

Traitements post-simulations des réponses MCNPX en spectrométrie neutronique

Jean-Emmanuel Groetz¹, Jean-Claude Steckmeyer²

¹ LCPR-AC (UMR CEA E4) Université de Franche-Comté

² LPC (IN2P3, UMR 6534), ENSICAEN et Université de Caen



1 Présentation

- Les champs neutroniques
- Détection et détecteurs

2 Les compteurs proportionnels

- Principe
- Effets de champ électrique
- Simulation MC et MEF

3 Les scintillateurs liquides

- Principe
- Simulation MCNPX et insuffisances
- Fichiers PTRAC

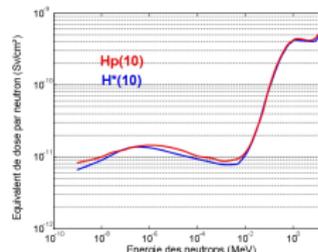
Les champs neutroniques

Liés aux activités humaines :

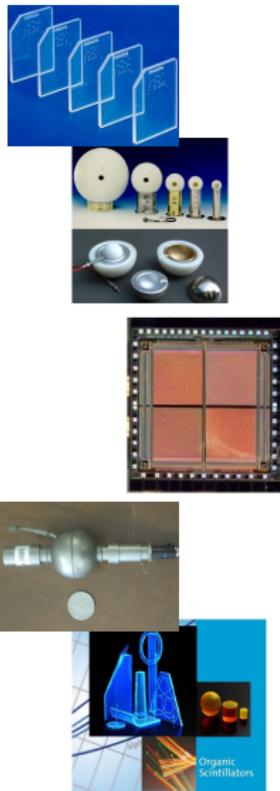
- réacteurs électrogènes
- accélérateurs et réacteurs de recherche
- accélérateurs médicaux
- analyse des matériaux
- applications militaires

Caractéristiques :

- spectres du meV au GeV
- perturbations liées aux photons γ
- variation du coefficient de conversion fluence-dose



Détection et détecteurs



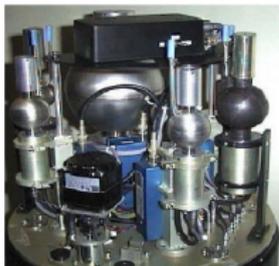
Détection :

- par activation (n, γ)
- par capture (^3He)
- par réaction nucléaire (n, α), (n, f)...
- par diffusion élastique sur H, He, C...

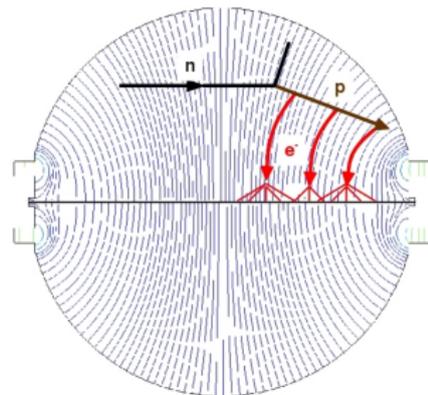
Détecteurs :

- DSTN
- diodes Si, CMOS
- chambres à fission
- **scintillateurs organiques**
- **compteurs proportionnels**

Principe des compteurs proportionnels



- diffusion élastique n-H
- ionisation du gaz par le proton de recul
- dérive des électrons le long des lignes de champ
- avalanche électronique à proximité de l'anode

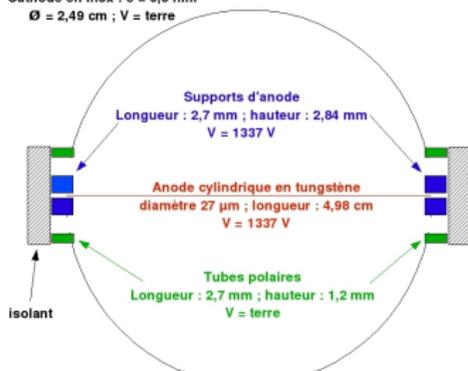


$$\text{Fonction de réponse : } R(E) = \int d^3\vec{r} \int d\vec{\Omega} \int T(E', E' - E, \vec{r}, \vec{\Omega}) dE'$$

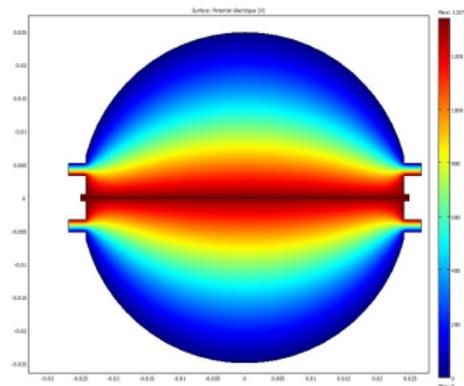
$$T(E', E' - E, \vec{r}, \vec{\Omega}) = \int \underbrace{W(E', E' - E'', \vec{r}, \vec{\Omega})}_{\text{effet de paroi}} \underbrace{V(E', E'' - E, \vec{r}, \vec{\Omega})}_{\text{effet de champ}} dE''$$

Méthode des Éléments Finis

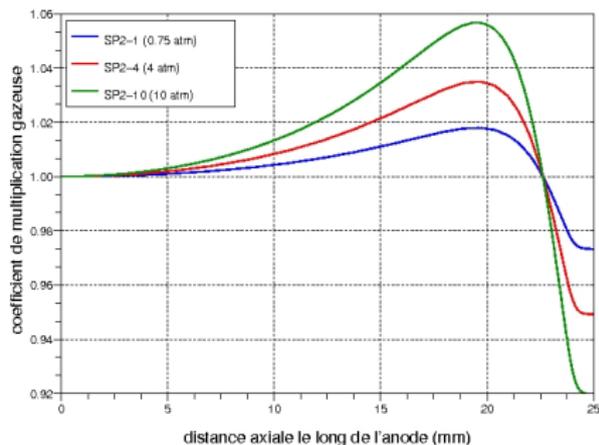
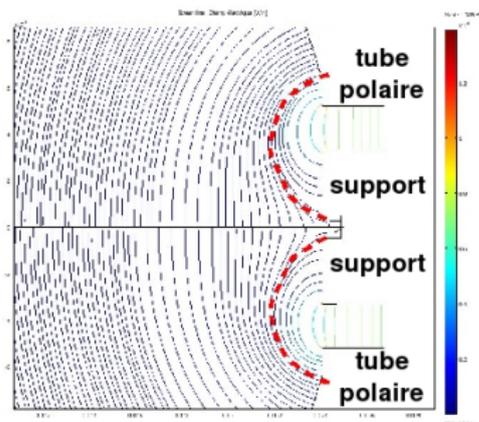
Cathode en inox : $e = 0,5 \text{ mm}$
 $\varnothing = 2,49 \text{ cm}$; $V = \text{terre}$



- Prise en compte du seul volume détecteur (absence des blocs HT...)
- Reproduction des paramètres géométriques : supports d'anode, tubes polaires
- Maillage en triangles raffiné vers les supports d'anode et les tubes polaires
- Résolution de l'équation de Laplace avec conditions aux limites de Dirichlet (en fixant les valeurs de la solution aux frontières)



$$\Delta V = 0$$



Lignes de champ

- détermination géométrique des différentes zones
- définition d'une zone morte

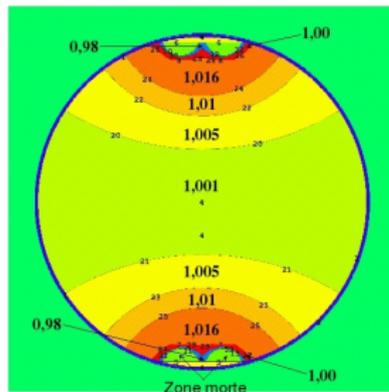
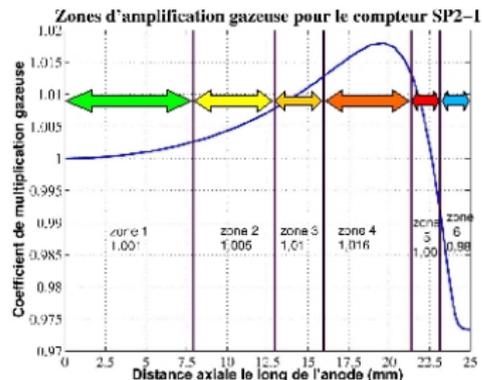
Théorie de Townsend

- Détermination de $\|\vec{E}\|$ le long de l'anode
- Calcul de l'amplification gazeuse

$$\frac{dN}{dr} = -\alpha(r)N$$

$$\text{avec } \alpha(r) = pA \exp\left(\frac{-pB}{E(r)}\right)$$

Calculs Monte-Carlo (MCNPX) et MEF

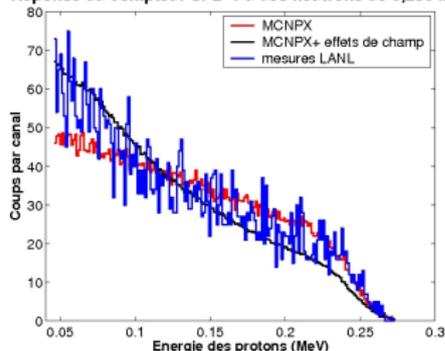


Définition de 11 zones avec des amplifications variables :

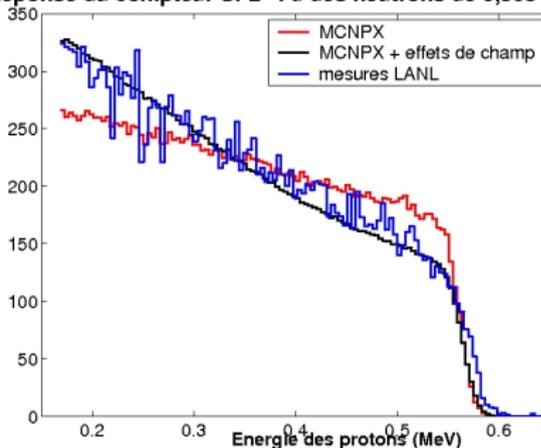
- ① calcul du dépôt d'énergie (dE/dm) des protons de recul dans chaque zone
- ② le dE/dm est pondéré par le coefficient d'amplification correspondant
- ③ le dE/dm corrigé est utilisé pour déterminer le comptage des impulsions dans chaque zone
- ④ le calcul final correspond à la somme des impulsions sur les 11 zones

Fonctions de réponse : résultats

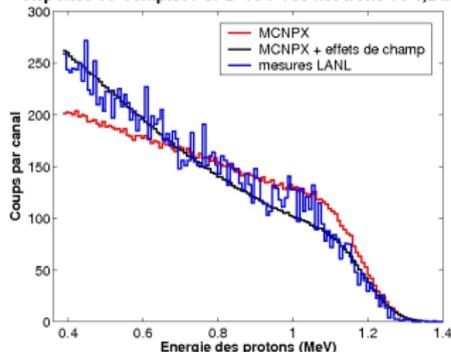
Réponse du compteur SP2-1 à des neutrons de 0,250 MeV



Réponse du compteur SP2-4 à des neutrons de 0,565 MeV

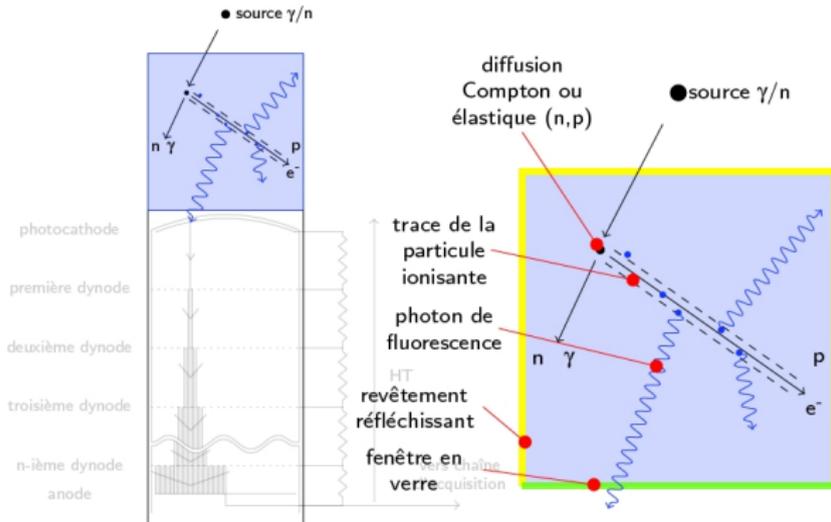


Réponse du compteur SP2-10 à des neutrons de 1,2 MeV



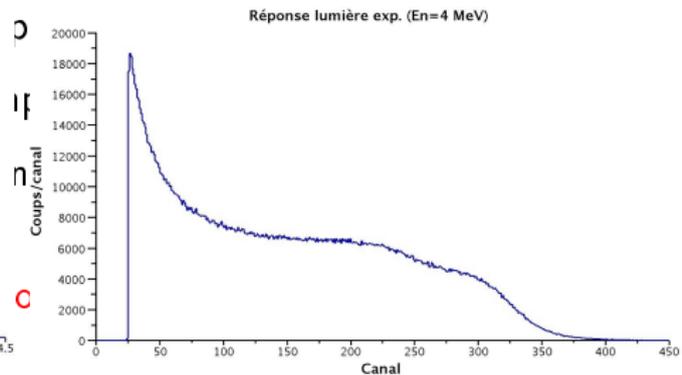
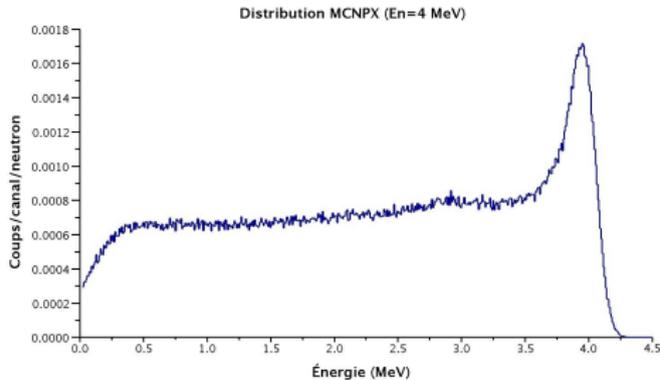
- effet de paroi (en rouge) insuffisant
- effet de paroi + effet de champ électrique (en noir) permettent de retrouver la réponse expérimentale

Principe de la scintillation



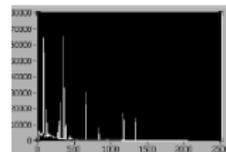
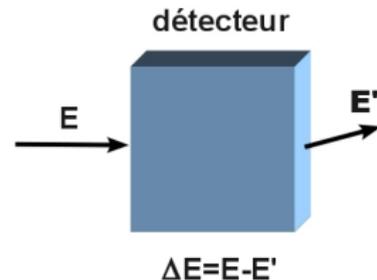
Simulation MCNPX

- Utilisation du comptage type F8:H (protons de recul)
- Combinaison du comptage dépôt d'énergie des protons de recul (F6:H)
- Option FT8 PHL : Pulse Height Light, ce qui permet de convoluer avec la réponse lumière



Comptage *type* détecteur

- différence entre l'énergie entrante et l'énergie sortante dans la cellule d'intérêt
⇒ un coup incrémenté dans le canal ΔE
- si diffusion ou réaction inélastique, la création d'une particule entraîne un $\Delta E < 0$



Cas des détecteurs à protons de recul

- l'interaction a lieu dans la cellule d'intérêt
- le proton de recul est créé dans le détecteur et n'en sort pas
- possibilité de plusieurs séquences de diffusion pour un même neutron en milieu dense
- nécessité de découper ces différentes séquences

Simulation MCNPX : fichier PTRAC

Fichier retraçant l'histoire de chaque neutron :

- source : coordonnées d'émission, énergie, direction
- surfaces traversées par les neutrons
- interactions (collisions, capture...)
- génération de fichiers très volumineux pour 1 million d'histoires : plusieurs Go en ASCII, formatés et lisibles en fortran
- filtrage du fichier pour accéder uniquement aux données recherchées : cellule d'intérêt, type de particules, énergie, particules secondaires (mises en banque)...

Simulation MCNPX : fichier PTRAC

Histoire du neutron n° 3 :

3	1000								
	4000	1	40	1	4	4	0		
	0.00000E+00	-0.20000E+03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.10000E+01	0.00000E+00	0.26309E+01	0.00000E+00	
	4000	6	1001	-2	1	1	2	1	
	0.00000E+00	0.31671E+01	0.00000E+00	-0.42397E+00	0.81344E+00	-0.39820E+00	0.17400E+01	0.90749E+01	
	4000	7	1001	-2	1	1	2	2	
	-0.52241E+00	0.41694E+01	-0.49066E+00	0.10504E+00	0.30483E+00	-0.94660E+00	0.58571E+00	0.91425E+01	
	9000	8	1001	2	1	1	2	3	
	-0.31721E+00	0.47649E+01	-0.23399E+01	-0.86750E+00	-0.90969E-01	-0.48905E+00	0.69431E-01	0.93272E+01	

Histoire du neutron n° 3 et des protons de recul générés :

3	2032	1							
	2030	8	0	0	1	1	2	2	
	-0.52241E+00	0.41694E+01	-0.49066E+00	0.10504E+00	0.30483E+00	-0.94660E+00	0.58571E+00	0.91425E+01	
	2034	9	1001	-99	9	1	2	0	
	-0.31721E+00	0.47649E+01	-0.23399E+01	0.43010E+00	0.35783E+00	-0.82884E+00	0.51627E+00	0.93272E+01	
	2034	7	0	0	9	1	2	2	
	-0.52241E+00	0.41694E+01	-0.49066E+00	-0.59542E+00	0.78177E+00	0.18521E+00	0.11543E+01	0.91425E+01	
	9000	6	0	0	9	1	2	1	
	0.00000E+00	0.31671E+01	0.00000E+00	0.59265E+00	0.58218E+00	0.55663E+00	0.89089E+00	0.90749E+01	

x

y

z

u

v

w

énergie

temps

position

direction

(MeV)

(10⁻⁸ s)

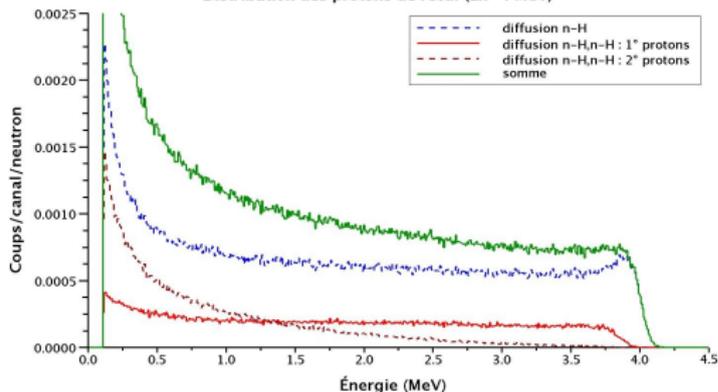
Simulation MCNPX : fichier PTRAC

Écriture d'un programme en fortran 90 permettant de lire les fichiers PTRAC

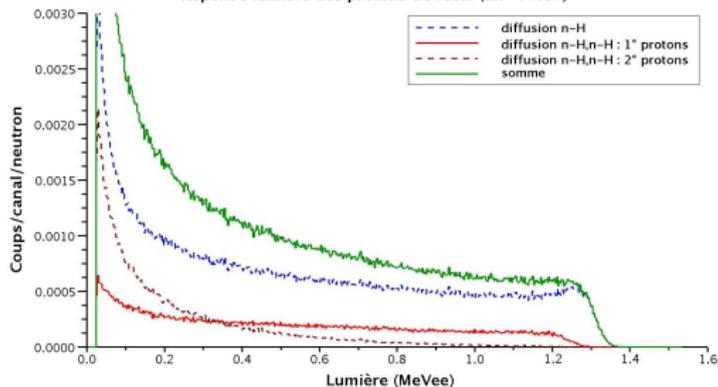
- découpage des séquences de diffusion élastique neutron-proton :
 - ▷ (n-H)
 - ▷ (n-H),(n-H)
 - ▷ (n-H),(n-H),(n,H)
 - ▷ (n-H),(n-H),(n-H),(n-H)
- séquences de diffusion neutron-carbone avec énergie déposée par les carbones de recul
- prise en compte du facteur temporel entre les protons d'une double diffusion

Simulation MCNPX : fichier PTRAC

Distribution des protons de recul ($E_n=4$ MeV)



Réponse lumière des protons de recul ($E_n=4$ MeV)



Conclusion

Milieux dilués et champ électrique

- Une seule interaction n-H par neutron
- Simulation MCNPX et comptage *détecteur* justes
- Nécessité de compléter la simulation pour les effets d'amplification gazeuse
- Utilisation de la méthode des éléments finis

Milieux denses

- Multiplicité des séquences de diffusion n-H pour $E < 5$ MeV
- Simulation MCNPX OK mais comptage *détecteur* erroné
- Nécessité d'extraire les informations du fichier PTRAC pour correction
- Faire remonter ce problème aux développeurs MCNPX