PARIS, LE 26/03/2014

Dimensionnement et optimisation des protections hétérogènes de forte épaisseur avec le code Monte-Carlo MCNP5

Mattera Christophe

Une société de VINCI ENERGIES

Outils de calculs CEGELEC pour les études de radioprotection

La cellule CRISTEA de CEGELEC réalise des Etudes & Expertises en radioprotection pour les clients EDF, CEA, AREVA, ITER avec les outils de calcul :

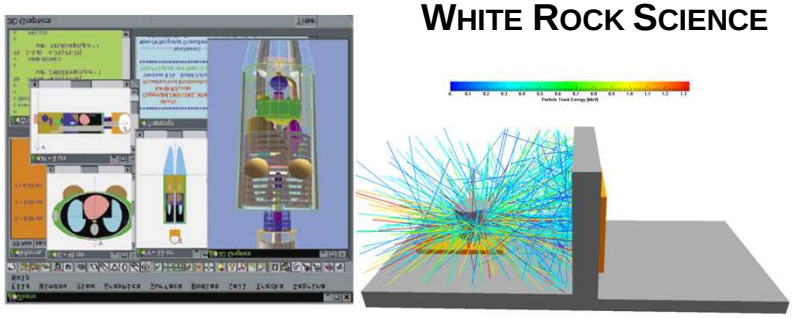
MCNP

Los Alamos NATIONAL LABORATORY EST. 1943

- ✓Code de transport Monte-Carlo 3D
- ✓Données nucléaires ENDF/B6
- ✓Référence internationale
- ✓Large domaine de qualification

MORITZ

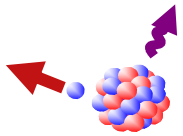
WHITE ROCK SCIENCE



- ✓IHM 3D pour MCNP
- ✓Visualisation & Création
- ✓Post-traitement

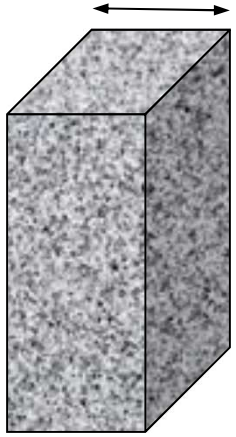
SFRP Cegelec

Problème des fortes épaisseurs radiologiques hétérogènes

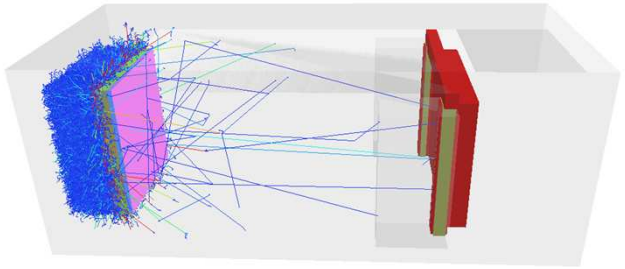


Source avec haute énergie d'émission des particules

Forte épaisseur

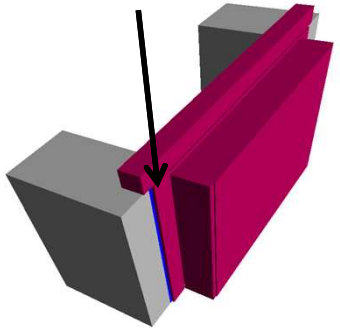


&



Exemple : Photon 10 MeV issu de l'activation par neutron 14 MeV

Hétérogénéités de blindage (Montants, seuil de porte…)

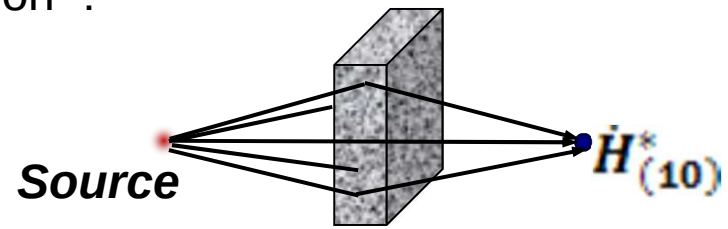


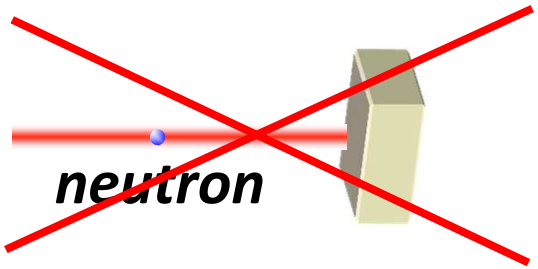
Limites des codes d'atténuation en ligne droite

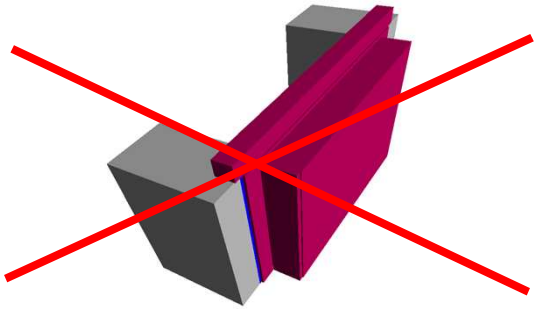
Certains codes utilisent la méthode d'atténuation en ligne droite avec prise en compte des facteurs d'accumulation :

✓MICROSHIELD

✓MERCURE …







Utilisation de la méthode de Monte-Carlo

Résolution de l'équation de Boltzman par la méthode de Monte-Carlo

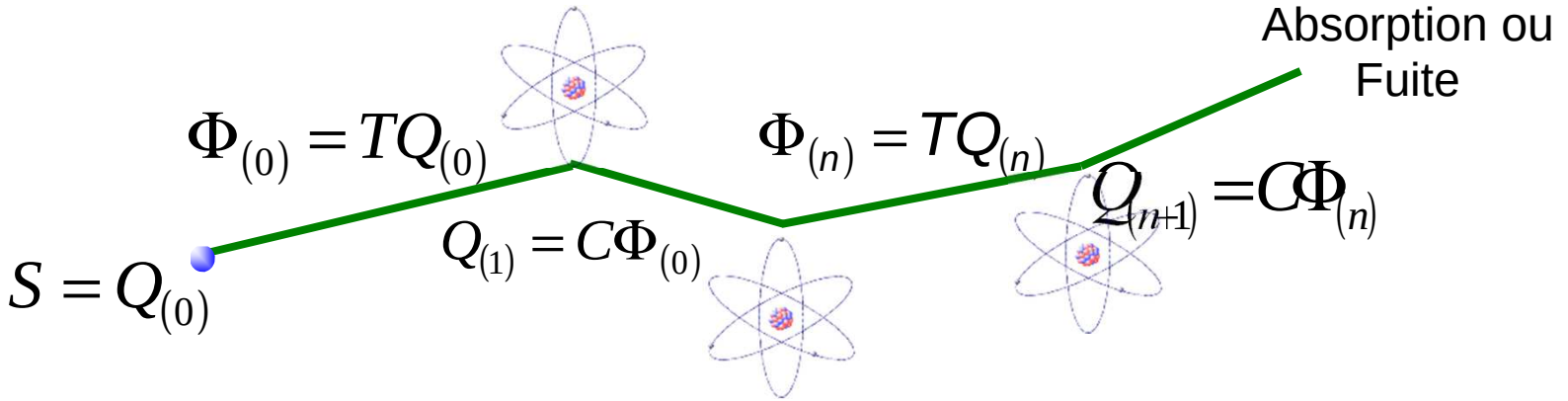
Méthode de Monte-Carlo : Résolution de l'équation de Boltzman sous sa forme intégrale

$$\Phi = T \int Q$$

Noyau transport
Parcours optique $e^{-\int_M^A \Sigma_t(\vec{r},E,\vec{\Omega})dL}$

Densité d'émission
$Q = C\Phi + S$

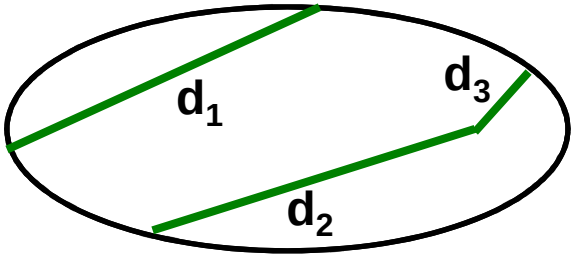
C : opérateur de collision (Diffusion)



Description « exacte » des parcours et des collisions d'une particule en 3D !

Résolution de l'équation de Boltzman par la méthode de Monte-Carlo

Simulation analogue d'un très grand nombre de particules (loi des grands nombres) pour estimer le flux dans chaque région de l'espace ou cellule



Cellule en 3D

Estimateur corde

$$\frac{1}{Vcellule}\sum_{\substack{Toutes\ particules\\ dans\ la\\ la\ \ cellule}} d_j \rightarrow \Phi \rightarrow H^*_{(10)} \rightarrow \dot{H}^*_{(10)}$$

Coefficients CIPR74

S : Nombre de particules émises par seconde

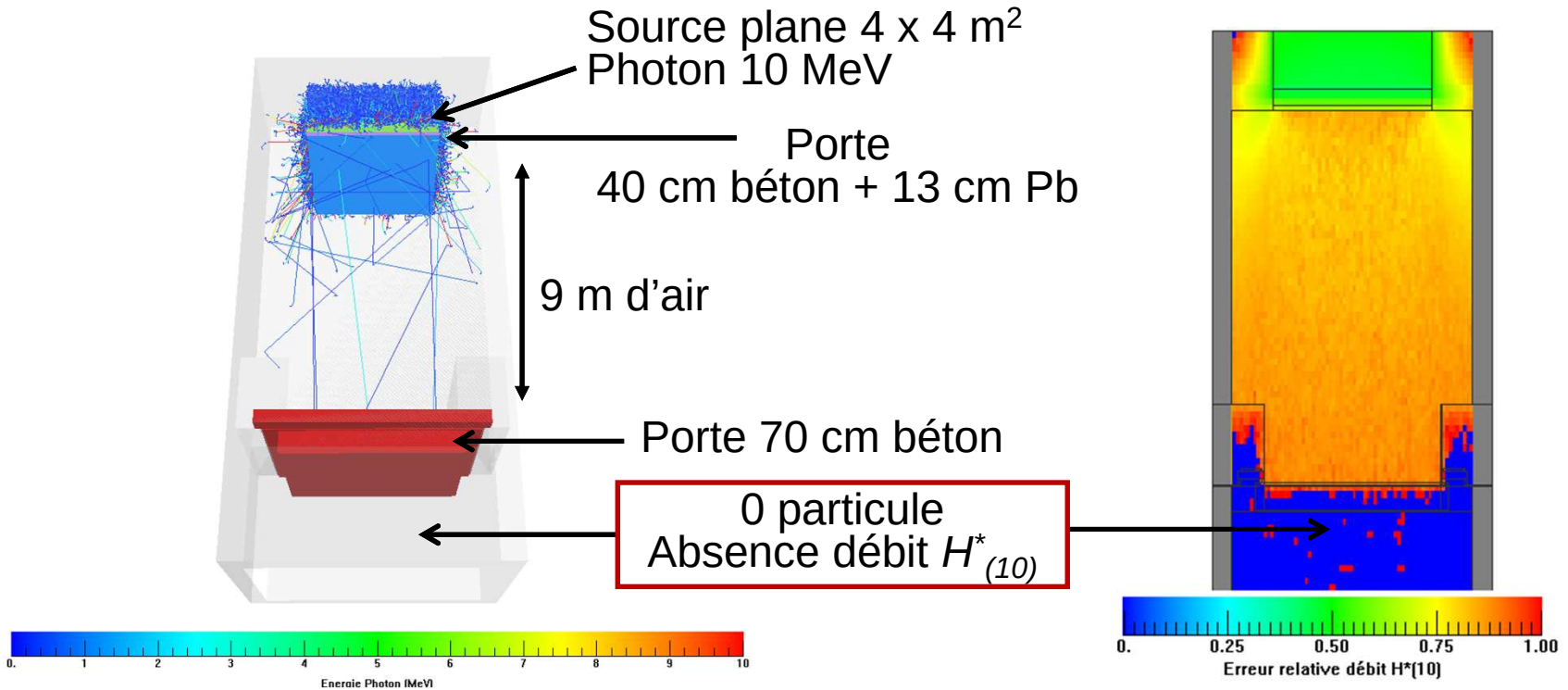
Simulation biaisée

$$\frac{1}{PoidsTotal \times V}\sum_{\substack{Toutes\ particules\\ dans\ la\\ la\ cellule}} d_j \cdot poids_j$$

Limite de la méthode de Monte-Carlo pour les fortes épaisseurs

Exemple de limite de la méthode de Monte-Carlo

Simulation MCNP5 : 700 million de photons - Temps de calcul : 54 heures



Il faudrait plusieurs mois de calcul pour obtenir une valeur de débit *H*(10)* avec une incertitude satisfaisante !

Simulation biaisée

Simulation biaisée : Modification artificielle des lois de la physique pour favoriser la visite des particules dans certaines régions de l'espace tout en restant maître du facteur correctif nécessaire pour compenser ce qui a été ainsi faussé

La simulation biaisée donne des résultats similaires à une simulation analogue

MCNP a 14 techniques de réduction de variance

Les plus utilisées et les plus faciles à mettre en œuvre sont :

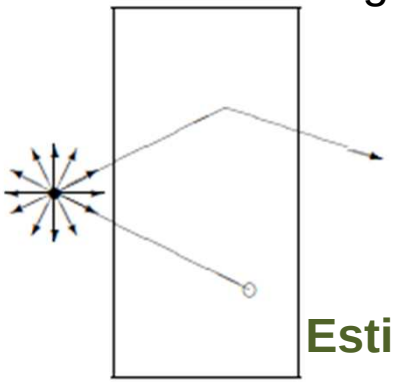
- Méthode d'échantillonnage modifié : Biaisage de la source et transformation exponentielle
- Méthode de contrôle de la population : Découpage de la géométrie avec roulette russe, fenêtre de pondération

Les méthodes de troncation (simplification géométrie, coupure en énergie) & les méthodes partiellement déterministes (DXTRAN) ne sont pas utilisées car peuvent conduire à des résultats erronés

Biaisage de la source

Exemple : transmission de particules au travers d'une paroi

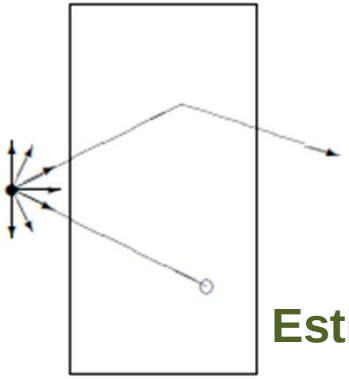
Source réelle isotrope
Simulation analogue



Estimation Φ

« Gaspillage » de la ½ des particules simulées

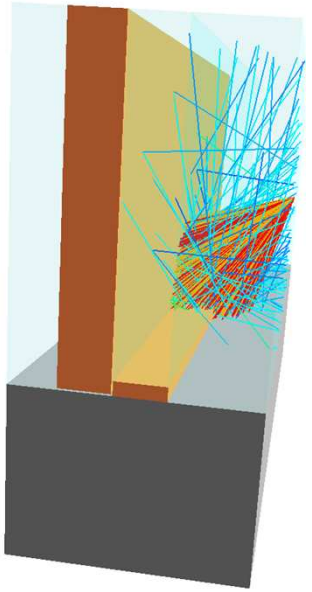
Source biaisée



Estimation Φ

2 fois plus de particules

Poids des particules ajusté à 0,5 par MCNP pour retrouver les résultats de la simulation analogue

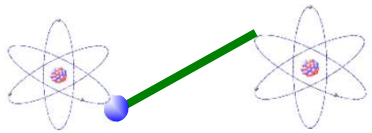


Cône d'émission
Portes d'une cellule blindée du LIDEC - EDF CIDEN

Transformation exponentielle

Simulation analogue

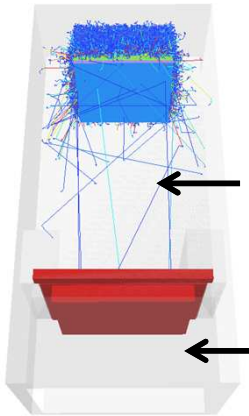
$$e^{-\int_M^A \Sigma_t(\vec{r},E,\vec{\Omega})dL}$$



Transformation exponentielle

$$e^{-\int_M^A \Sigma_t^*(\vec{r},E,\vec{\Omega})dL} \quad \Sigma_t^* = \Sigma_t(1-p\mu)$$

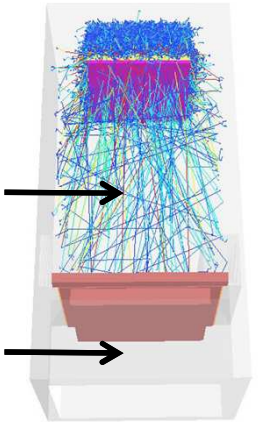
Simulation 1 million de particules



Après 40 cm béton + 13 cm Pb

1500 particules

6000 particules



Après 70 cm béton

0 particule

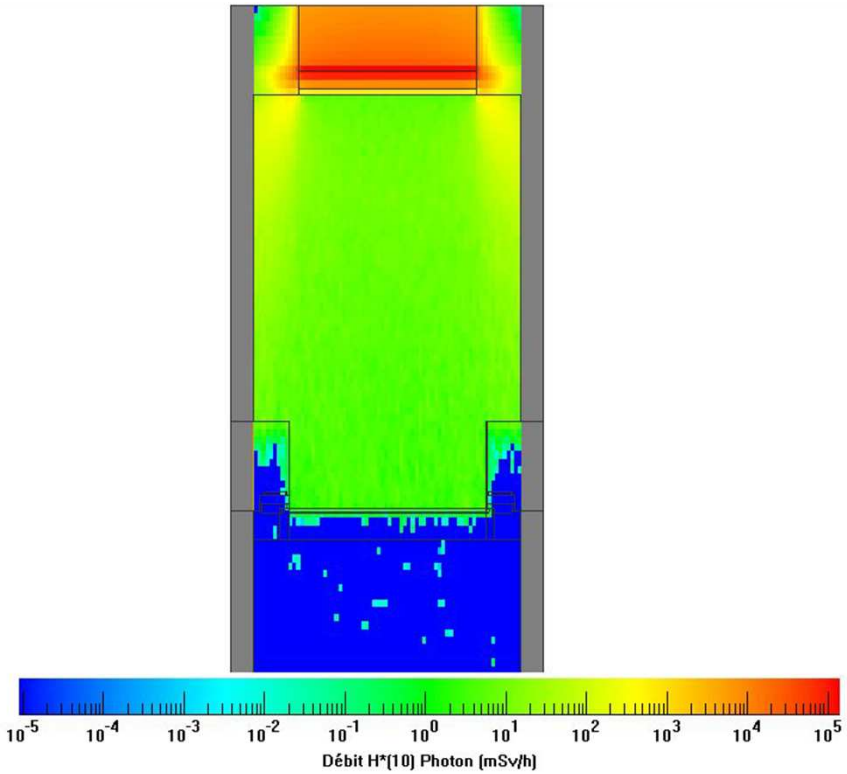
10 particules

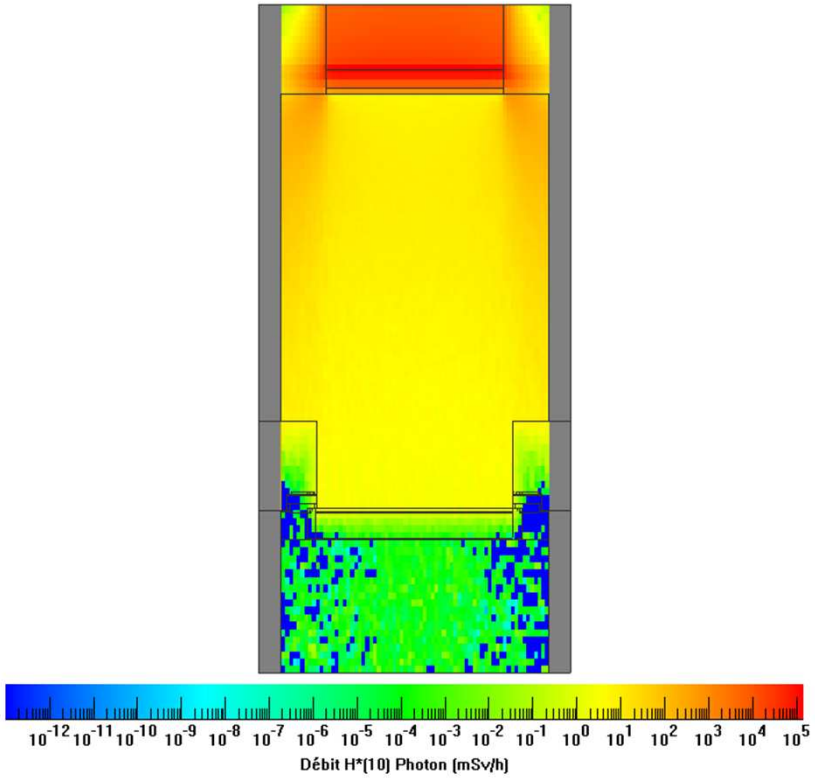
SFRP Cegelec

Transformation exponentielle

Simulation analogue	Transformation exponentielle

900 million de photon – Temps de Calcul 55 heures

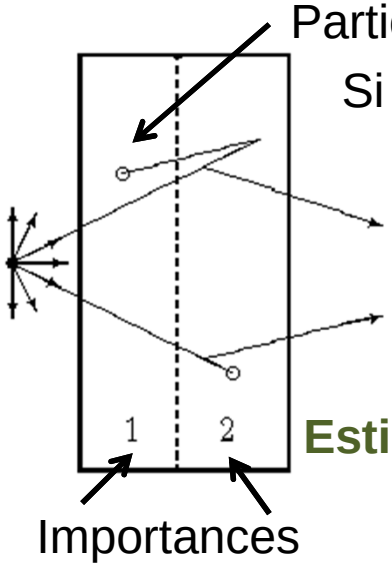




Découpage de la géométrie avec roulette russe

Découpage géométrique & roulette russe (Splitting & Russian roulette) :
la plus ancienne & la plus utilisée

Exemple : transmission de particules au travers d'une paroi



Importances

Particule « tuée » avec une probabilité de 0,5

Si particule est vivante, poids 2 afin de conserver la simulation non biaisée

Division en 2 particules de poids 0,5 de même énergie

Estimation Φ

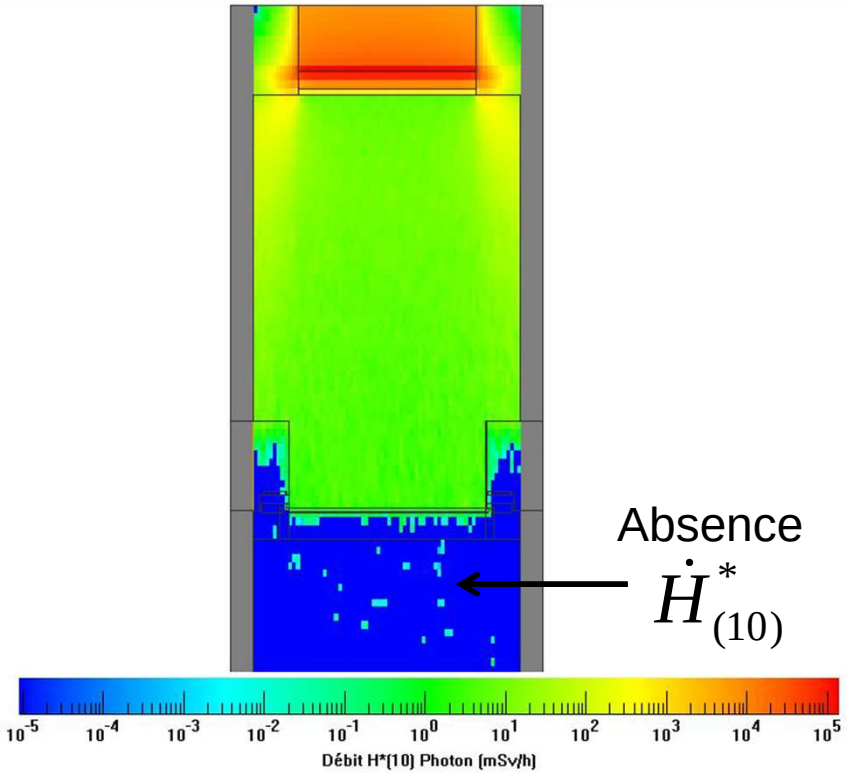
$\downarrow \sigma$

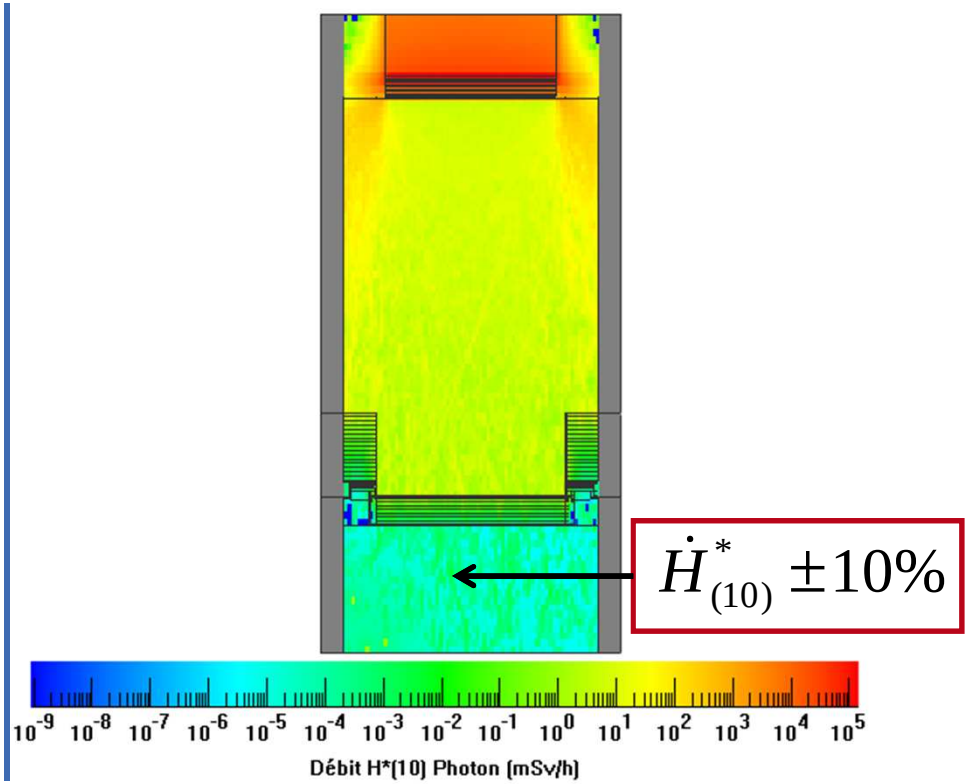
Méthode longue à mettre en œuvre
permet un gain de temps considérable

Découpage de la géométrie avec roulette russe

Simulation analogue	Découpage & roulette russe

900 million de photon – Temps de Calcul 55 heures



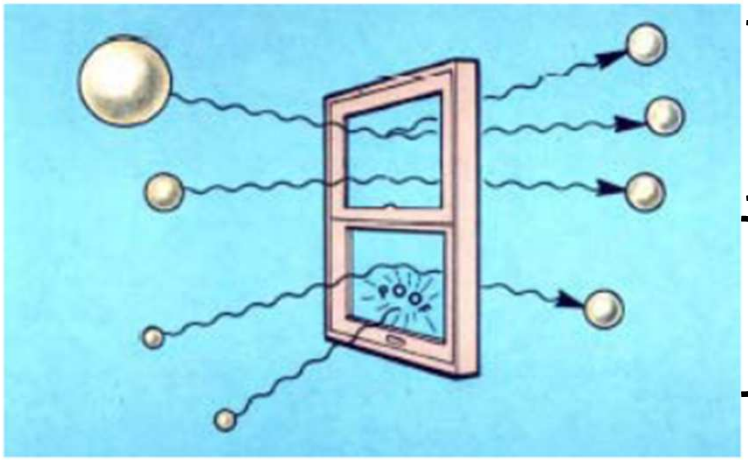


SFRP Cegelec

Fenêtre de pondération (Weight Windows)

La technique de fenêtre de pondération ajuste les poids des particules quand elles changent d'énergie et traversent les cellules

Chaque cellule affectée d'une limite haute et basse de poids (fenêtre)



Si particule entrant ou créée dans la cellule
poids > poids haut limite
alors divisée en particules de poids compris dans la fenêtre

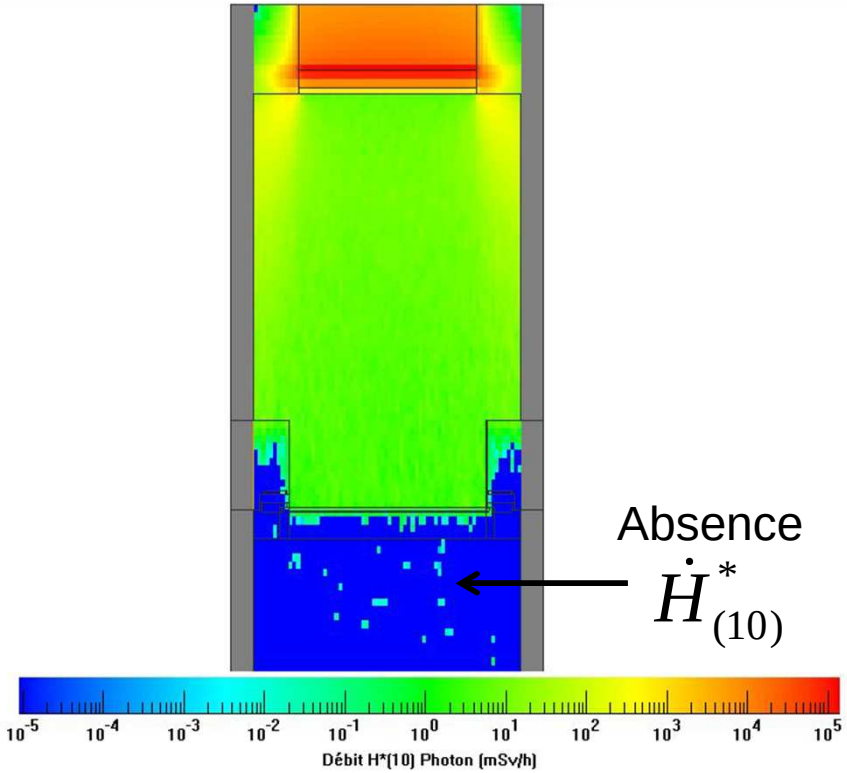
Si particule entrant ou créée dans la cellule
poids < poids bas limite
Alors ↑ poids jusqu'au poids compris dans la fenêtre ou tuée

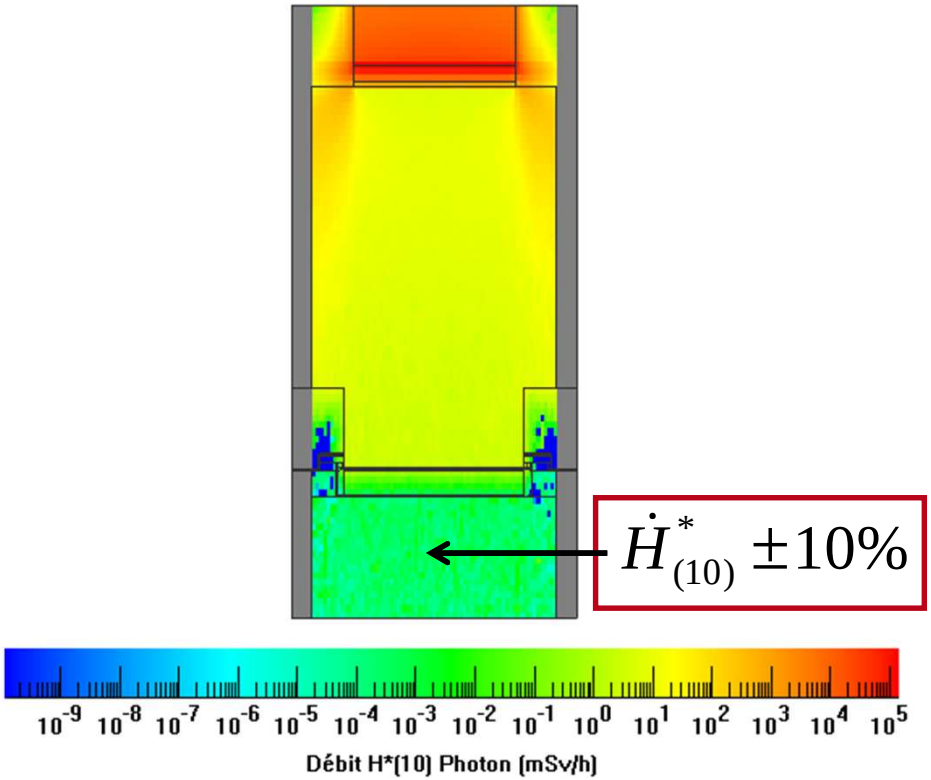
Même si MCNP5 propose un générateur automatique,
la méthode est complexe à mettre en œuvre
Mais permet un gain de temps considérable

Fenêtre de pondération

Simulation analogue	Fenêtre de pondération

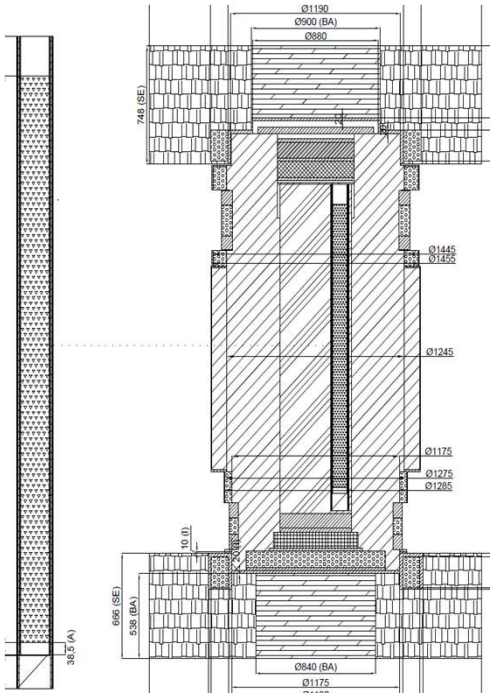
900 million de photon – Temps de Calcul 55 heures





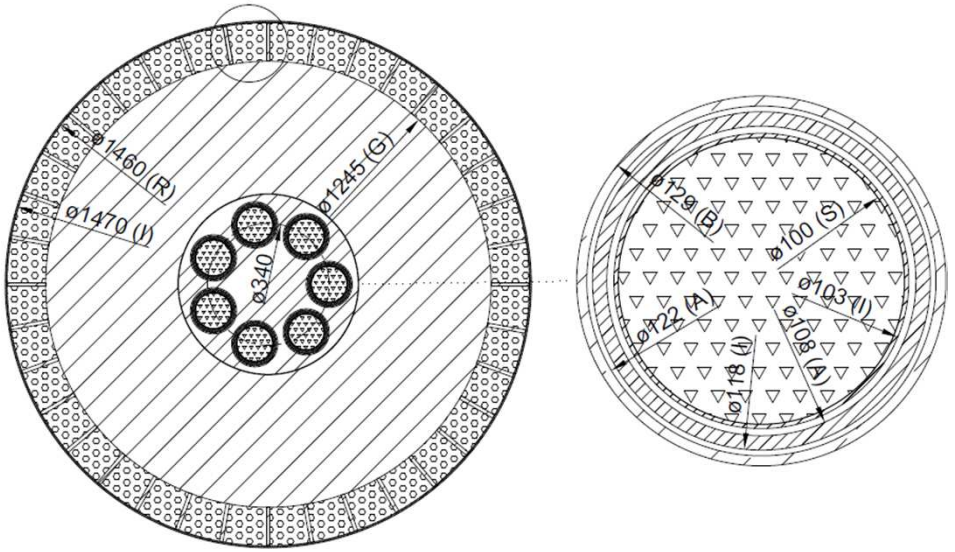
Exemples d'application des méthodes de réduction de variance

Exemple de l'emballage CEA IR500 muni d'étuis AA194 chargés de 109 aiguilles PHENIX fissiles irradiées à 150 GWj/tML refroidies 3 ans en CTR



Modèles MCNP5

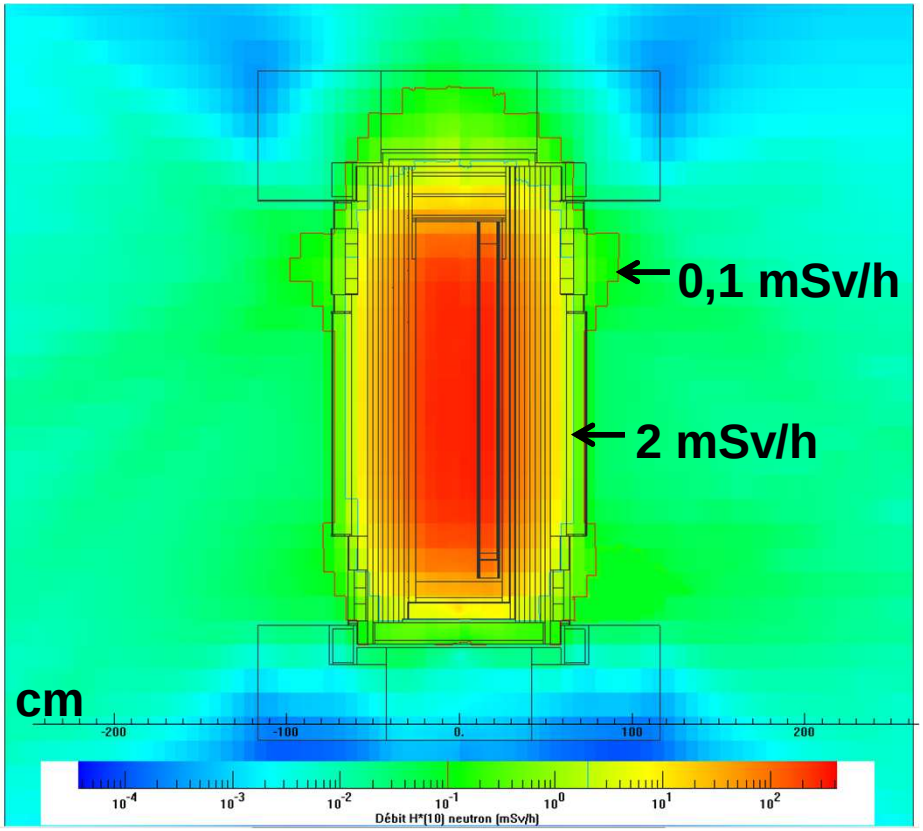
Protection IR500 : 37 cm acier -10,5 cm résine



Impossibilité à traiter dans des temps de calcul raisonnable sans la simulation biaisée !

Exemples d'application des méthodes de réduction de variance

Technique du découpage géométrique avec roulette russe



80 heures de calcul

Cartographie de DED ambiant

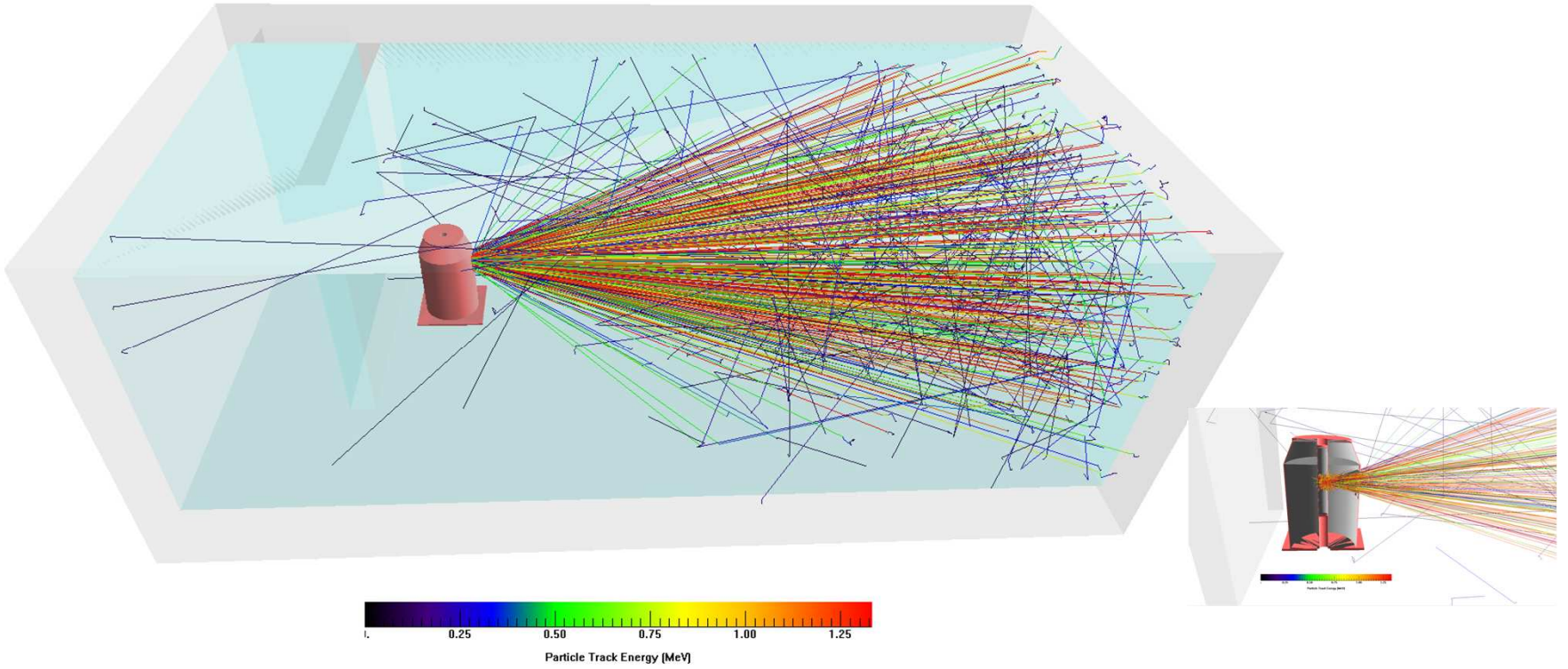
$$\dot{H}^{*}_{(10)} \pm 7\% \quad neutron$$

Exemple de l'emballage
CEA IR500
Protection IR500 : 37 cm acier
10,5 cm résine

Exemples d’application des méthodes de réduction de variance

Exemple irradiateur IRDI4000 CEGELEC NDT PES

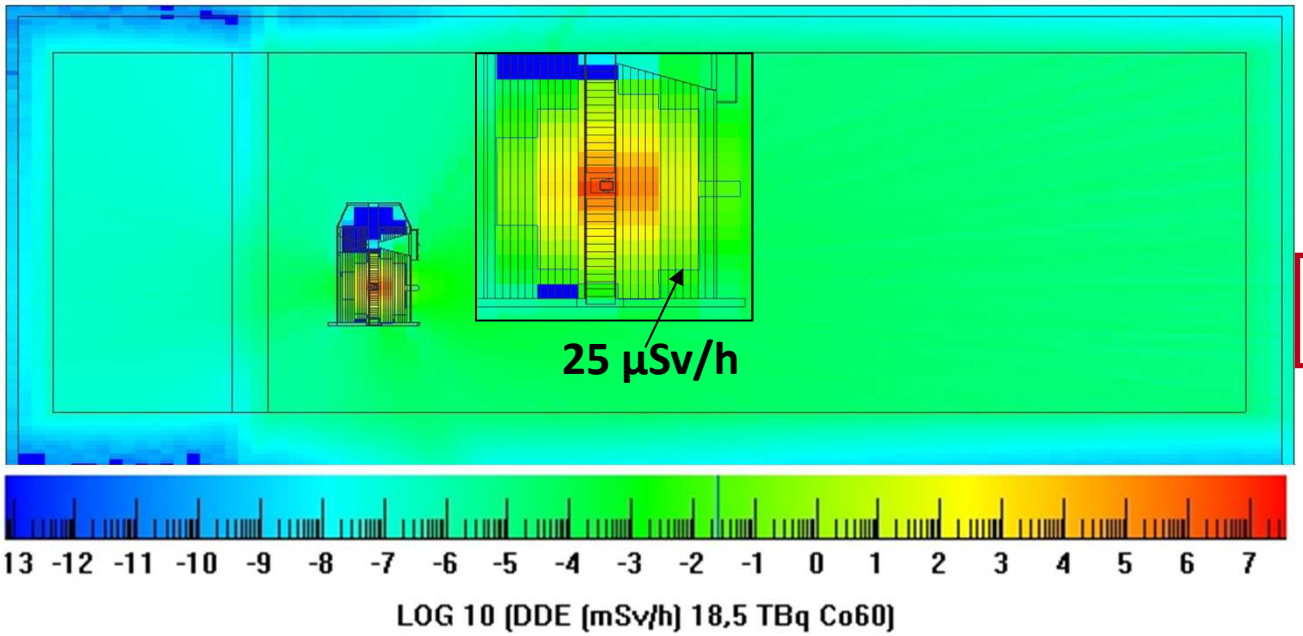
Source 18,5 TBq ^{60}Co en position d’irradiation



Exemples d'application des méthodes de réduction de variance

Source 18,5 TBq ^{60}Co en position de stockage
Protection IRDI4000 : 27 cm Pb

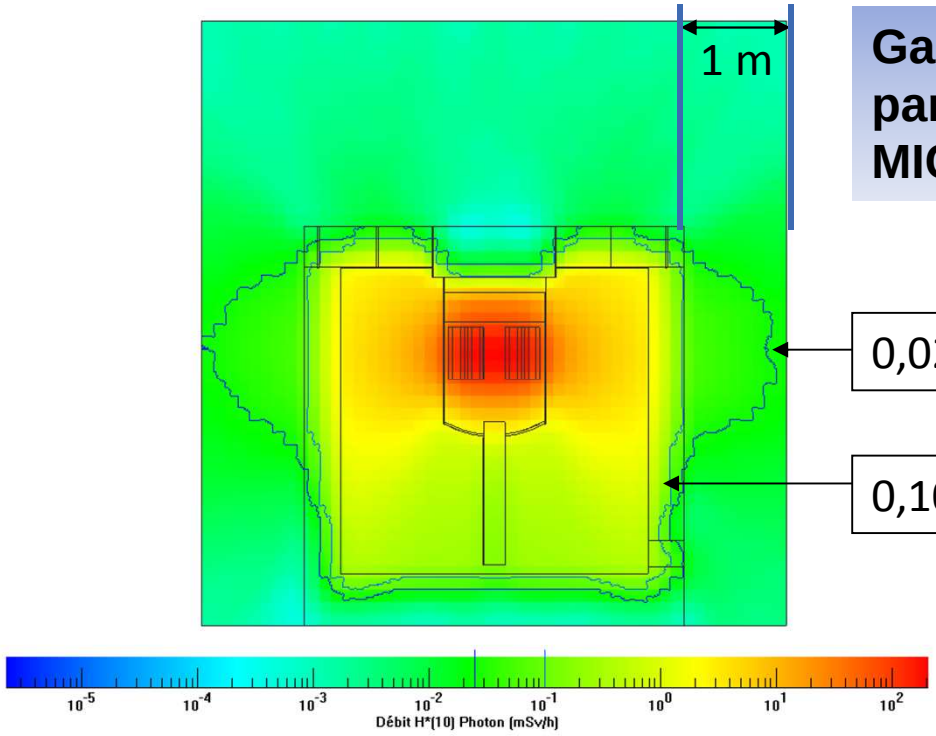
Technique du découpage géométrique avec roulette russe



$$\dot{H}^{*}_{(10)} \pm 8\% \quad photon$$

Conception et optimisation des protections radiologiques

Optimisation des murs casemate Unité Filtration et Purification (pendant le démantèlement du caisson BUGEY sous eau) EDF CIDEN



Gain de 110 t d'acier et 57 t de béton par rapport au prédimensionnement MICROSHIELD

Cartographie de DED ambiant *H*(10)* photon
Source ^{60}Co 61 GBq

Conclusion

- Traitement de TOUS les problèmes de protection dans des temps de calcul raisonnable
- Conception et optimisation des protections de faible ou de forte épaisseur homogènes ou hétérogènes avec une exacte précision