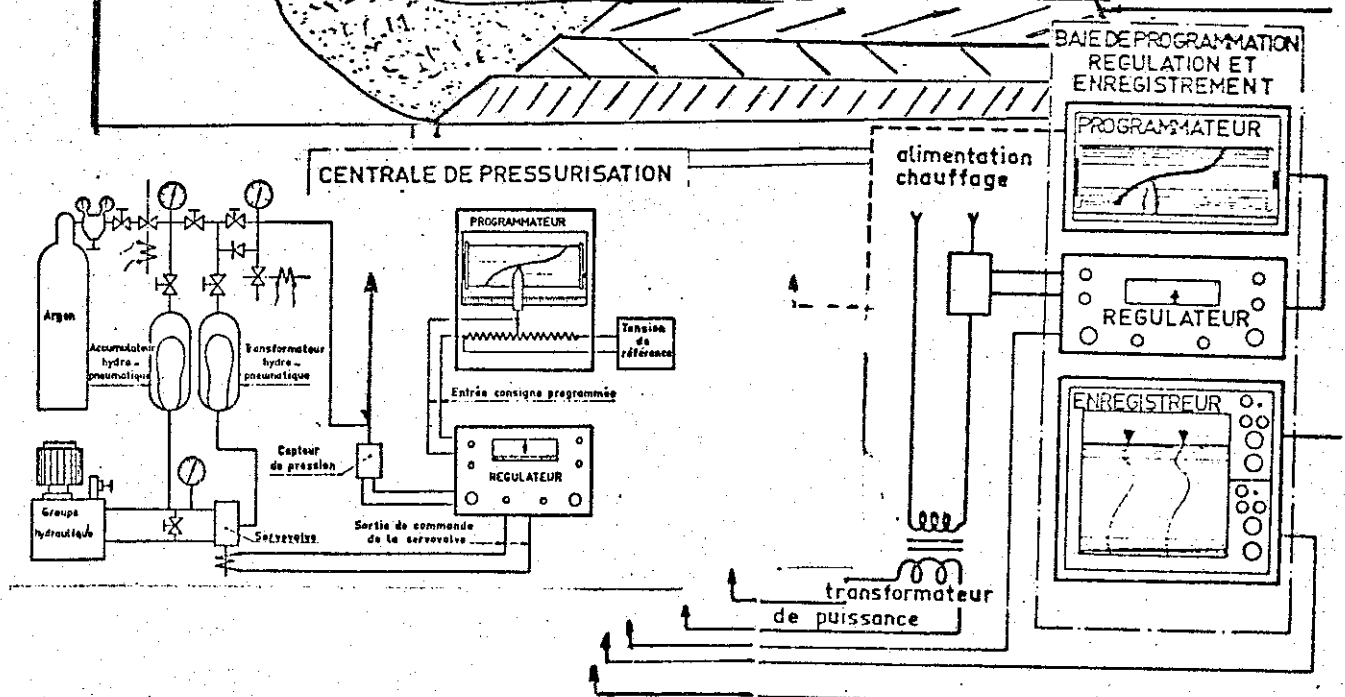
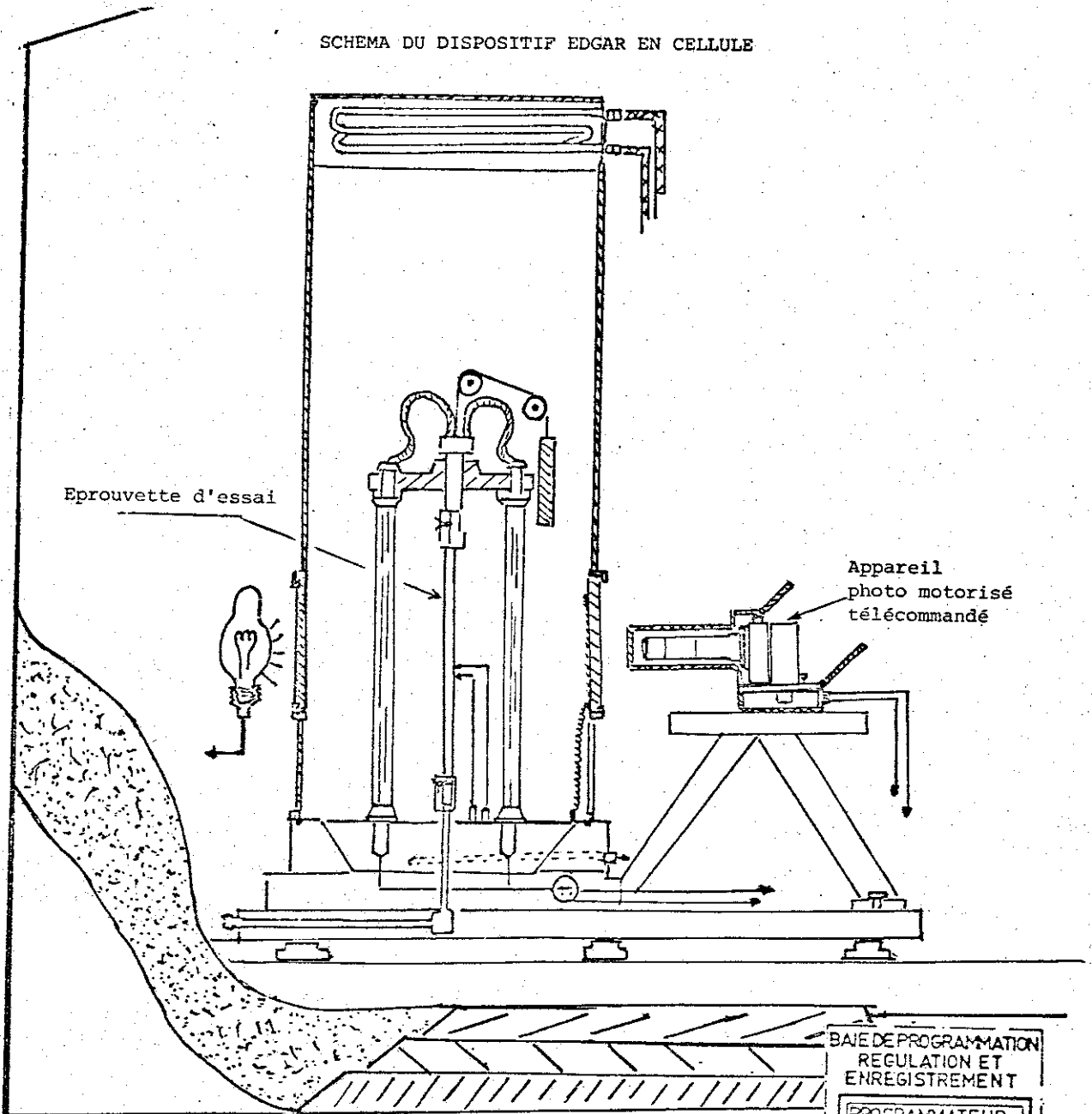


Fig. 5.