

FR8502369

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE SACLAY

Service de Documentation

F91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

CEA-CONF - - 7879

L4

TRAITEMENT DES RESULTATS DE DIAGRAPHIES GAMMA SPECTROMETRIQUES

UMIASTOWSKI, K.; DUMESNIL, P.

-CEA, CEN Saclay, IRDI, DEIN

Communication présentée à : International colloquium on SAID-SPWLA logs  
Paris (France) 23-26 Oct 1984

## TRAITEMENT DES RESULTATS DE DIAGRAPHIES GAMMA SPECTROMETRIQUES

Krzysztof UMIASTOWSKI, Patrice DUMESNIL

Commissariat à l'Energie Atomique, CEN-Saclay, France. ^

### R E S U M E

Le CEA a développé une sonde spectrométrique gamma équipée d'un convertisseur analogique numérique. Ce nouvel outil permet d'effectuer des mesures spectrométriques précises ce qui lui confère une grande efficacité pour l'exécution de certaines diagraphies : uranium (rayonnement gamma naturel), activation neutronique et litho-densité (gamma-gamma spectrométrique).

Dans tous les cas, les spectres enregistrés en forage sont traités par une nouvelle méthode qui prend en compte les problèmes spécifiques des diagraphies et permet d'identifier et de traiter les pics caractéristiques même lorsqu'ils sont superposés à un spectre continu intense. Le traitement considéré permet aussi d'extraire les informations géologiques contenues dans la composante continue du spectre.

Un logiciel a été écrit en langage évolué et implanté sur les ordinateurs SIRIUS et APOLLO pour mettre en oeuvre cette méthode.

Les exemples présentés concernent la diagraphie uranium et l'activation neutronique.

## PROCESSING OF GAMMA-RAY SPECTROMETRIC LOGS

Krzysztof UMIASTOWSKI, Patrice DUMESNIL

Commissariat à l'Energie Atomique, CEN-Saclay, France.

### S U M M A R Y

CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) has developed a gamma-ray spectrometric tool, containing an analog-to-digital converter. This new tool permits to perform very precise uranium logs (natural gamma-ray spectrometry), neutron activation logs and litho-density logs (gamma-gamma spectrometric logs).

Specific processing methods were developed to treat the particular problems of down-hole gamma-ray spectrometry. Extraction of the characteristic gamma-ray peak, even if they are superposed on the background radiation of very high intensity, is possible. This processing method enables also to obtain geological informations contained in the continuous background of the spectrum.

Computer programs are written in high level language for SIRIUS (VICTOR) and APOLLO computers.

Exemples of uranium and neutron activation logs treatment are presented.

# TRAITEMENT DES RESULTATS DE DIAGRAPHIES GAMMA SPECTROMETRIQUES

Krzysztof UMIASTOWSKI, Patrice DUMESNIL

Commissariat à l'Energie Atomique, CEN-Saclay, France.

## 1. Introduction.

Le CEA, Département d'Electronique et d'Instrumentation Nucléaire a développé une sonde spectrométrique gamma [1] [2]. Le convertisseur analogique-numérique disposé dans la sonde assure la conversion de l'amplitude de l'impulsion analogique en un signal numérique. Celui-ci est transmis en surface par un câble standard. La transmission numérique de l'information permet d'éviter la distortion de l'impulsion analogique dans le câble.

Deux sondes prototypes ont été réalisées suivant ces principes : une sonde "passive" (c'est à dire, sans source radioactive) pour la spectrométrie du rayonnement gamma naturel, en vue d'estimer les minerais d'uranium, et une sonde pour l'activation neutronique destinée à des mesures dans les stockages souterrains du Gaz de France. Il est envisagé par ailleurs, de réaliser une troisième sonde équipée d'une source émettant des photons gamma pour effectuer des mesures gamma-gamma spectrométriques.

Les méthodes d'interprétation développées pour le traitement des spectres gamma obtenus en laboratoire ne peuvent pas s'appliquer directement aux diagraphies spectrométriques gamma. En effet, les mesures de laboratoire sont toujours effectuées de manière à minimiser le rayonnement diffusé atteignant le détecteur et la "ligne de base" du spectre ne provient pratiquement que des diffusions survenant dans le détecteur. Dans le cas des diagraphies gamma ( gamma naturel, neutron-gamma et gamma-gamma), les pics caractéristiques sont superposés à un spectre continu intense dû aux diffusions survenant dans la roche et le dans forage. Les informations géologiques sont contenues non seulement dans les pics caractéristiques mais aussi dans le spectre continu [3].

Le traitement des résultats des diagraphies gamma spectrométriques pose donc deux problèmes :

- le traitement des pics caractéristiques ;
- l'extraction des informations contenues dans la composante continue du spectre.

## 2. Traitement des pics caractéristiques.

Les pics sont en général superposés à un spectre continu d'intensité nettement supérieure à leur amplitude. Le traitement doit permettre de déterminer la position du pic et sa surface.

### 2.1 Détection des pics.

Le spectre enregistré  $y$  est la somme du pic  $y_p$  (pour simplifier l'exposé admettons qu'il y a un seul pic) et du spectre continu  $y_c$  :

$$y = y_p + y_c \quad (1)$$

La forme du pic est décrite par une fonction de Gauss :

$$y_p = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(- (x-x_0)^2 / 2\sigma^2) = A_p e^{-\alpha(x-x_0)^2} \quad (2)$$

où  $x$  représente, soit l'énergie, soit le numéro du canal du spectromètre.

Pour le spectre continu on suppose (ce qui est en accord avec l'expérience) qu'il a une forme exponentielle décroissante :

$$y_c = B e^{-\beta x} \quad (3)$$

Dans le cas où le pic est bien prononcé ( $y_p > y_c$ ), le traitement ne pose pas de problème. La méthode développée concerne le cas où :

$$y_p \ll y_c \quad (4)$$

c'est-à-dire que l'intensité du pic est très faible par rapport au spectre continu. En partant des formules (1), (2) et (3) avec la condition (4) on obtient:

$$F = \frac{d}{dx} (\ln y) = -\beta + C (x_0 - x) \exp\left\{- (x - x_0)^2 / 2\sigma^2\right\} \quad (5)$$

Le second terme de cette formule représente une dérivée de la fonction de Gauss. La convolution de la fonction  $F$  avec la dérivée de la fonction de Gauss  $G'$  :

$$C(x) = F * G' = \int_{x_1}^{x_2} F(x) G'(t-x) dx \quad (6)$$

$$\text{où } F = \frac{d}{dx} (\ln y)$$

$$G' = \frac{d}{dx} (A_p e^{-\alpha x^2})$$

— passe par un maximum pour  $x=x_0$ , qui représente la position du pic.

La convolution normalisée est définie par la formule suivante:

$$C(x) = \frac{F * G'}{\sqrt{S_F^2 S_G^2}} \quad (7)$$

$$\text{où } S_F^2 = \int_{x_1}^{x_2} [F(x)]^2 dx$$

$$S_G^2 = \int_{x_1}^{x_2} [G'(x)]^2 dx$$

La valeur de  $C_N(x)$  est comprise dans l'intervalle  $(-1, +1)$ . Pour l'énergie du pic, c'est-à-dire pour  $x=x_0$ , la convolution calculée d'après la formule (7), est égale à 1. Cependant, les valeurs enregistrées comportent toujours nécessairement une composante due au "bruit" et de ce fait la valeur maximale de  $C_{max}$  est toujours inférieure à 1. Plus la valeur de  $C_{max}$  est proche de 1, plus la présence du pic est probable.

## 2.2 Calcul de l'aire des pics.

La détermination de la surface du pic peut se faire par deux méthodes. La première consiste à utiliser la fonction  $F$  déterminée par la formule (5) (voir la figure 1). On peut calculer les coefficients  $A$  et  $\sigma$  [4], en utilisant les formules :

$$A = \frac{1}{2} 2\pi e \sigma^2 (y_1 - y_2) \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{1}{2} (x_2 - x_1) \quad (9)$$

les symboles utilisés sont explicités sur la figure 3. La surface du pic est égale à :

$$S_p = \int y_p dx = A \quad (10)$$

La seconde méthode consiste à soustraire la ligne de base du spectre total. La ligne de base est déterminée par interpolation. La fonction  $F$  permet de déterminer la position du pic, sa largeur ( $\sigma$ ), et le paramètre  $\beta$  déterminant la pente du spectre continu au voisinage du pic. On ajuste le paramètre  $B$  de la fonction  $y_c = B \exp(-\beta x)$  (équation (3)), par la méthode des moindres carrés, sur les valeurs du spectre situées en dehors du pic ( c'est-à-dire en dehors de l'intervalle  $(x_0 - n\sigma, x_0 + n\sigma)$ ,  $n$  ayant une valeur comprise entre 2 et 3 ).

La surface du pic est calculée par la formule suivante :

$$S = \int_{x_0 - n\sigma}^{x_0 + n\sigma} (y - y_c) dx \quad (11)$$

Un programme de simulation numérique actuellement en développement doit permettre de comparer les performances de ces deux méthodes pour le traitement des spectres entachés de bruit.

## 2.3 Exemple de traitement d'un spectre d'activation neutronique.

La méthode décrite a été utilisée pour l'interprétation des résultats des mesures d'activation neutronique effectuées pour le contrôle des stockages souterrains de gaz naturel. Dans un réservoir souterrain il faut maintenir une pression minimale. Dans ce but, au début de l'exploitation du réservoir, on injecte du gaz inerte obtenu par combustion du gaz naturel (ce procédé permet d'augmenter le volume total du gaz obtenu). Ce gaz contient de l'argon, provenant de l'air ; par contre le gaz naturel n'en contient pas. Pour déterminer la nature du gaz présent à un niveau donné de la formation on utilise l'activation neutronique de l'argon. La réaction utilisée est la suivante :



L'argon 41, émet des photons gamma d'énergie égale à 1.294 MeV. Sa période est de 110 min. Les autres réactions à prendre en considération sont l'activation du fer et du manganèse. L'importance du fer provient du fait que le tubage est en acier et que la roche contient toujours une certaine quantité de fer. Le manganèse a une section efficace d'activation très élevée. Le fer est activé par les neutrons rapides suivant la réaction :



Le manganèse est activé par la réaction :



Le manganèse 56 émet des photons de trois énergies : 0.847 MeV, 1.811 MeV et 2.113 MeV, sa période est de 155 min. Le potassium 41, élément radioactif naturel émet des photons d'énergie égale à 1.46 MeV.

La figure 2a représente un spectre enregistré dans un puits au niveau du gaz inerte, et la figure 3a, un autre spectre obtenu à un autre niveau dépourvu d'argon. La convolution de ces spectres fait ressortir les pics de l'argon et du potassium dans le premier cas (figure 2b), et seulement du potassium dans le second cas (figure 3b). La surface estimée des pics de l'argon et du potassium est plus de 100 fois inférieure à la surface des pics du manganèse.

### 3. Traitement de la composante continue du spectre.

Il a été démontré expérimentalement (3) que les mesures gamma-gamma spectrométriques permettaient de déterminer plusieurs paramètres géologiques simultanément, notamment :

- densité ;
- teneur en éléments lourds (minerai de fer par exemple) ;
- diamètre du forage, donc les cavernes ;
- dimensions des grains, dans le cas où un élément lourd se présente sous la forme de grains répartis dans une matrice (par exemple certains minerais de Zn et de Pb) ;

Toutes ces informations sont donc contenues dans le spectre du rayonnement diffusé par la roche.

Une des premières applications pratiques de l'utilisation de la forme du spectre gamma diffusé est la méthode de détermination de la teneur en uranium des minerais, proposée par Czubek, [5], [6]. Cette méthode utilise la relation suivante:

$$\tau = a + b \ln P \quad (15)$$

$$\text{où } P = I_1 / I_2$$

$I_1$  - nombre de coups enregistrés dans une fenêtre énergétique où l'absorption photoélectrique des photons par Uranium est forte;

$I_2$  - nombre de coups enregistrés dans une fenêtre où la diffusion Compton est prédominante.

La teneur en uranium obtenue de cette manière est indépendante du déséquilibre radioactif.

À partir d'une étude théorique Czubek a proposé les limites suivantes pour les fenêtres énergétiques, fenêtre 1: 100 à 130 KeV, fenêtre 2: 300 à 700 KeV.

Les premières expériences, réalisées avec en utilisant les appareils de laboratoire (6), ont montré que les coefficients a et b de la formule (15) dépendent de la nature du tubage et de structure de la sonde.

L'étalonnage précis du spectromètre a une importance capitale pour une interprétation correcte des mesures. Deux paramètres ont une influence importante sur l'étalonnage : la température et la vitesse de comptage des impulsions. Une sonde de diagraphie spectrométrique gamma peut être étalonnée seulement en dehors du forage. Les conditions d'étalonnage sont donc nécessairement différentes des conditions dans lesquelles les mesures sont effectuées. L'emploi d'un stabilisateur de spectre utilisant une source supplémentaire, ne peut être envisagé, à cause de la déformation du spectre provoquée par cette source. Les pics de radiation caractéristiques du bismuth 214 (609 KeV) et du plomb 214 (352 KeV) ont été utilisés pour corriger l'étalonnage de la sonde. Ces pics ont été traités par la méthode décrite dans le paragraphe précédent.

Plusieurs séries d'expériences ont été réalisées pour évaluer les performances de la sonde spectrométrique pour la diagraphie d'uranium. Les mesures ont été effectuées dans les blocs de béton contenant une quantité d'uranium connue, comprise entre 0.05 % et 1.0 %.

L'analyse des résultats obtenus a montré la nécessité de modifier les limites des fenêtres énergétiques pour le calcul de  $I_1$  et  $I_2$  (voir la formule (15)). Les valeurs : 76 à 120 KeV pour la fenêtre 1 et 400 à 592 KeV pour la fenêtre 2, ont donné la meilleure corrélation entre  $\ln P$  et la teneur en uranium. Les résultats doivent être traités séparément selon que le forage est sec ou inondé. Par contre la position de la sonde dans le forage (sonde centrée, plaquée contre la paroi ou en position indéterminée) a très peu d'influence sur les résultats. Les résultats d'interprétation sont présentés sur les figures 4 et 5. Le coefficient de corrélation est  $r = 0.99$ . L'erreur relative sur la détermination de la teneur décroît de 35% pour une teneur de 500 ppm à 1 % pour une teneur de 1%.

Une autre méthode d'interprétation consiste à utiliser la modification de la forme du spectre en fonction de la teneur en uranium. Les spectres correspondant aux différentes teneurs en uranium sont présentés sur la figure 6, sur une échelle semi-logarithmique. Ces spectres peuvent être approximés par des segments de droite. La pente de cette droite correspond au paramètre  $\beta$  de la formule (3). Pour les énergies supérieures à 400 KeV la valeur de  $\beta$  ne dépend pas de la teneur en uranium. Dans l'intervalle des énergies comprises entre 160 et 300 KeV le paramètre  $\beta$  est une fonction décroissante de la teneur en uranium. Il y a une très bonne corrélation entre  $\beta$  et la teneur en uranium, mais la relation n'est pas linéaire. Les résultats sont présentés sur la figure 7.

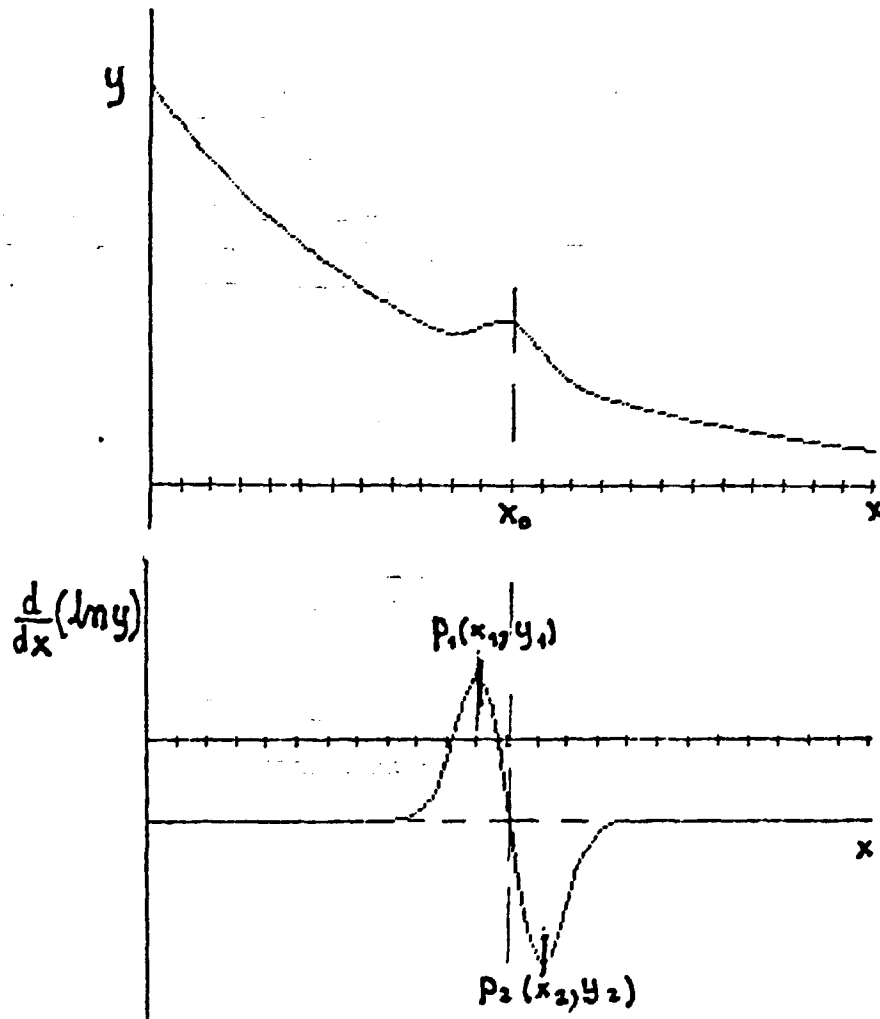
Il est aussi possible, en utilisant des algorithmes de reconnaissance de formes, à partir du paramètre P de Czubek et le paramètre  $\beta$ , de déterminer si le forage est sec ou inondé. Les résultats sont présentés sur la figure 8. On cherche maintenant la combinaison des paramètres assurant la meilleure discrimination.

Les calculs, correspondant aux algorithmes présentés ci-dessus ont, ont été effectués sur les ordinateurs SIRIUS (Victor) et APOLLO. Les programmes sont écrits en langages évolués: FORTRAN et BASIC. Ces calculs ont été en grande partie effectués par deux ingénieurs stagiaires : Philippe Dumesnil de l'ESTACA de Paris et Bernard Chenin de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg.

#### Bibliographie.

1. P. DUMESNIL "A new probe for gamma spectrometric logging"-Transactions of Eight European Formation Evaluation Symposium-London, March 14-15, 1983.
2. P. DUMESNIL K. UMIASTOWSKI "Gamma-Ray Spectrometry Applied to Down-Hole Logging"-Proceedings of IAEA Consultants' Meeting on Nuclear Data for Bore-Hole and Bulk-Media Assay Using Nuclear Techniques-A.I.E.A. Vienna, 1984, p.253.
3. J. CHARBUCINSKI "A universal gamma-gamma method for simultaneous determination of rock and ore properties"-Nuclear Geophysics-Pergamon Press, 1983, p. 353-361.
4. B. CHENIN- communication privée.
5. J. A. CZUBEK -Nuclear Selective Gamma Logging, A New Log for Direct Uranium Determination - Nukleonika XIII, No 1, (1968), p. 89-108.
6. J. A. CZUBEK, P. DUMESNIL "Radiocarottage gamma naturel sélectif" - Nuclear Techniques and Mineral Resources - Proceedings of a Symposium, Buenos Aires, 5-9 November 1968, A.I.E.A.1 Vien, 1969, p. 223-248.



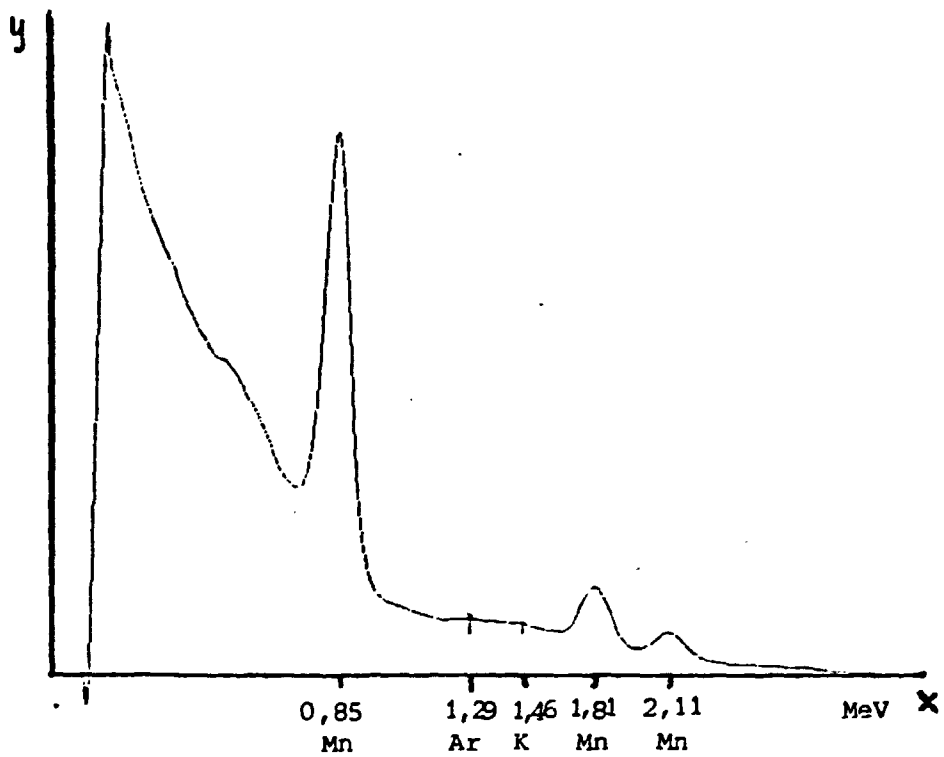


Détermination des paramètres du pic superposé à un spectre continu exponentiel.

$$x_2 - x_1 = 2\sigma$$

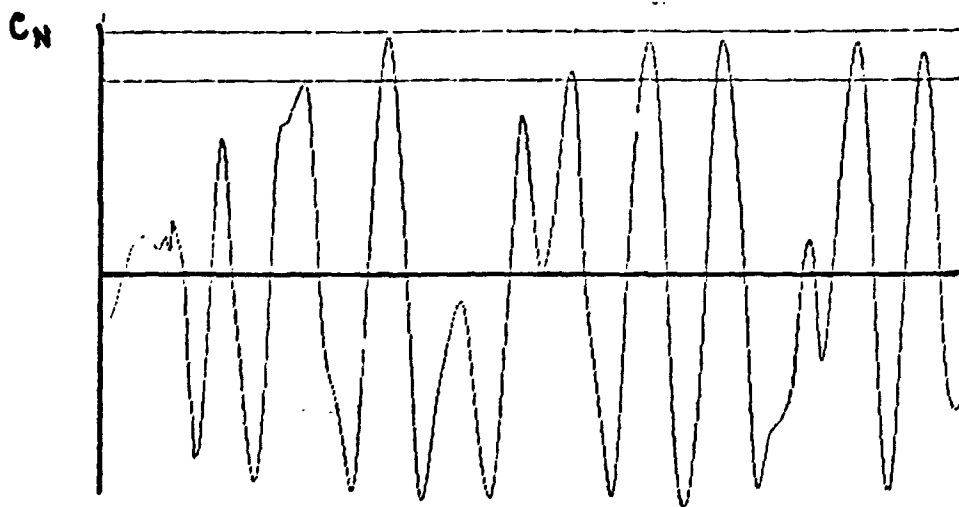
$$y_1 - y_2 = \frac{2A}{\sqrt{2\pi e} \sigma^2}$$

FIGURE 1



- a -

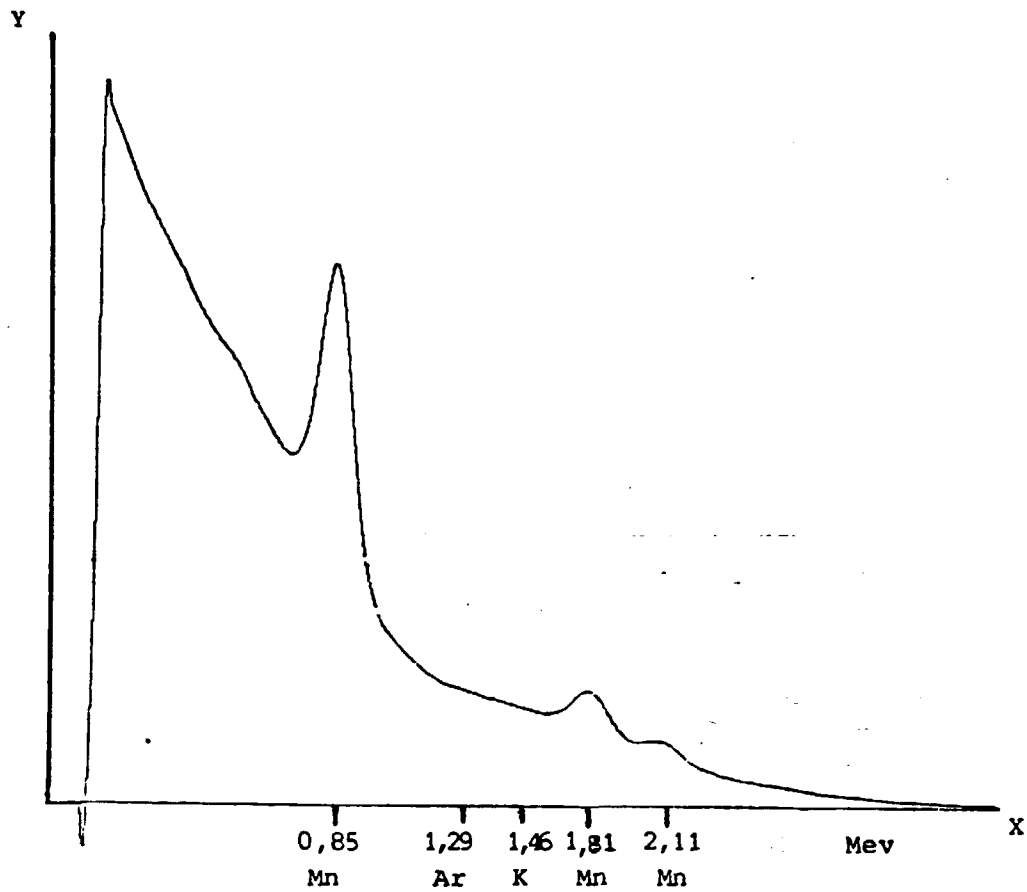
Spectre de rayonnement gamma enregistré.



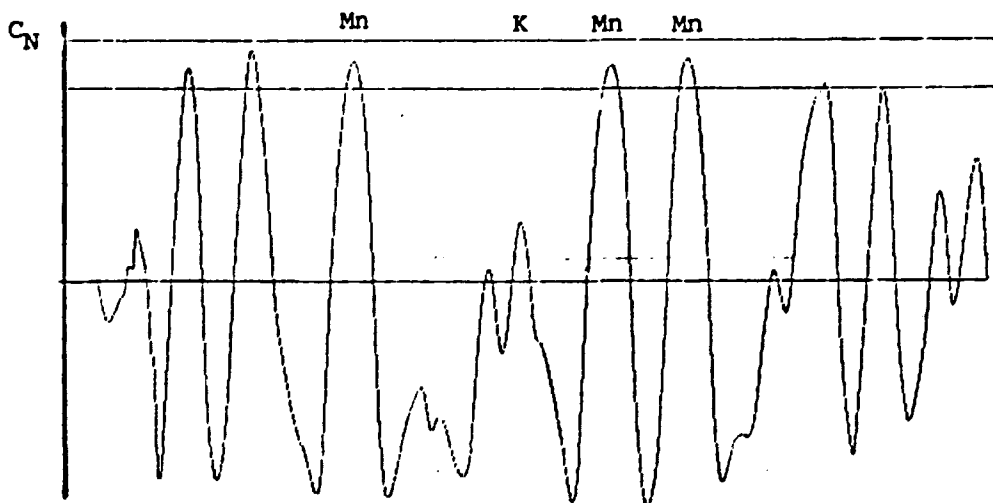
- b -

Convolution de ce spectre suivant la formule (7).

Spectre d'activation neutronique enregistré dans un réservoir souterrain de gaz, au niveau du gaz inerte contenant de l'argon.

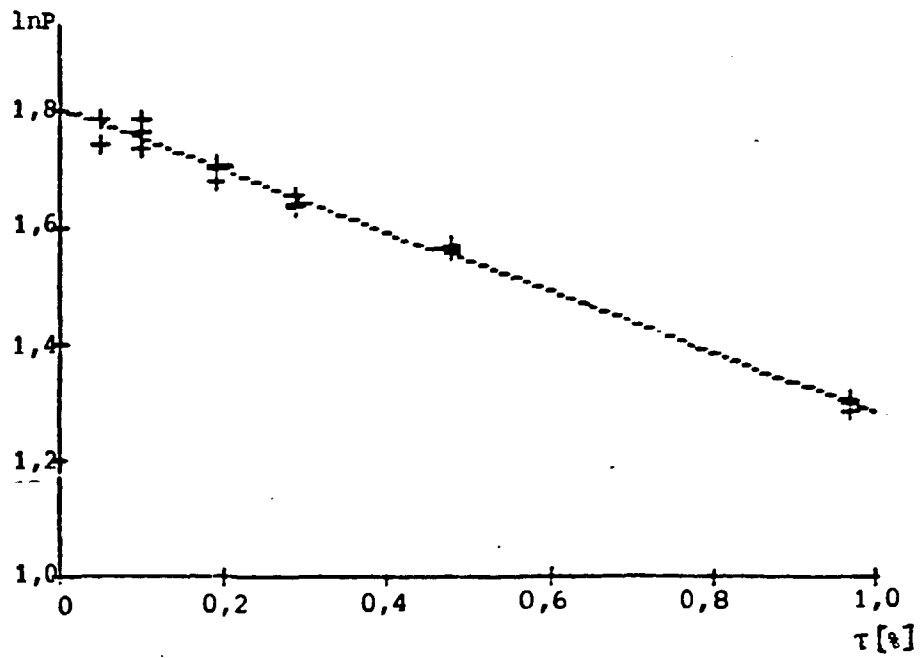


- a -  
Spectre de rayonnement gamma enregistré.



- b -  
Convolution de ce spectre suivant la formule (7).

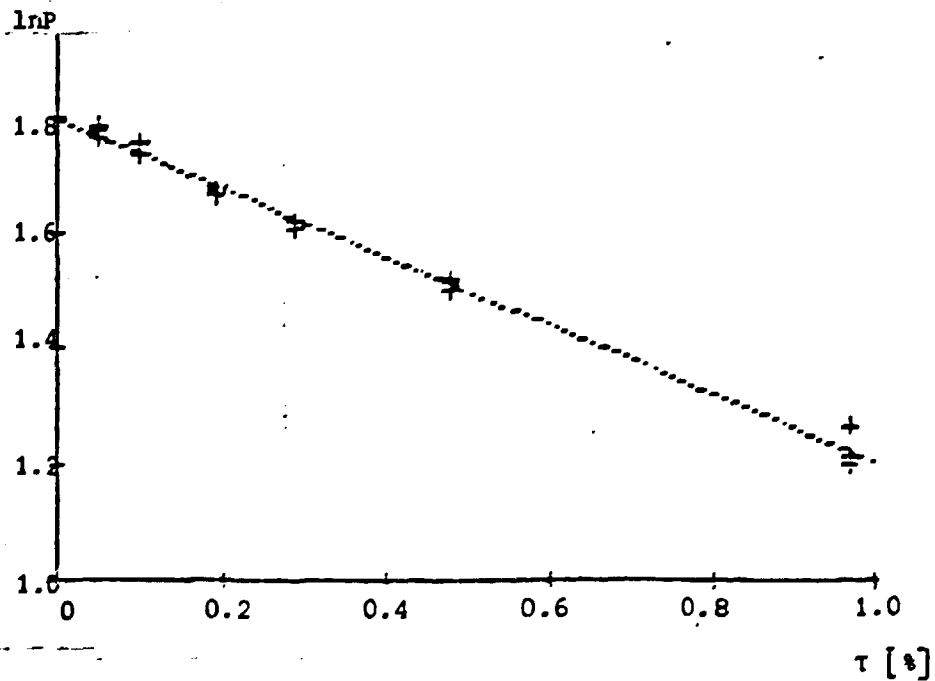
Spectre d'activation neutronique enregistré dans un réservoir souterrain de gaz, au niveau dépourvu d'argon.



Corrélation entre la teneur en uranium  $\tau$  et le paramètre de Czubek  $\ln P$ , pour les puits inondés.

$$\ln P = 1.803 - 0.520 \tau \quad r^2 = 0.990$$

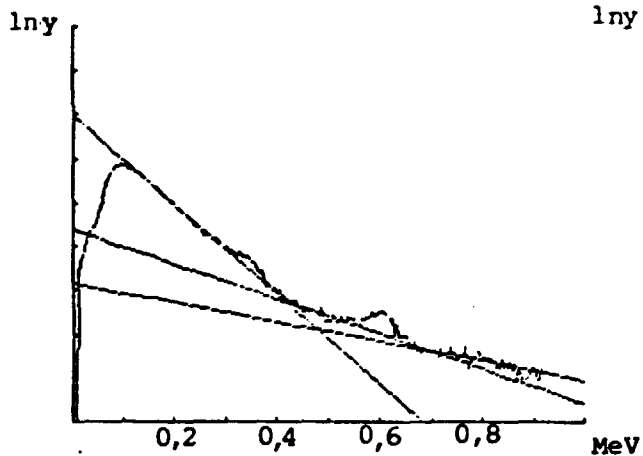
- FIGURE 4 -



Corrélation entre la teneur en uranium et le paramètre de Czubek  $\ln P$ , pour les puits secs.

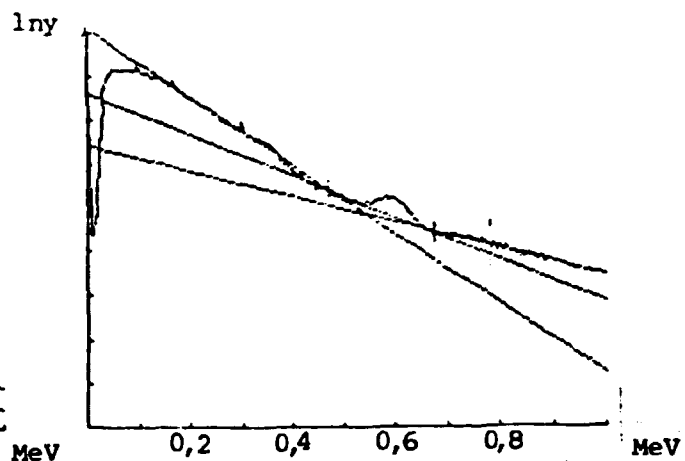
$$\ln P = 1.977 - 0.593 \tau \quad r^2 = 0.993$$

- FIGURE 5 -



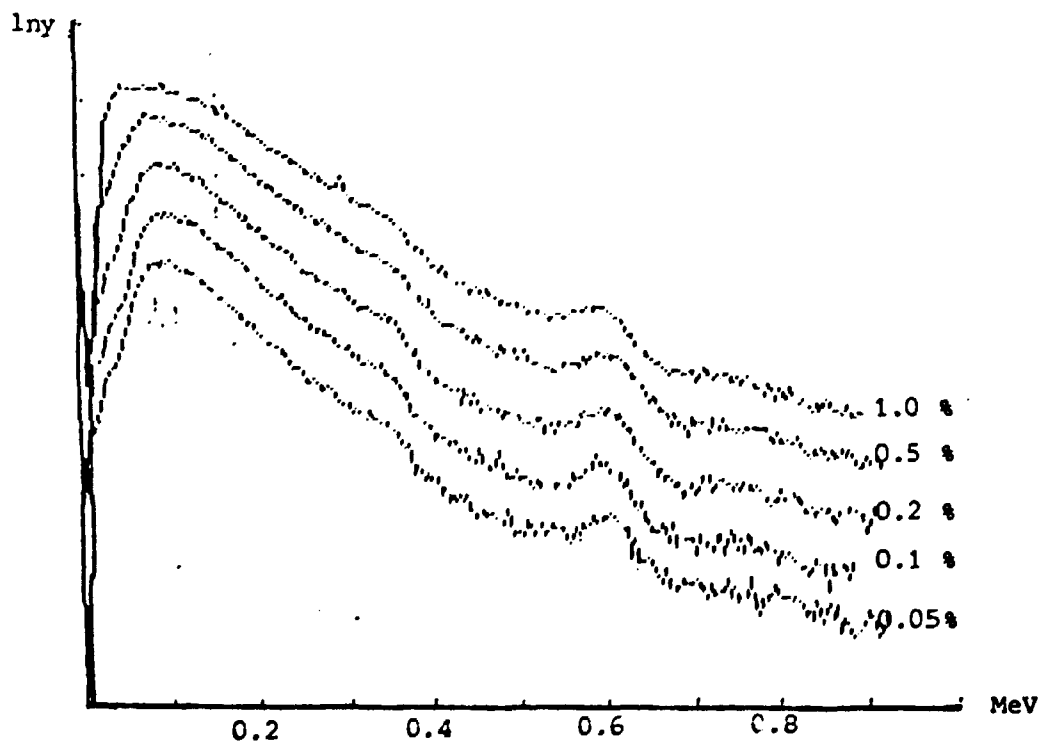
-a-

Spectre correspondant à  
0.05 % d'uranium.



-b-

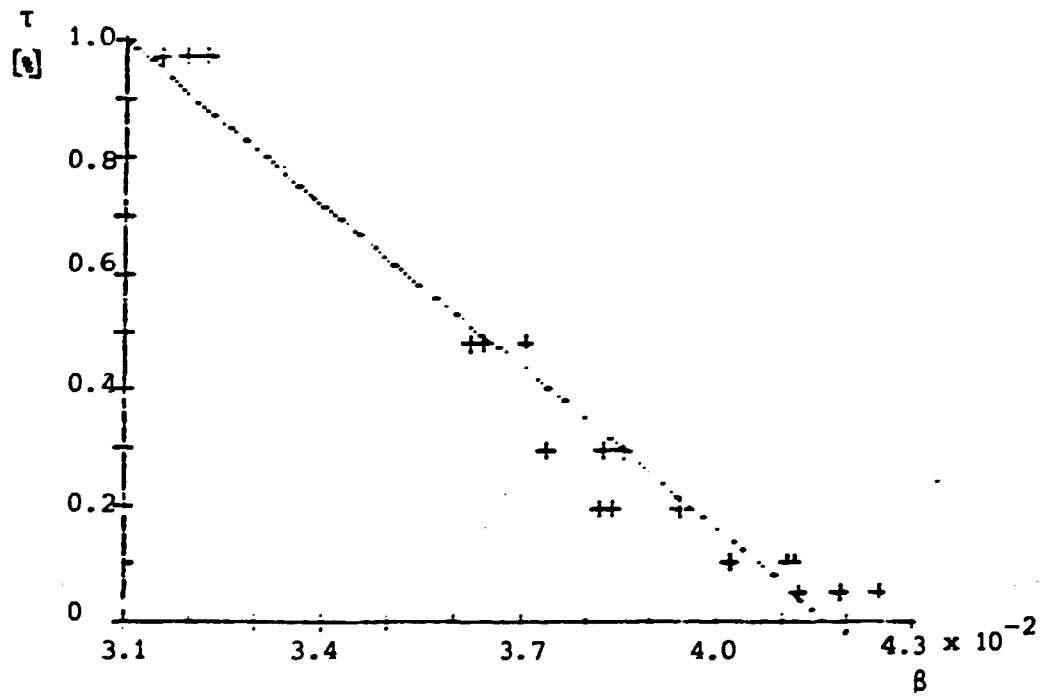
Spectre correspondant à  
1.0 % d'uranium.



-c-

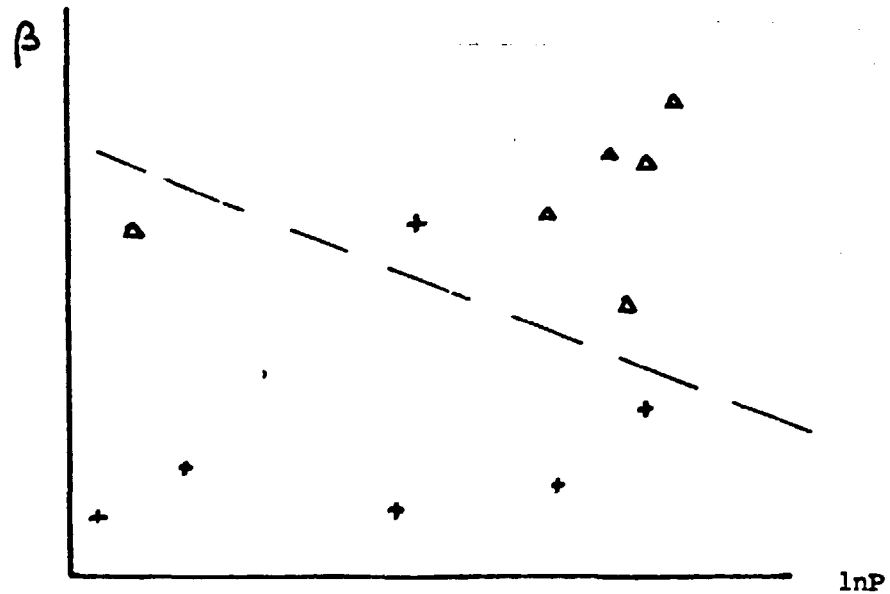
Spectres correspondant aux différentes teneurs comprises  
entre 0.05 % et 1.0 %.

Approximation du logarithme du spectre par des segments de droite.



Corrélation entre la teneur en uranium  $\tau$  et le paramètre  $\beta$ .  
 $\tau = 3.895 - 0.934 \beta \quad r^2 = 0.949$

- FIGURE 7 -



Discrimination entre les puits secs et inondés sur un diagramme  $\ln P, \beta$ .

+ puits secs  
 $\Delta$  puits inondés.

- FIGURE 8 -