

Journées de l'Uranium d'Orsay

Université Paris Saclay

20 et 21 janvier 2022

« Sondes diagraphiques neutroniques pour
la mesure de la teneur en uranium ou de la
porosité hydrogène »

The CEA logo consists of the lowercase letters 'cea' in a white, stylized font, with a horizontal green line underneath.The Orano logo features a stylized yellow and orange circular icon to the left of the word 'orano' in a white, lowercase, sans-serif font.

V. Fondement^{1*}, T. Marchais¹, B. Pérot¹, H. Toubon², Y. Bensedik²

¹CEA, DES, IRESNE, DTN/SMTA/LMN,

Nuclear Measurement Laboratory, 13108 St Paul-lez-Durance, France

²ORANO Mining, 92320 Chatillon, France

* valentin.fondement@cea.fr

20/01/2022

❑ L'Interrogation Neutronique Active (INA)

- 1) Rappels de physique
- 2) Les sources de neutrons
- 3) Détecter les neutrons

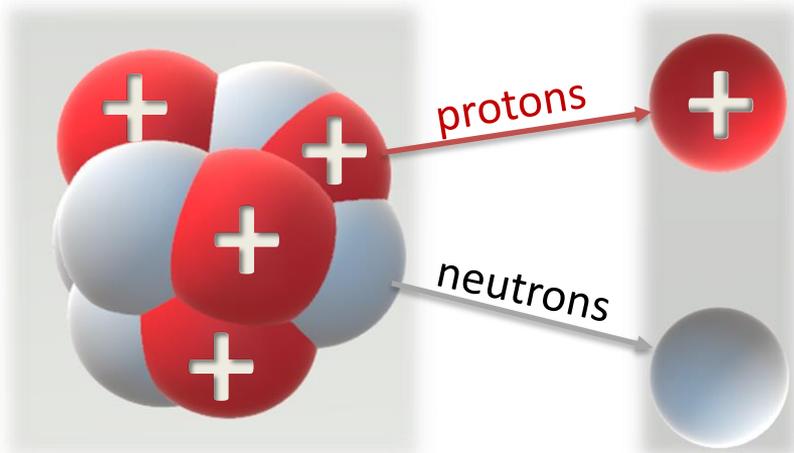
❑ Mesurer la teneur en uranium avec la *Prompt Fission Neutron* (PFN)

- 1) Principe de fonctionnement
- 2) La mesure PFN
- 3) Performances des outils PFN

❑ Mesurer la porosité hydrogène en rétrodiffusion neutronique (NBS)

- 1) La porosité hydrogène
- 2) Rétrodiffusion neutronique – *Neutron BackScattering* (NBS)
- 3) Performances des outils *neutron porosity*

L'Interrogation Neutronique Active (INA)

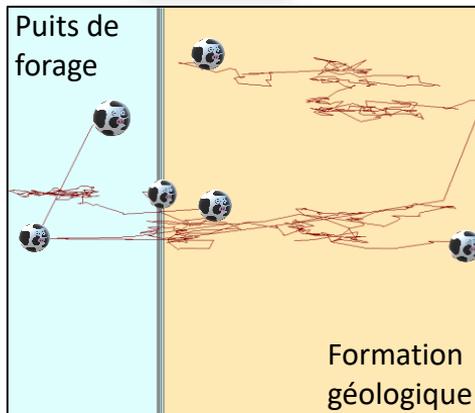


Représentation schématique d'un noyau de Carbone 12 (^{12}C)



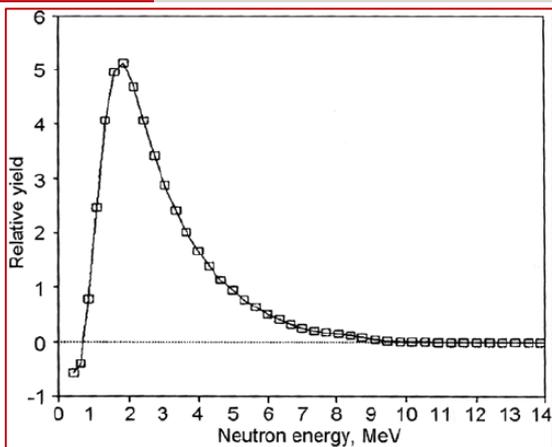
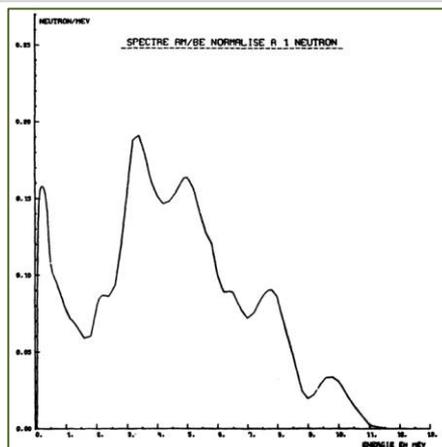
Neutron Normand (Meuhtron):

« ptet ben que je vais m'arrêter là, ptet pas ! »



Diffusions neutroniques dans un puits de forage et une formation

- Les noyaux des atomes sont constitués de protons et de neutrons
- Les neutrons sont électriquement neutres
- Les neutrons n'interagissent qu'avec les noyaux via des forces nucléaires
- Les interactions neutroniques sont des processus stochastiques
- L'INA (Interrogation Neutronique Active) permet de caractériser un milieu à l'aide des interactions de neutrons interrogateurs

Spectre neutron de ^{252}Cf 

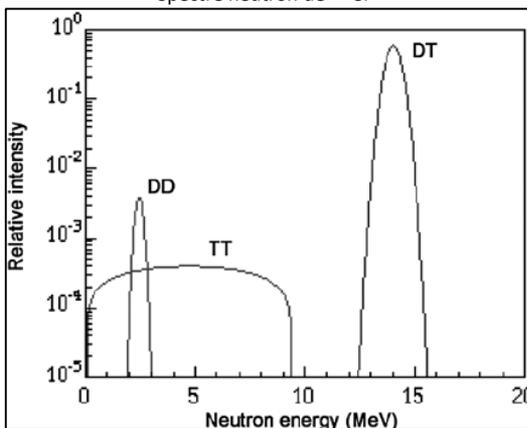
Spectre neutron d'une source AmBe

☐ Sources radioactives

- n ex: ^{252}Cf ($\bar{E} = 2 \text{ MeV}$)
- (α, n) ex: AmBe ($\bar{E} = 4,5 \text{ MeV}$)

☐ Générateurs de neutrons (accélérateurs)

- D-D ($\bar{E} = 2,5 \text{ MeV}$)
- D-T ($\bar{E} = 14,1 \text{ MeV}$)
- Accélérateurs ex: n_toF CERN ($\bar{E} \Rightarrow \text{GeV}$)



Spectres neutron des différents types de générateur

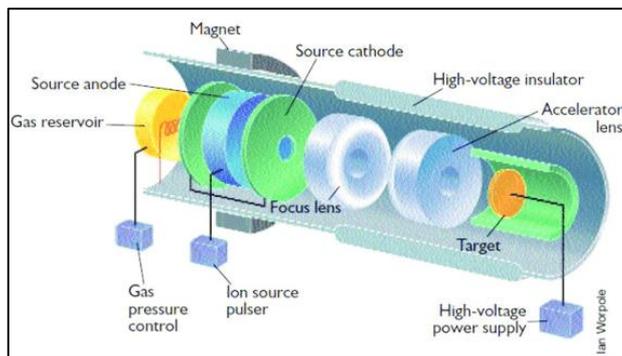


Schéma de la structure interne d'un générateur de neutrons



<https://sodern.com>

GENIE35 (SODERN)

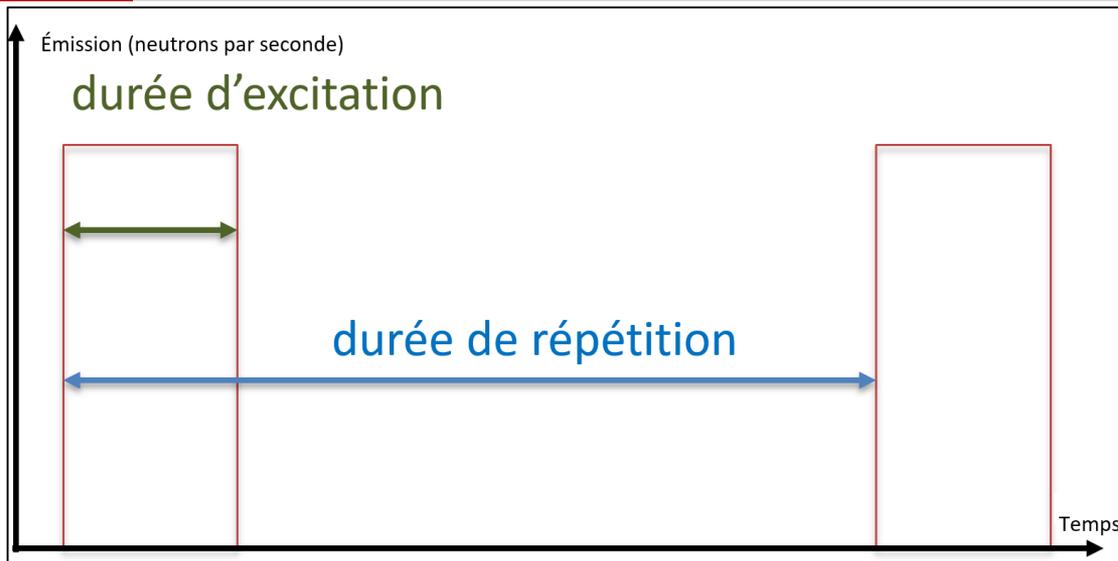


Schéma d'émission neutronique pulsée

$$\text{fréquence (Hz)} = \frac{1}{\text{durée}_{\text{répétition}}}$$

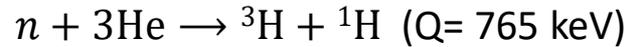
$$\tau_{\text{travail}}(\%) = \frac{\text{durée}_{\text{excitation}}}{\text{durée}_{\text{répétition}}}$$

- ❑ Emissions neutroniques
 - De 10^7 n.s^{-1} à 10^{10} n.s^{-1}
- ❑ Fréquences
 - De quelques Hz à plusieurs kHz
 - Mode émission continue
- ❑ Durée impulsion
 - De quelques μs à continue
- ❑ Durée de vie
 - jusqu'à 8000 h
- ❑ Pas de problème de radioprotection lorsque non utilisé (ON/OFF)

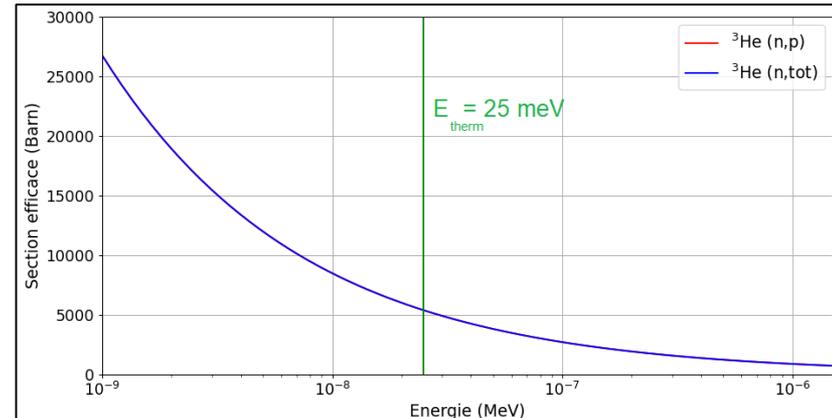
≠ Emission neutronique AmBe (e.g. $10 \text{ Ci} \Leftrightarrow 2,2 \cdot 10^7 \text{ n.s}^{-1}$ en continue)

Compteurs proportionnels à ^3He

- ❑ Les compteurs proportionnels ^3He sont très utilisés pour mesurer les neutrons
- ❑ Compteur peu sensible aux rayons γ
- ❑ Il est plus facile de mesurer des neutrons de **faible énergie** appelés neutrons **thermiques** ($E_{\text{th}} = 25 \text{ meV}$)



- ❑ Il peut être intéressant de mesurer des neutrons non thermalisés ($E_{\text{épith}} = 1,5 \text{ eV}$) appelés **neutrons épithermiques**
 - On filtre les neutrons thermiques incidents en enveloppant le détecteur dans du **cadmium** ou du carbure de **bore** B_4C
 - On peut **thermaliser** après le blindage Cd ou B_4C avec du **polyéthylène** $[\text{CH}_2]_n$

Sections efficaces d'interaction neutronique dans de ^3He

Mesurer la teneur en uranium avec la *Prompt Neutron Fission* (PFN)

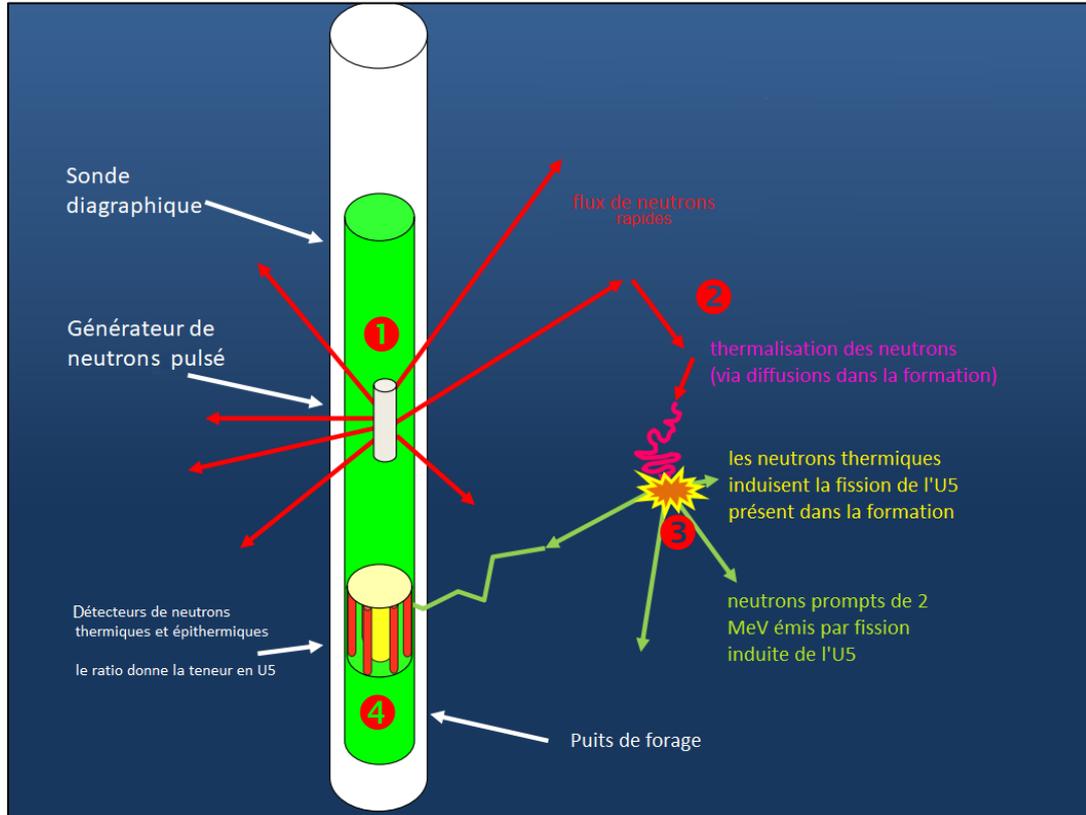
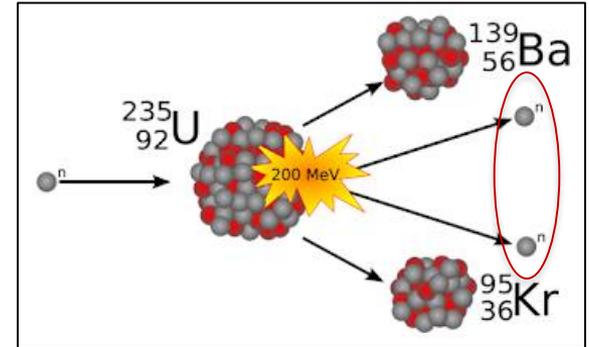
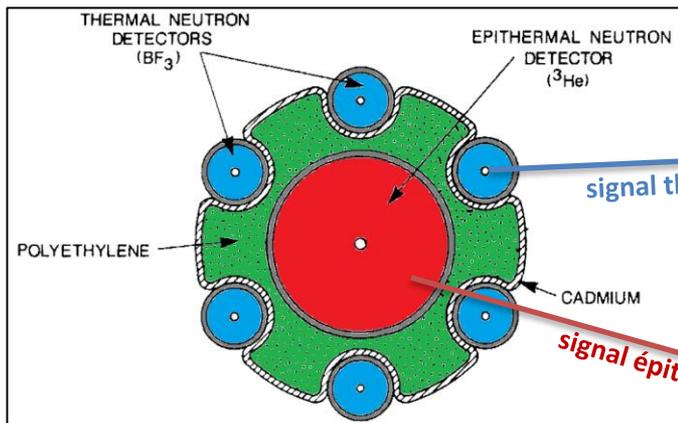


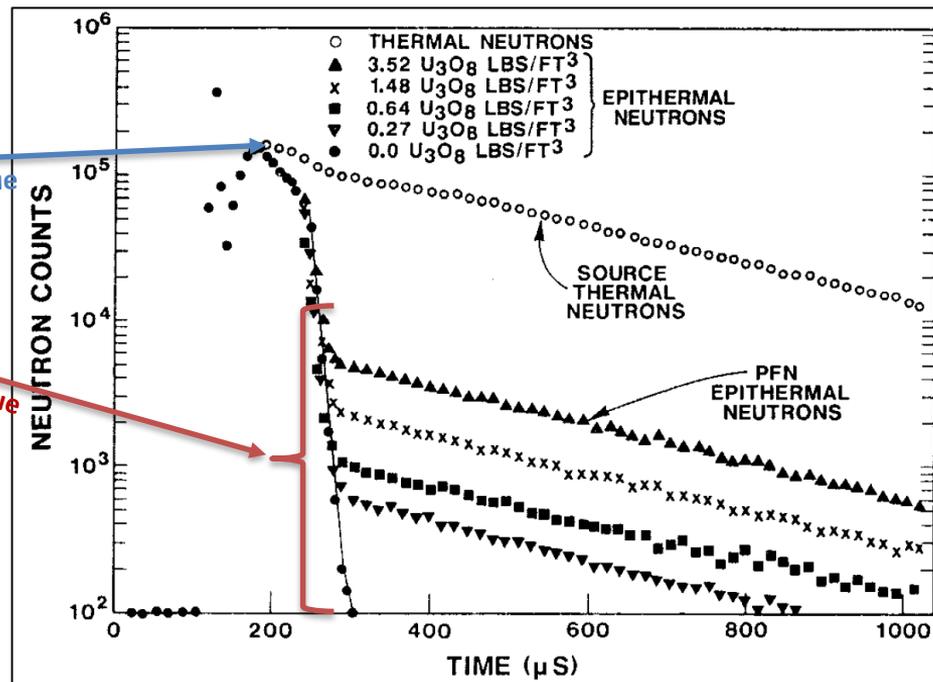
Schéma de fonctionnement d'une sonde PFN – C. Skydmore (2009)

Schéma d'une fission induite de l' ^{235}U

1. Émission d'une **impulsion** de neutrons rapides
2. Les neutrons se thermalisent
3. La fission de l' ^{235}U émet de 2 à 3 neutrons ($\bar{\nu} = 2,4$)
4. Les neutrons (prompts) de fission se thermalisent et peuvent être détectés



Bloc de détection de la PFN logging tools Mobil Research & Development Corporation - W. Givens and D. Stromswold (1989)



Chronogrammes montrant l'évolution des comptages neutroniques après l'impulsion du générateur lors de mesures PFN pour différentes teneur en uranium – H. Bivens (1979)

- Signal thermique $\gg \gg$ signal épithermique
 - Signal épithermique proportionnel à la teneur en uranium
 - Décroissance des 2 signaux fonction de la formation (éléments thermalisants et absorbants neutroniques)
- Teneur en uranium proportionnelle au **rapport des signaux** épithermiques/thermiques (corrections des effets de la formation et des fluctuations d'émission du générateur)

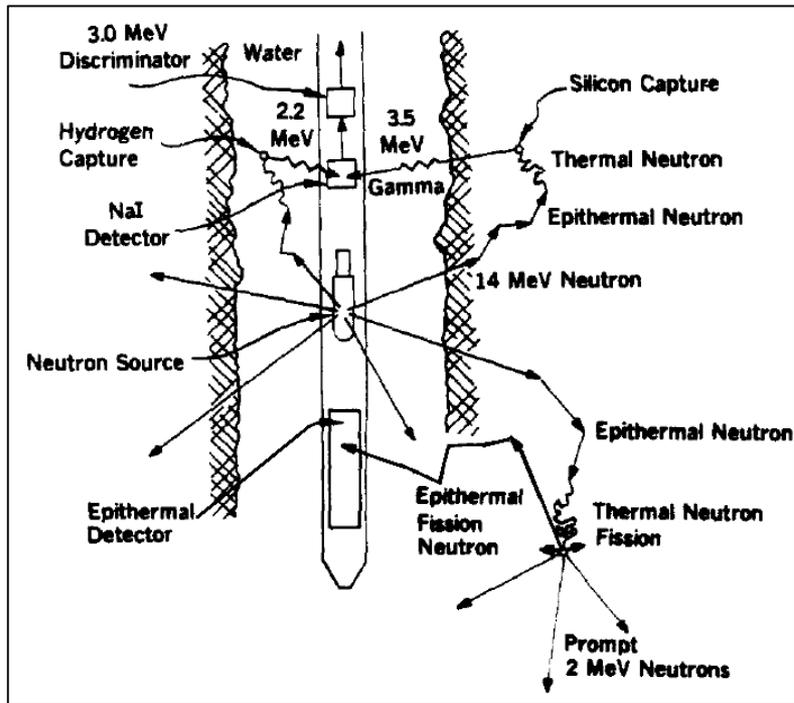
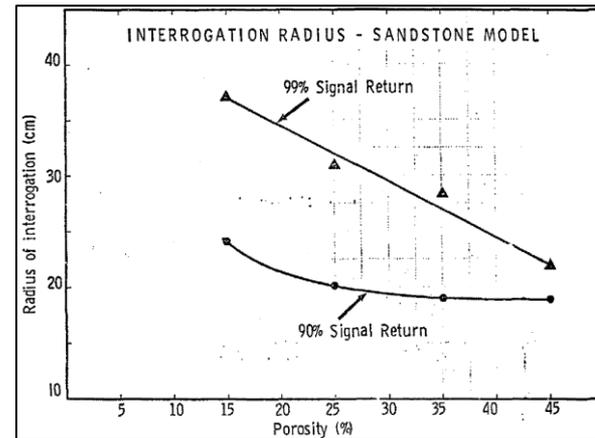


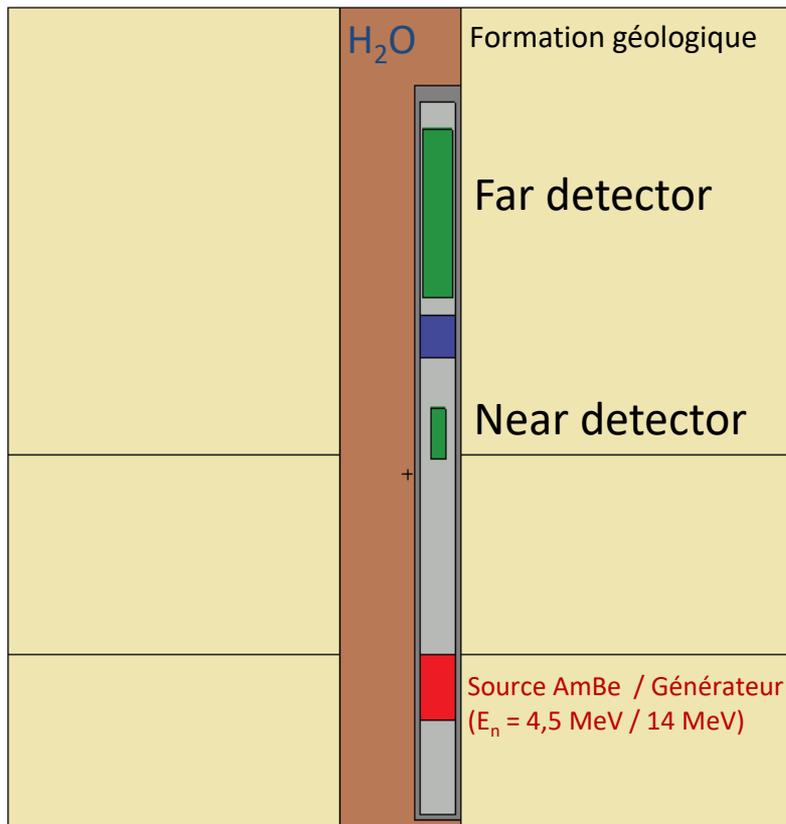
Schéma de fonctionnement de la PFN uranium logging probe – Sandia National Laboratories



Rayon d'interrogation d'une mesure PFN en fonction de la porosité H (puits de 121mm, silice saturée) – H. Bivens

- Profondeur d'interrogation: ~ 40 cm (à faible porosité H)
- Vitesse de mesure: 3 m.min⁻¹
- Bonne limite de détection: < 250 ppm_U
- Méthode indépendante des déséquilibres radiologiques (U/Ra, Ra/Rn...)
- Mesure sensible aux absorbants et thermalisants neutroniques (notamment l'hydrogène => porosité)

Mesurer la porosité hydrogène en rétrodiffusion neutronique (NBS)



Sonde générique de l'université d'Austin (Texas) : Wireline thermal porosity Longhorn tool

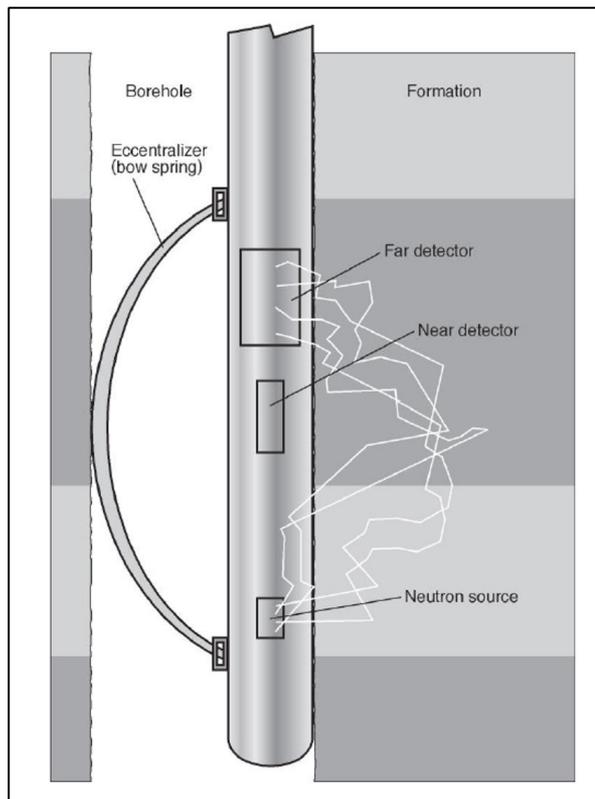
- ❑ La porosité ϕ est la part volumique de matrice non solide
 - On considère ici qu'elle est occupée par de l'eau (formation saturée)

$$\phi = \frac{V_{\text{fluide}}}{V_{\text{solide}}} \quad (1)$$

- ❑ La mesure de la quantité d'hydrogène dans la formation permet de remonter à la porosité hydrogène (*neutron porosity*)
 - Plus il y a d'hydrogène, moins il y a de signal dans le détecteur éloigné par rapport au proche

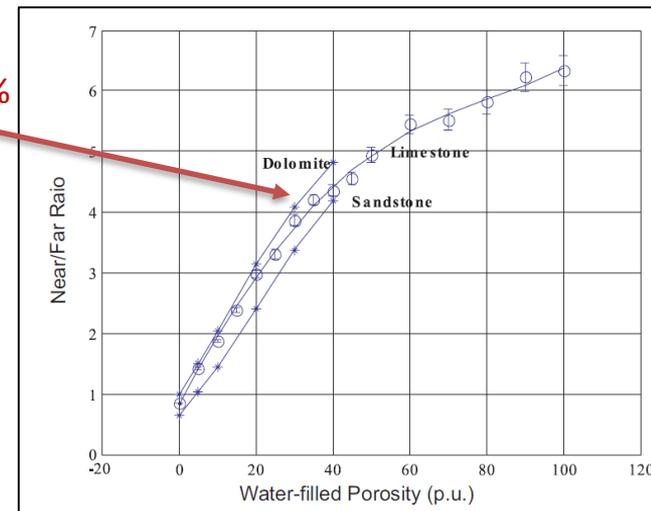
- ❑ La densité de la formation est fonction de la porosité

$$\rho_b = \phi \rho_{mf} + (1 - \phi) \rho_{ma} \quad (2)$$



- ❑ Le rapport des compteurs suit la porosité hydrogène
 - Compense l'effet de la densité
 - Normalise le flux incident (fluctuations du générateur)
 - Compense partiellement la salinité
 - Compense partiellement certains absorbants neutroniques

- ❑ Effet de saturation à partir de 30%
- ❑ Méthode sensible aux variations de diamètre
- ❑ Méthode sensible à l'espacement sonde – paroi du puits
- ❑ Méthode sensible aux tubages



Comparaison des taux de comptage lors d'une mesure de porosité H thermique entre différentes formations pour une sonde générique – D. Ellis (2003)

Principe de fonctionnement de la porosité hydrogène par une sonde diagrapique – D. Ellis (2003)

- ❑ Performances de la sonde APS (Schlumberger)
 - Profondeur d'interrogation: ~ 23 cm (avec porosité ~15pu)
 - Résolution verticale : ~ 35 cm
 - Vitesse de mesure: 8 m.min⁻¹
 - Précision: +/- 7% entre 7 et 30 pu (porosity unit)
- ❑ Possibilité de mesure des absorbants neutroniques (sigma) grâce au train d'impulsions
- ❑ Correspondance expérience-calcul < 7%
- ❑ Les compteurs épithermiques diminuent la sensibilité à la température

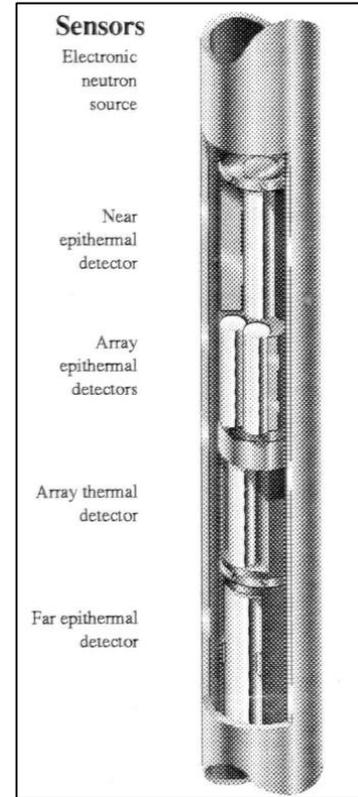


Schéma des blocs de détection de la sonde APS de Schlumberger – H. Scott (1994)

Conclusion

- ❑ Les neutrons permettent d'interroger la matière
 - Mesure de teneur en uranium affranchie des déséquilibres géochimiques
 - Mesure de porosité hydrogène
 - Mesure d'absorbants neutroniques (sondes sigma)
 - Mesures γ induites par neutrons (densité, lithologie)

- ❑ Les générateurs de neutrons pulsés remplacent progressivement les sources radioactives
 - Augmentation de l'émission neutronique
 - Diminution des risques radiologiques (ON/OFF)
 - Techniques d'interrogation pulsée possibles
 - Energie plus importante \Rightarrow meilleur profondeur d'interrogation

- ❑ Sondes diagraphiques neutroniques
 - Rapidité de mesure
 - Mesures complémentaires possibles neutron et gamma

- Neutron Generators for Analytical Purposes, Radiation Technology Reports, Vienna : IAEA, 2012, no. 1.
- ENDF : Evaluated Nuclear Data File, URL : <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>
- C. Skidmore, Borehole Wire-line Logging for Uranium, Sep. 2009.
- W. Givens and D. Stromswold, Prompt fission neutron logging for uranium, Nuclear Geophysics, vol. 3, no. 4, pp. 299307, 1989.
- The University of Texas at Austin et al., « Simulation of Borehole Nuclear Measurements: A Practical Tutorial Guide for Implementation of Monte Carlo Methods and Approximations Based on Flux Sensitivity Functions »
- H. Bivens et al., Direct uranium measurement by the prompt fission neutron method of pulsed neutron borehole logging, United States, 1979, SAND78-2345C.
- D. Humphreys et al., Uranium logging with prompt fission neutrons, The International Journal of Applied Radiation and Isotopes, vol. 34, no. 1, pp. 261268, Jan. 1983.
- D. Ellis, C. Case and J. Chiaramonte, Porosity from neutron logs I : Measurement, Petrophysics, vol. 44, pp. 383395, Nov. 2003.
- H. Scott et al., Response Of A Multidetector Pulsed Neutron Porosity Tool, Juin. 1994, SPWLA-1994-J.