

Meeting on LWR extended burnup fuel performance
and utilization
Williamsburg, VA, USA - 4-8 Avril 1982
CEA- CONF-- 6237

DEGAGEMENT DES GAZ DE FISSION A COMBUSTION MASSIQUE ELEVEE

Yves KAUFFMANN, Marie-Louise POINTUD
Commissariat à l'Energie Atomique
Département de Métallurgie de Grenoble, CEN GRENOBLE
GRENOBLE

Nicole VIGNESOULT, Rosemarie ATABEK
Commissariat à l'Energie Atomique
Département de Technologie, CEN SACLAY
91191 GIF-SUR-YVETTE Cedex

Daniel BARON
FRAGEMA
149 Cours Lafayette
69006 LYON

R E S U M E

L'étude du dégagement des gaz dans les éléments combustibles présente un intérêt fondamental pour permettre d'augmenter la combustion massique moyenne de déchargement des assemblages. Des mesures de concentrations de gaz résiduel par chauffage et par microanalyse X ont donc été réalisées respectivement sur des particules (programme TANGO) et des sections de crayons combustibles, parfaitement caractérisées (fabrication, historique d'irradiation). Une température seuil de dégagement du xénon de $1250^{\circ}\text{C} \pm 100^{\circ}\text{C}$ a été déterminée quels que soient le type d'oxyde et l'historique d'irradiation dans le domaine de combustion massique $18000-45000 \text{ MWdt}^{-1}(\text{U})$.

Les analyses globales de gaz dégagé dans les crayons combustibles montrent que, jusqu'à présent, dans les conditions de fonctionnement des PWR, la fraction dégagée reste inférieure à 1 % jusqu'à une combustion massique moyenne de $35000 \text{ MWdt}^{-1}(\text{U})$. Le dégagement des gaz ne devrait pas être un phénomène limitatif à l'augmentation des combustions massiques.

1 - INTRODUCTION

L'importance du parc électronucléaire français et la nécessité de le gérer dans les meilleures conditions de souplesse et de rentabilité possibles conduit à demander aux éléments combustibles des centrales PWR, des performances de plus en plus poussées. Les objectifs actuellement envisagés en FRANCE sont, d'une part, le fonctionnement des réacteurs en suivi de charge et télé-régulation, d'autre part, l'augmentation de la combustion massique moyenne de décharge des assemblages ($45000 \text{ MWdt}^{-1}(\text{U})$ au lieu de $33000 \text{ MWdt}^{-1}(\text{U})$). Dans ce dernier cas, cependant, un certain nombre de phénomènes peuvent limiter la durée de vie des éléments combustibles comme par exemple la corrosion externe du zircaloy et l'allongement des crayons [1], le gonflement de l'oxyde, le relâchement des gaz [2] et la corrosion par les produits de fission volatils.

La présente étude est consacrée aux problèmes liés à la migration et au dégagement des produits de fission gazeux et volatils, dont les conséquences sur le comportement du crayon sont l'augmentation de la pression interne et le risque éventuel de ne plus respecter les critères de sûreté à combustion massique élevée.

En fait, s'il existe de nombreux travaux sur ce sujet ([3] à [6]), les résultats obtenus pour des combustions massiques supérieures à $20000 \text{ MWdt}^{-1}(\text{U})$ sont apparemment contradictoires. Ce désaccord semble être dû au fait que tous les phénomènes ne sont pas pris en compte lors de l'interprétation des résultats ; en effet, le comportement des produits de fission gazeux et volatils peut dépendre aussi bien des caractéristiques initiales de l'oxyde d'uranium (taille des grains, porosités des pastilles [6]) et du crayon combustible lui-même (pressurisation initiale ([3], [7])) que de l'historique d'irradiation (puissance linéaire ([3], [6]), combustion massique [2]).

Afin de pouvoir tenir compte de tous ces paramètres et d'évaluer les quantités de gaz de fission relâchées dans les conditions de fonctionnement des réacteurs PWR, un modèle empirique a été mis au point par le CEA en se basant d'une part sur l'analyse des gaz émis instantanément pendant l'irradiation, d'autre part sur des mesures de concentrations locales sur combustibles irradiés [8]. Ce modèle empirique, mis au point pour de l' UO_2 , irradié jusqu'à

20000 MWdt⁻¹(U) dans le domaine de température 500-2300°C et jusqu'à 35000 MWdt⁻¹(U) pour des températures inférieures à 1100°C, a été introduit dans le code RESTA [9], utilisé pour prédire le comportement thermomécanique du crayon combustible de conception CEA ([10], [11]) en régime stable.

Afin de compléter les résultats à combustions massiques élevées, des études paramétriques et des analyses fines (mesures des concentrations de gaz résiduel par chauffage et microanalyse X) ont été réalisées sur des particules et sections de combustible parfaitement caractérisées (fabrication, historique d'irradiation) dans un large domaine de combustion massique et de puissance. Ces études ont été menées initialement sur des combustibles de conception CEA et sont actuellement activement poursuivies dans le cadre des accords de collaboration entre le CEA et FRAMATOME.

2 - DETERMINATION DU DOMAINE DE RETENTION DU XENON ET DU CESIUM

Dans le but de préciser, pour des combustions massiques élevées (18000 à 62000 MWdt⁻¹(U)), les températures correspondant à la limite de saturation des grains, des mesures ont été réalisées par deux méthodes différentes sur des oxydes d'uranium parfaitement caractérisés avant irradiation et dont les historiques de puissance sont bien connus :

a) Détermination de la répartition radiale par microanalyse X des produits de fission, Xe et Cs, sur des sections d'éléments combustibles de conception différente, irradiés dans les conditions de refroidissement des PWR dans les coeurs 2b, 3B et 4A du réacteur BR₃ à MOL (BELGIQUE).

b) Evaporation sous vide à 2100°C de particules TANGO [12] (microsphères d'UO₂ de 1 mm de diamètre, irradiées en conditions quasi-isothermes et non contraintes) avec récupération des gaz dégagés et comptage γ du ⁸⁵Kr.

2.1 - Mesures de rétention de gaz dans des sections de crayons combustibles

Des analyses radiales de Xénon et Césium occlus ont été réalisées par microanalyse X [13], sur des sections d'éléments combustibles caractérisées par les données suivantes :

- les données de fabrication de la pastille : type d'oxyde, densité, répartition de la porosité, test de densification, taille initiale du grain (tableau 1). Deux types de combustible (DCNi et DCI*) ont été étudiés, pour lesquels la taille initiale des grains est sensiblement identique (8 à 15 μm) mais la répartition de porosité très différente : faible porosité ouverte pour l'oxyde DCNi ($\approx 0,1\%$) et forte porosité ouverte dans le cas de l'oxyde DCI ($\approx 3,2\%$).

	UO ₂ DCN _{instable}	UO ₂ DCI
Diamètre de la pastille (nominal)(mm)	7,42	8,05
Densité (%DTh)	94,5	95,4
Porosité : ouverte (%)	0,1	3,2
fermée (%)	5,5	1,4
Test de densification hors pile		
($ \frac{\Delta d}{d} $ en 24 h à 1750°C) (%)	3,4	0,6
Diamètre initial des grains (μm)	≈ 8	15 (avec flots de 5 μm)
Enrichissement initial en ²³⁵ U (%)	4,47	6,215

TABLEAU 1 : Mesure par microanalyse X : caractéristiques de fabrication des oxydes étudiés.

- l'historique de puissance (figure 1) : la puissance locale maximale est comprise entre 265 et 350 W/cm pour les crayons contenant de l'oxyde DCNi et entre 260 et 410 W/cm pour ceux contenant de l'oxyde DCI (Tableau 2).

- la combustion massique mesurée par analyse du ¹⁴⁸Nd formé ou par spectrométrie γ /₁₄ : les combustions massiques des échantillons varient entre 15000 et 44500 MWdt⁻¹(U) (Tableau 2).

oxyde DCNi : oxyde fabriqué par la technique du Double Cycle Normal et se densifiant sous irradiation

oxyde DCI : oxyde fabriqué par la technique du Double Cycle Inversé (oxyde stable sous irradiation)

TYPE D'OXYDE	REACTEUR	COMBUSTION MASSIQUE Mwdt-1(U)		PUISSANCE LOCALE MAXIMALE (PL max.) W/cm
		Maximale en fin de vie	Atteinte à PL max.	
UO ₂ DCN ₁	BR ₃ (2b)	20100	17700	265
		25400	22500	340
		26700	22500	350
UO ₂ DCI	BR ₃ (3B)	15200	15000	260
	BR ₃ (4A)	32000	29800	290
	BR ₃ (4A)	45400	44200	410
	BR ₃ (3B + 4A)	44500	3940	380
	BR ₃ (4A)	41000	39500	380
	BR ₃ (4A)	34800	33800	340

TABEAU 2 : Mesure par microanalyse X : caractéristiques d'irradiation des crayons

- le profil radial de température calculé par le code RESTA [9], pour la puissance linéaire maximale de fonctionnement et la combustion massique correspondante. L'incertitude sur la détermination de la température centrale et des domaines de migration et de dégagement des produits de fission est estimée à $\pm 100^{\circ}\text{C}$.

Ces analyses montrent que, dans tous les cas, le comportement des gaz et produits de fission volatils est directement lié à l'évolution de la porosité et de la taille des grains sous irradiation donc à la thermique de l'oxyde.

En effet :

- jusqu'à une température de $1100^{\circ}\text{C} \pm 100^{\circ}\text{C}$, correspondant à l'apparition de micropores aux joints de grains, le xénon demeure occlus dans la matrice oxyde

- entre 1100 et 1250°C , domaine dans lequel il migre vers les joints de grains, sa concentration diminue

- pour des températures supérieures à 1250°C , la concentration en xénon se stabilise à un niveau plus ou moins faible dans les zones où l'on observe la présence de tunnels et un grossissement de grains équiaxes et/ou colonnaires (figure 2).

De même que pour les gaz rares, le césium demeure occlus dans la matrice oxyde jusqu'à une température de $1050 \pm 100^\circ\text{C}$ pour des combustions massiques comprises entre 20000 et 40000 $\text{MWdt}^{-1}(\text{U})$. Les phases d'uranate de césium en périphérie de l'oxyde apparaissent à partir d'un certain seuil de gradient de température et de combustion massique [15].

Bien qu'il soit difficile de préciser le début exact de la phase d'interconnexion des bulles, une température seuil de dégagement du xénon a été déduite de ces analyses et estimée à $1250^\circ\text{C} \pm 100^\circ\text{C}$ quels que soient le type d'oxyde (DCN_1 ou DCI), l'historique d'irradiation et la combustion massique (dans le domaine 18000-45000 $\text{MWdt}^{-1}(\text{U})$).

2.2 - Mesure de rétention des gaz dans les particules TANGO

Des sphères d' UO_2 , de densité initiale différente (10,1 ; 10,4 ; 10,8) ont été irradiées en régime quasi-isotherme entre 400 et 1500°C et hors contrainte dans le cadre du programme TANGO [16], pour couvrir un domaine de combustion massique de 15000 à 62000 $\text{MWdt}^{-1}(\text{U})$.

Les combustions massiques de chaque échantillon ont été déterminées par spectrométrie γ , recalée par mesures radiochimiques (méthode du ^{148}Nd). Cette détermination permet en outre de mesurer le ^{137}Cs restant dans chaque particule.

Les gaz de fission des particules ayant gardé leur intégrité géométrique ont été recueillis et analysés par la technique décrite en [17] (évaporation sous vide et spectrométrie γ du ^{85}Kr recueilli).

Le tableau 3 donne la fraction de ^{85}Kr et de ^{137}Cs dégagée en fonction de la température et de la combustion massique de l'échantillon. La précision devient médiocre pour des valeurs inférieures à 10 %.

Température d'irradiation °C	N° TANGO	Combustion massique MWdt ⁻¹ (U)	Fraction ⁸⁵ Kr dégagée (%)			Fraction ¹³⁷ Cs dégagée (%)
			10,11	Densité 10,43	10,78	
1500	1*	23000	48	47	53	40 à 60
	2*	47000				
	3	62000	80	89	80	80
1200	1*	17500	0 à 5	0 à 5		
	2*	~ 47000				
	3*	~ 62000				
900	1*	20000	5 à 10	0 à 5	0 à 5	0 à 4
	2*	~ 40000				
	3*	~ 60000				
800	4	32000	5 à 10	5 à 10	5 à 10	0
	5	17000	0	0	0	non mesuré
600	4	35000	7,5	6	7	non mesuré
	5	15000	0	0	0	non mesuré
400	4	34000	7	6	5	non mesuré
	5	13000	0	0	0	0

* Mesures impossibles : particules totalement désagrégées.

TABLEAU 3 : Expérience TANGO : fractions dégagées de ⁸⁵Kr et ¹³⁷Cs.

Dans les limites de la précision des mesures, il n'y a pas d'effet significatif de la densité initiale des échantillons utilisés. Pour les températures inférieures ou égales à 1200°C le taux d'émission des gaz et des produits de fission volatils est inférieur à 5 ou 10 % et donc faible étant donnée la précision des mesures (de l'ordre de 5 % dans ce cas).

L'évolution de la dimension des pores en fonction de la combustion massique a été étudiée par l'analyse quantitative des images céramographiques [12] : à 1500°C et 20000 MWdt⁻¹(U), des pores de 3 µm de diamètre sont rassemblés aux joints de grains. La concentration de ces pores évolue avec la combustion massique ; ils finissent par créer une porosité interconnectée avec les gros pores de fabrication (10 à 15 µm), permettant ainsi l'évacuation des gaz de fission. Aux températures plus basses, de 900 à 1200°C, en l'absence de gradient thermique et de contraintes mécaniques, la coalescence de petits pores aux joints les fragilise et entraîne la décohésion des échantillons. Ces observations sont en parfait accord avec les résultats d'analyses radiales

sur des sections de combustible.

Sur la figure 3, on compare les résultats des expériences TANGO d'une part à ceux obtenus lors des irradiations de noyaux de bioxyde d'uranium de la filière Haute Température (H.T.R.) irradiées à des températures comprises entre 1000 et plus de 1400°C [18], d'autre part aux valeurs publiées par Zimmermann [19]. A 1500°C, les résultats TANGO et H.T.R. confirment la courbe de Zimmermann. A des températures inférieures ou égales à 1200°C, les valeurs TANGO sont par contre nettement inférieures et cohérentes avec les résultats obtenus sur les crayons irradiés dans les conditions de fonctionnement des P.W.R. (§ 3).

3 - DEGAGEMENT DES GAZ DE FISSION

Des prélèvements et analyses de gaz ont été réalisés sur de nombreux éléments combustibles irradiés, dans un large domaine de combustion massique et de puissance, dans BR3 et la CAP (Chaudière Avancée Prototype) et dans les réacteurs PWR. On distinguera deux types de résultats, suivant que le crayon combustible aura ou non fonctionné à une température centrale supérieure à 1250°C.

3.1 - Température centrale de l'oxyde supérieure à 1250°C

Dans ce cas, le traitement des résultats a été effectué en rapportant le volume dégagé à la fin de l'irradiation à la longueur "1" de la colonne combustible qui a participé au dégagement ($T_{\text{centrale}} > 1250^{\circ}\text{C}$), ceci afin de pouvoir comparer les fractions dégagées dans des crayons combustibles de conception différente, provenant de réacteurs différents (figure 4).

Le tronçon "1" est défini par sa combustion massique et sa puissance linéaire moyenne, à chaque palier d'irradiation, et la fraction $f_1(\%)$ s'écrit :

$$f_1 (\%) = \frac{\text{volume dégagé}}{\sum \text{volume formé dans I où } \theta_c > 1250^{\circ}\text{C}}$$

On observe, figure 4, que :

- le taux de relâchement augmente rapidement lorsque la température centrale de l'oxyde dépasse 1250°C quel que soit le type d'oxyde examiné
- la cinétique de dégagement des gaz croît lorsque la combustion

massique augmente. Pour une température centrale de 1500-1600°C, la fraction f_1 dégagée est d'au maximum 10 % dans le domaine 0-20000 MWdt⁻¹(U) et d'environ 30 % à 40000 MWdt⁻¹(U)

- le comportement des oxydes DCN_i et DCI, vis-à-vis du phénomène de dégagement des gaz est identique entre 20000 et 40000 MWdt⁻¹(U).

3.2 - Température centrale de l'oxyde inférieure à 1250°C

La fraction de gaz dégagée dans les crayons reste très faible, inférieure à 1 % quels que soient le type d'oxyde et la combustion massique, tout au moins jusqu'à 35000 MWdt⁻¹(U). Ceci est en parfait accord avec les résultats obtenus sur des plaques de combustible irradiées jusqu'à 50000 MWdt⁻¹(U) à basse température (600-700°C) [15], avec les résultats des expériences TANGO (§2.1) et avec ceux présentés dans [20].

De plus, dans le cas d'un fonctionnement à faible puissance, aucun effet significatif de la pressurisation interne des crayons n'a été observé, étant donnée la faible précision des mesures (figure 5).

La fraction de gaz dégagée reste très inférieure aux fractions dégagées - limites données par la corrélation NRC [2] (figure 5). Pour un crayon combustible pressurisé, irradié à 35000 MWdt⁻¹(U), elle est par exemple :

- 3 fois plus faible avec un fonctionnement à 1700 °C en début de vie
- 7 fois plus faible avec un fonctionnement représentatif de celui des PWR.

3.3 - Comparaison expérience - calcul

La comparaison des répartitions radiales de Xénon, calculée et mesurée pour les deux cas particuliers des crayons H32 et N043 dont les historiques de puissance sont présentées figure 2b, montrent que (figure 6) :

- l'accord entre les mesures et le calcul est excellent pour le crayon H32 qui a fonctionné à une température centrale maximale de 1700-1500°C uniquement en début de vie (pendant 7000 MWdt⁻¹(U)),
- dans le cas du crayon N043, dont la température centrale maximale a été de 1700°C pendant presque toute la durée de l'irradiation, l'expérience

montre, dans le domaine 1200-1400°C, une diminution plus brutale que ne le prédit le calcul de la quantité de Xénon dans l'oxyde. Ceci peut être dû à une augmentation, dans ce domaine de température, du taux de relâchement par suite de l'interconnexion des bulles aux joints de grain.

4 - CONCLUSION

Les mesures des concentrations de gaz résiduels dans les particules des expériences TANGO et sur des sections radiales d'éléments combustibles d'une part, les analyses globales de gaz dégagé d'autre part, ont clairement démontré que pour des températures centrales inférieures à $1250 \pm 100^\circ\text{C}$ - température-seuil de dégagement du Xénon déterminée par microanalyse X - la fraction de gaz dégagée est faible : elle reste inférieure à 1 % jusqu'à une combustion massique moyenne de $35000 \text{ MWdt}^{-1}(\text{U})$.

Dans les conditions de fonctionnement des réacteurs PWR, la fraction de gaz dégagée par un crayon pressurisé, irradié à $35000 \text{ MWdt}^{-1}(\text{U})$ est 7 fois plus faible que la fraction dégagée - limite donnée par la corrélation NRC, qui de ce fait donne des résultats trop conservatifs. Du point de vue de l'augmentation des combustions massiques, le dégagement des gaz ne devrait pas poser de problème pour un fonctionnement en centrale de base.

Dans le domaine de température de 1200-1400°C, la coalescence et l'interconnexion des bulles aux joints de grain jouent un rôle essentiel dans l'évacuation des gaz et, semble-t-il, d'autant plus important que la combustion massique est élevée. Des analyses de gaz émis instantanément pendant l'irradiation d'un crayon pré-irradié à forte combustion massique en réacteur PWR, devront permettre de vérifier ces résultats.

REFERENCES

- [1] F. GARZAROLLI, R. MANZEL, F. WUNDERLICH
"Water Chemistry-Corrosion and growth of Zircaloy clad fuel rods under the aspect of high burn-up". IAEA Specialists' Meeting on High Burnup in Power Reactor fuel. MOL, 24-27 March 1981
- [2] R.O. MEYER, C.E. BEYER, J.C. VOGLEWEDE
"Fission gas release from fuel at high Burnup", NUREG-0418, March 1978
- [3] S.R. PATI, D.E. BOUTSETTE, L.V. CORSETTI
"Fission gas release and dimensional changes of test fuel rods containing densifying and non densifying fuel"
ANS Topical meeting on light water reactor fuel performance. May 1979
- [4] H. CARLSEN
"Fission gas release in LWR fuel rods exhibiting very high burn-up"
Nucl. Eng. Des. Feb. 1980 V.56(I) 183-187
- [5] J.A. TURNBULL and C.A. FRISKNEY
"The relation between microstructure, and the release of unstable fission products during high temperature irradiation of uranium dioxide"
J.N.M. 71(1978) 238-248
- [6] F. GARZAROLLI, R. MANZEL, H. STEHLE
"KWU Fuel performance with emphasis on high burn up"
ANS Topical meeting on light water reactor fuel performance. Portland May 1979
- [7] D. FRANKLIN, H. OCKEN, T. OLDBERG
"LWR core materials performance program : progress in 1979-1980", NP 1770-SR, EPRI Special Report, March 1981
- [8] P. CHENEBAULT, R. DELMAS
"Emission des gaz de fission par l'oxyde d'uranium dans les éléments combustibles", IAEA-PL-463/19c, 1974

[9]

S. PETITGRAND

"Predictions of the thermomechanical code "RESTA" compared with fuel element examinations after irradiation in the BR₃ reactor", IAEA specialists meeting on "water reactor fuel element performance computer modelling", BLACKPOOL, 16-21 March 1980

[10]

J. DELAFOSSE, G. LESTIBOUDOIS

"Colloque International sur la Fabrication des Eléments Combustibles pour Réacteurs à Eau et plus spécialement son Incidence sur la Performance du Combustible", Prague, 6-10 Novembre 1978

[11]

J.F. MARIN, C. PILLIET, B. FRANÇOIS, P. MORIZE, S. PETITGRAND, R. ATABEK, B. HOUDAILLE

"Qualification sous irradiation du crayon CEA : de la conception des composants à l'irradiation d'assemblages en réacteur de puissance", Conférence sur la caractérisation et le contrôle de qualité des combustibles nucléaires, Karlsruhe, 2-5 juin 1981

[12]

Y. KAUFFMANN, J.P. MORLEVAT, J.C. JANVIER, M. BRUET

"Unconstrained swelling of UO₂", IAEA Specialists' meeting on "water reactor fuel element performance computer modelling", Blackpool, 16-21 March 1980

[13]

R. CYTERMANN, M. PERROT

"Quelques résultats d'analyses radiales de Xe et Cs dans UO₂ et (U, Pu)O₂", ANRT Réunion Microsonde et Microscope à Balayage, Karlsruhe, 23-24 juin 1981

[14]

T. PINEIRA

"Analyse quantitative non destructive par spectrométrie des combustibles irradiés", Rapport CEA-R.4944

[15]

M. COMTE, N. VIGNESOULT

"Comportement du césium dans les éléments combustibles des réacteurs à eau et surrégénérateur" IAEA Specialists' Meeting on "Internal fuel rod chemistry", 23-25 January 1979

[16]

M. BRUET, B. HOUDAILLE, R. ATABEK, D. BARON

"French analytical experience on high burn-up performance of PWR fuel elements under steady-state conditions" - This meeting, paper n° 57

[17]

P. CHENEBAULT, G. KURKA, E. LE BOULBIN

"Détermination des gaz de fission présents dans le bioxyde d'uranium irradié", Nuclear Instruments and Methods, 65 (1968) 163-168

[18]

J.C. JANVIER, M. BRUET, R. BLANCHARD

"Fission gaz pressure evolution in irradiated coated particles"
BNES "Nuclear fuel performance", London, 15-19 octobre 1973

[19]

H. ZIMMERMANN

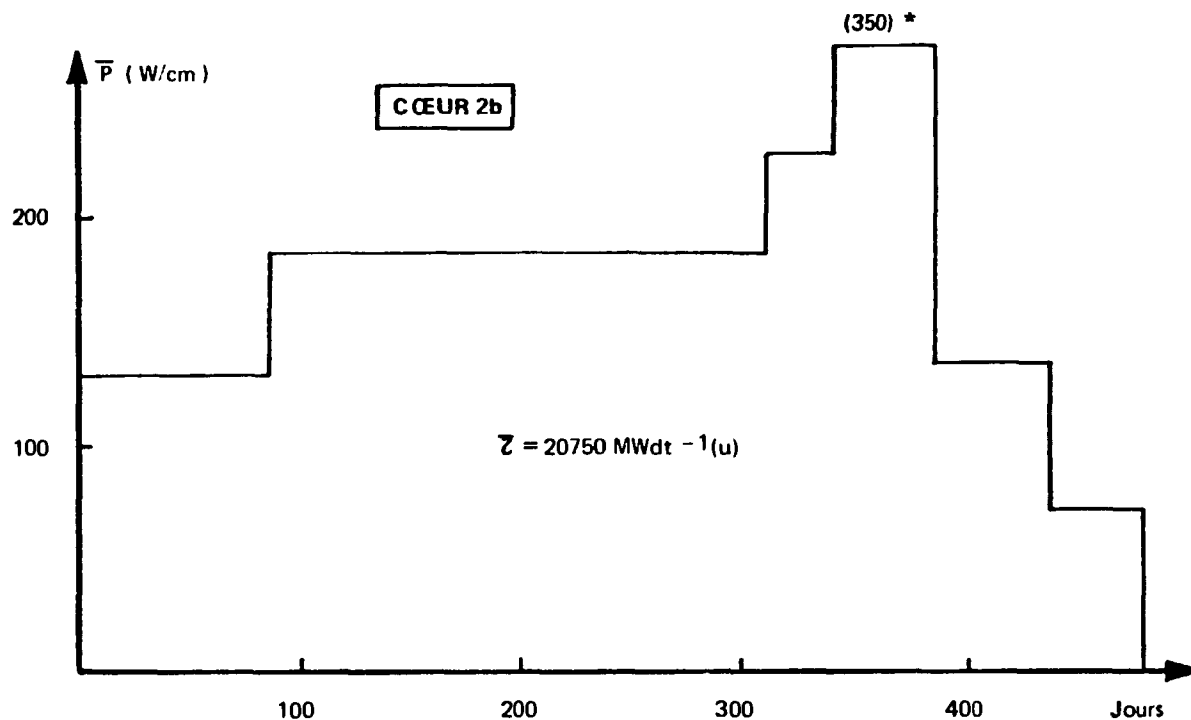
"Investigation on Swelling and fission gas behaviour in uranium dioxide", J.N.M. 75 (1978), 154-161

[20]

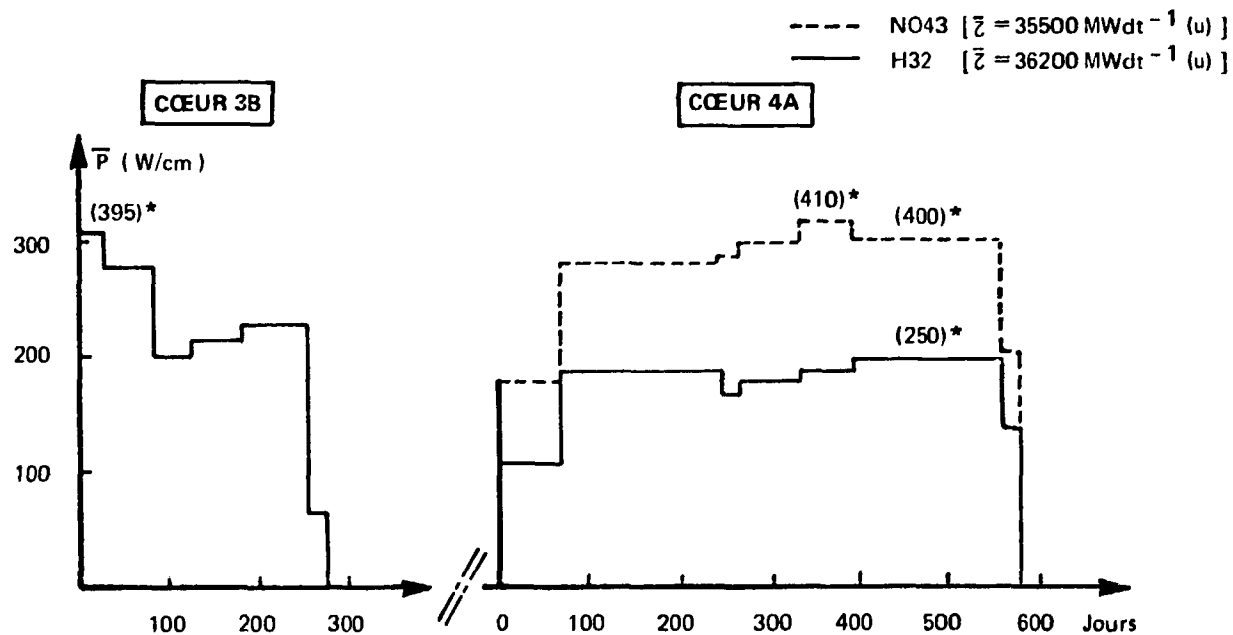
R. HARGREAVES

"Fission gas release at high burn-up in thermal reactor fuel"
IAEA Specialists' Meeting on "High Burnup in Power Reactor Fuel" -
MOL, 24-27 March 1981.

Mesure par microanalyse X : évolution de la puissance linéaire moyenne des crayons en fonction du temps



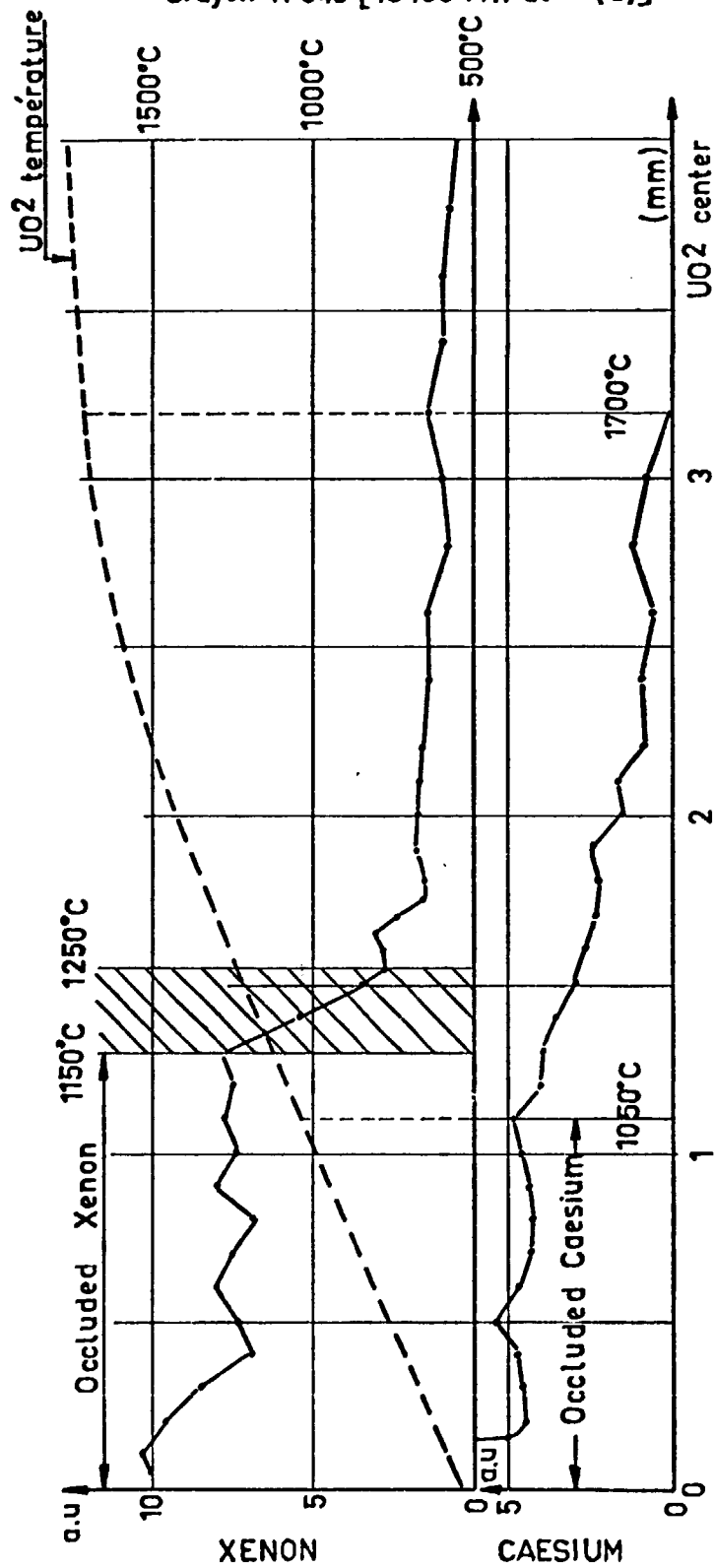
a) oxyde DCNi - Historique d'irradiation du crayon le plus chargé



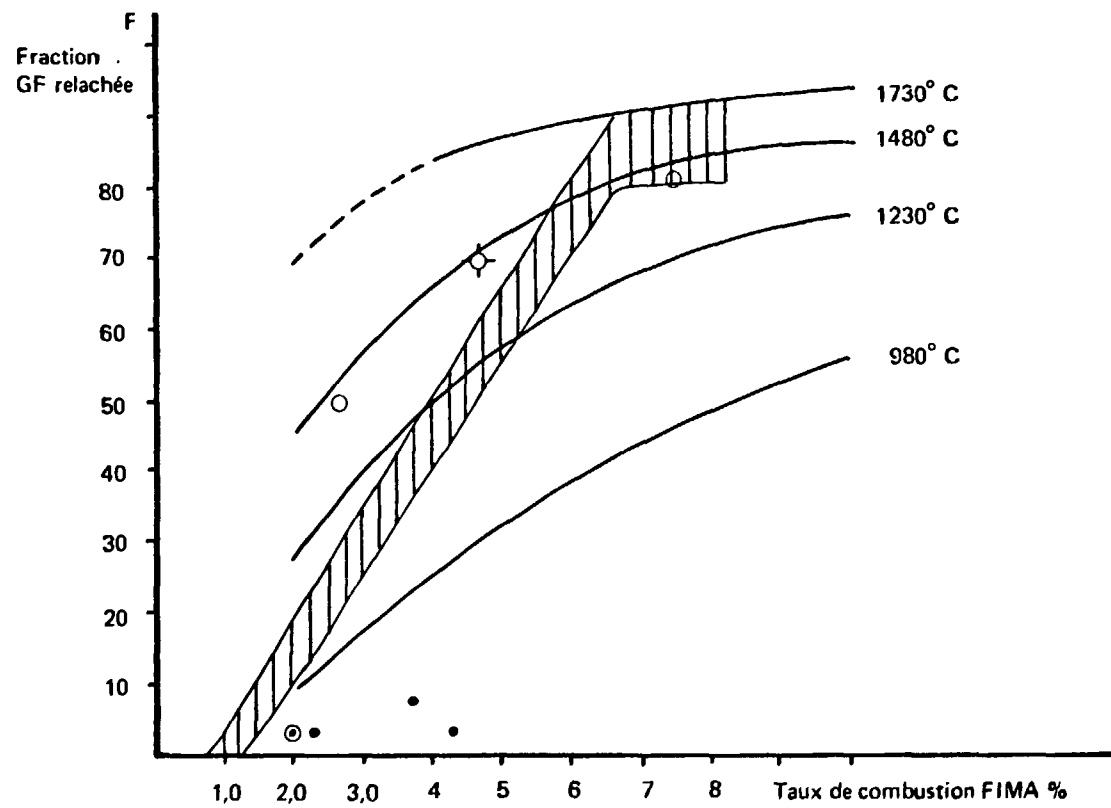
b) oxyde DCI - Historique d'irradiation des crayons NO43 et H32

* () = Puissance locale maximale du crayon

Figure 2.X Microanalysis II: Radial distribution of xenon and caesium
 Crayon N 043 [45450 MW dt⁻¹ (u)]



Expérience TANGO . Comparaison aux résultats HTR et de la référence [16]

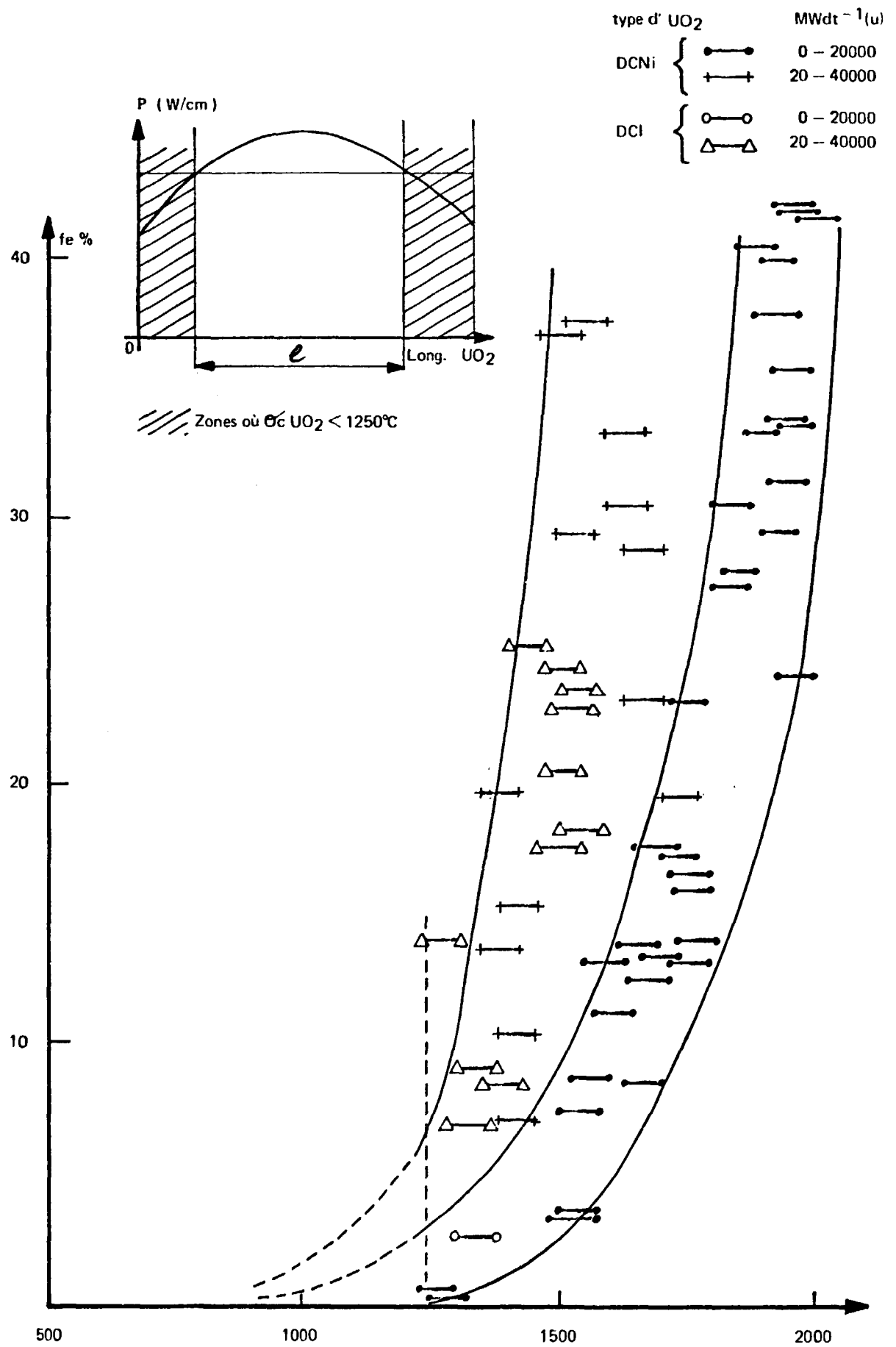


TANGO : ○ 1500° C
 ⊙ 1200° C
 • <900° C

HTR [15] : ⊕ >1400° C
 ||| 1100 < T < 1320

Zimmermann [16] —————

Fraction de gaz, fe (%), dégagée pour un oxyde ayant fonctionné à une température centrale supérieure à 1250°C



Fraction globale de gaz dégagée dans les crayons combustibles

