

Mise en œuvre de la réduction de la variance dans le code TRIPOLI-4® pour le calcul de débit d'équivalent de dose d'un emballage de transport

Alice BONIN

ISAS/DM2S/SERMA

7^{ème} Journées SFRP Codes de calcul

9-10 mars 2023

1. Description de la problématique

2. Méthodes de réduction de la variance

3. Résultats





Contexte

- Calculs de radioprotection pour le transport d'assemblages neufs et usés : calcul de DED au contact et à 2 m pour différents types de combustibles chargés dans différents types d'emballage.
- Pour cette étude:
 - **Assemblages usés** transportés :
 - UOX enrichissement standard
 - BU moyen à la décharge 50 GWj/t
 - refroidis 5 ans après déchargement
 - **Emballage de transport** de type TN12

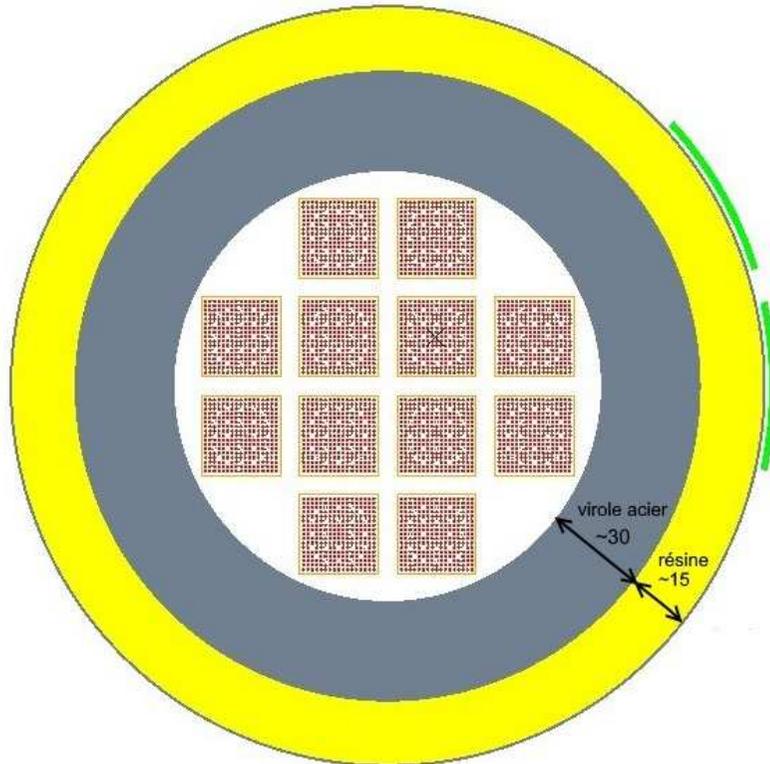
Taniuchi, H., & Matsuda, F. (1999). Dose rate measurements and calculation of TN-12/2 packages. Nuclear technology, 127(1), 88-101



1 ■ Description de la problématique



Modélisation de l'emballage de transport



Coupe obtenue avec le visualiseur de TRIPOLI-4®

- Dimensions exprimées en cm

- Volumes d'encaissement (en vert) au contact (2 cm), à 0° et 30° par rapport à l'horizontale

12 assemblages **usés**

Calcul du **débit d'équivalent de dose** (DED) avec TRIPOLI-4® en plusieurs points

➤ à 2 m de l'emballage

But :

Vérifier que le DED reste bien **inférieur** aux **limites réglementaires** en vigueur

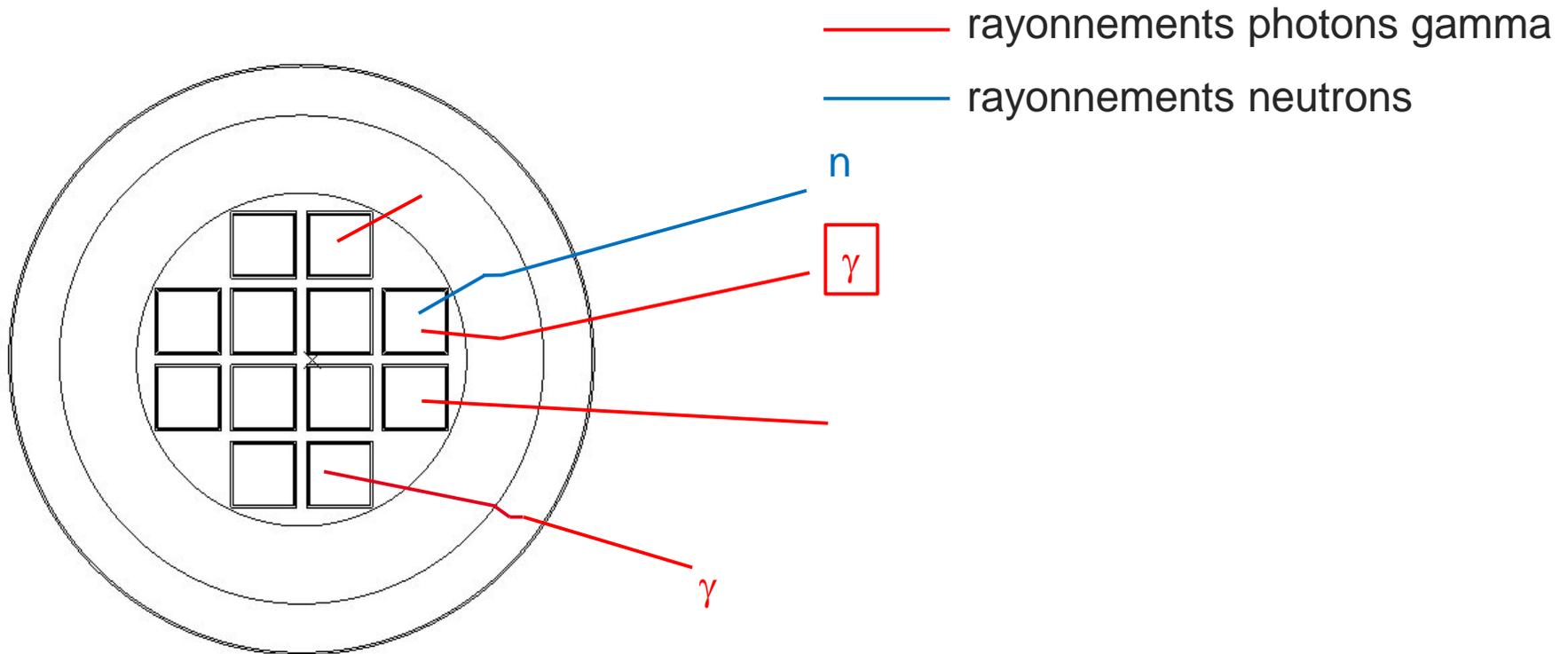
➤ 100 microSv.h⁻¹ à 2 m

E. Brun, F. Damian, C.M. Diop, E. Dumonteil, F.X. Hugot, C. Jouanne, Y.K. Lee, F. Malvagi, A. Mazzolo, O. Petit, J.C. Trama, T. Visonneau, A. Zoia, Tripoli-4®, CEA, EDF and AREVA reference Monte Carlo code, Annals of Nuclear Energy 82, 151-160 (2015)

09/03/2023

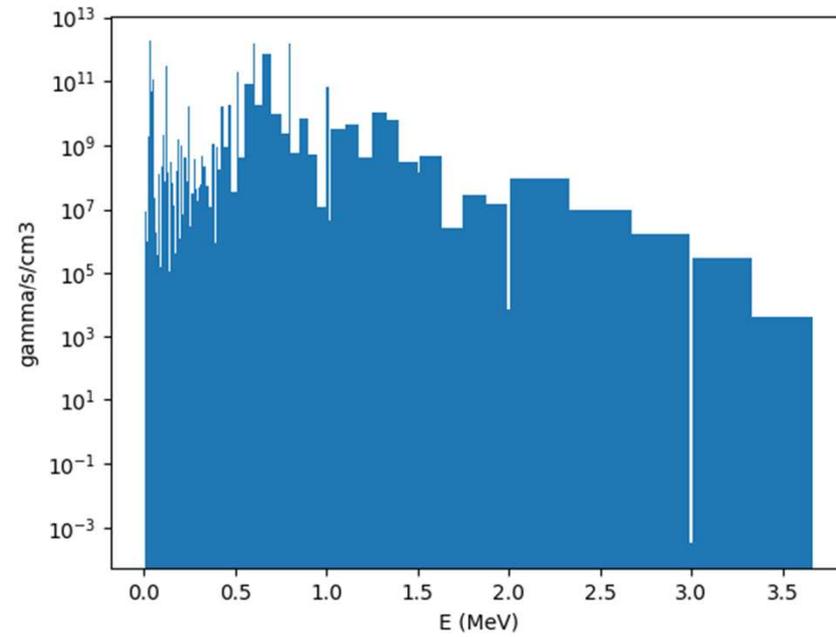
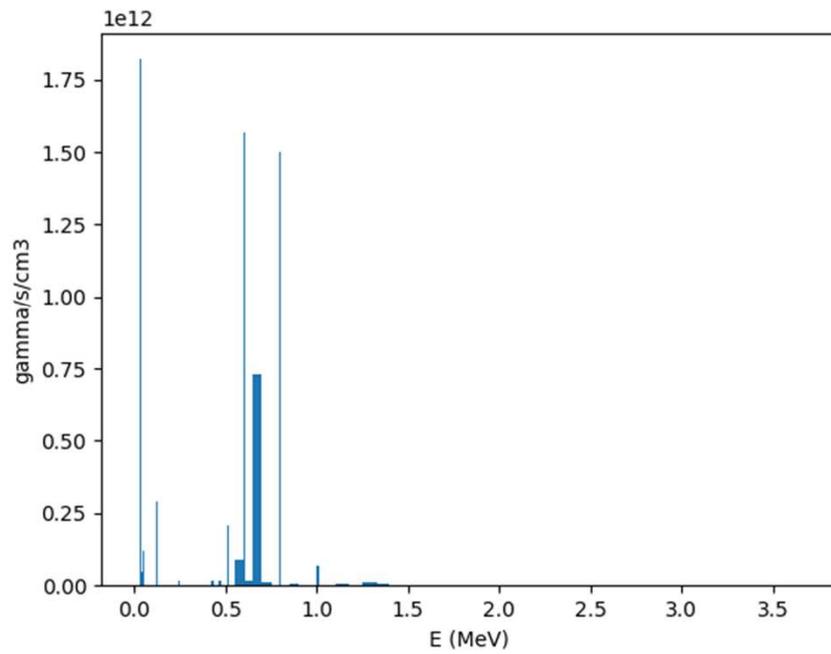
5

Principaux rayonnements contributeurs au DED





Spectre des photons gamma primaires





Problème typique de radioprotection

- **Fortes épaisseurs** de protection et **forme du spectre gamma** : peu de gamma sortent de l'emballage. C'est une bonne chose pour la radioprotection, mais une mauvaise pour la simulation: très peu de trajectoires simulées (voire pas) atteignent le point de calcul

⇒ on utilise des **méthodes de réduction de la variance** pour obtenir une estimation du **score** dans un **temps** de calcul **raisonnable**

On utilise des méthodes de réduction de la variance qui puissent s'adapter au contexte de calcul de radioprotection: géométrie complexe 2D/3D, et spectre irrégulier.



2. Méthodes de réduction de la variance



Méthodes de réduction de la variance dans TRIPOLI-4®

Deux grandes familles de méthodes : contrôle de population (par exemple AMS) et échantillonnage d'importance (par exemple CADIS)

Utilisation de poids pour obtenir les bons résultats (estimateur non biaisé)

Pour les calculs de radioprotection, la méthode la plus courante d'échantillonnage d'importance est la **transformée exponentielle**: on modifie le vol (distance entre deux collisions) des particules en fonction de l'énergie et de la position dans l'espace :

⇒ nécessité de définir des **cartes d'importance**, pour chaque groupe d'énergie: mot-clef INIPOND, ou mot-clef IDT (méthode CADIS, nouvellement implémentée dans TRIPOLI-4 ®)

CADIS : *Consistent Adjoint-Driven Importance Sampling*



Échantillonnage d'importance

Si on note P l'état d'une particule (r, Ω, E) , la simulation de MC est régie par trois lois de probabilités: $Q(P)$: source

$T(P \rightarrow P')$: vol (trajet entre deux collisions)

$C(P \rightarrow P')$: collision

- Le jeu optimal est obtenu avec $Q^*(P) = \frac{Q(P)\mathcal{J}(P)}{\int Q(P')\mathcal{J}(P')dP'}$

$$T^*(P \rightarrow P') = T(P \rightarrow P') \frac{h(P \rightarrow P') + \int C(P' \rightarrow P'')\mathcal{J}(P'')dP''}{\mathcal{J}(P)}$$

$$C^*(P' \rightarrow P'') = C(P' \rightarrow P'') \frac{\mathcal{J}(P'')}{\int C(P' \rightarrow P'')\mathcal{J}(P'')dP''}$$

avec \mathcal{J} l'importance et $h(P \rightarrow P')$ le score en P' .

L'importance optimale est le flux adjoint, impossible à obtenir de manière exacte.



Méthodes de réduction de la variance employées

| | Méthode historique de TRIPOLI-4® Mot-clef INIPOND | Méthode CADIS de TRIPOLI-4® Mot-clef IDT |
|-------------|---|--|
| Principe | <i>Importance sampling</i> | <i>Importance sampling</i> |
| | Carte d'importance → déterminée pendant les premiers batches par la résolution de l'équation de Placzek | Carte d'importance → déterminée par l'estimation du flux adjoint par le solveur déterministe IDT* |
| Utilisation | <ul style="list-style-type: none"> - Découpage énergétique à entrer - Maillage spatial à entrer } à adapter au problème | <ul style="list-style-type: none"> - Découpage énergétique prédéfini (ajustable si nécessaire) - Maillage spatial fin à entrer |

*I. Zmijarevic and R. Sanchez, "Deterministic Solutions for 3D Kobayashi Benchmarks," *Prog. Nucl. Energy*, 39, 207 (2001); [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(01\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(01)00013-0).



Propriétés attendues

Pour chaque groupe d'énergie, la carte doit **favoriser** les trajectoires des gammas de ce groupe à condition qu'ils contribuent au score

Les **poids** des particules (multipliés au fur et à mesure des collisions) ne doivent pas devenir **trop faibles ni trop importants**, de manière à conserver une **représentativité** des trajectoires par rapport à la simulation analogue (si on supprime complètement les événements rares contributeurs à la dose par un biaisage inadapté, l'estimateur de l'écart-type ne le détectera pas: le score ne sera pas correct, mais les indicateurs seront bons)

Idéalement, la méthode doit être **relativement robuste** face à des modifications marginales du **maillage spatial** et du **découpage énergétique** (à condition de vérifier la compatibilité du maillage avec la géométrie)



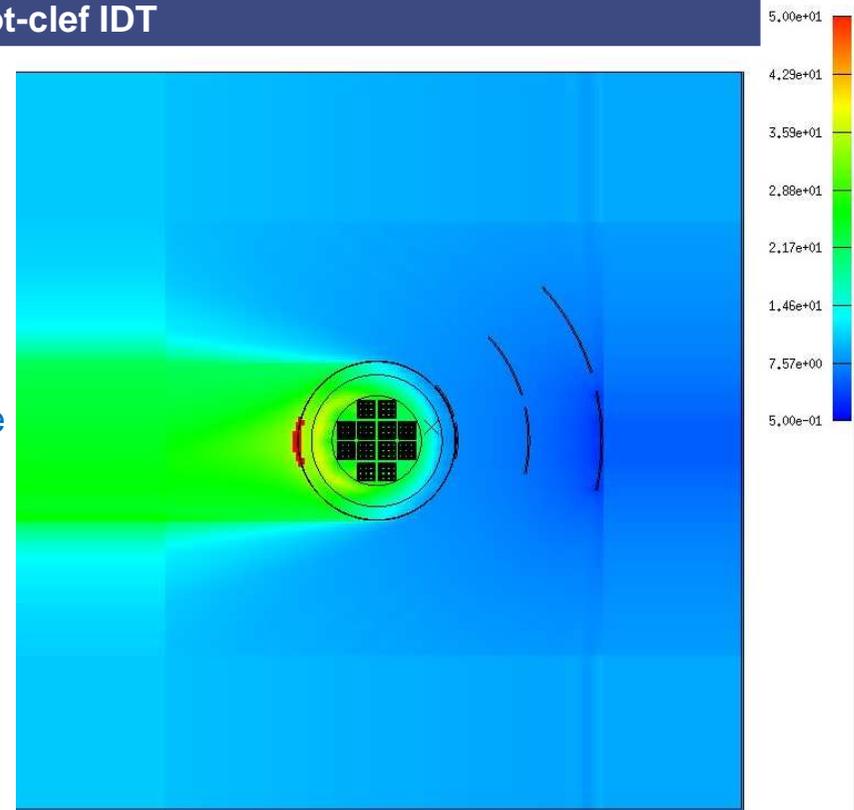
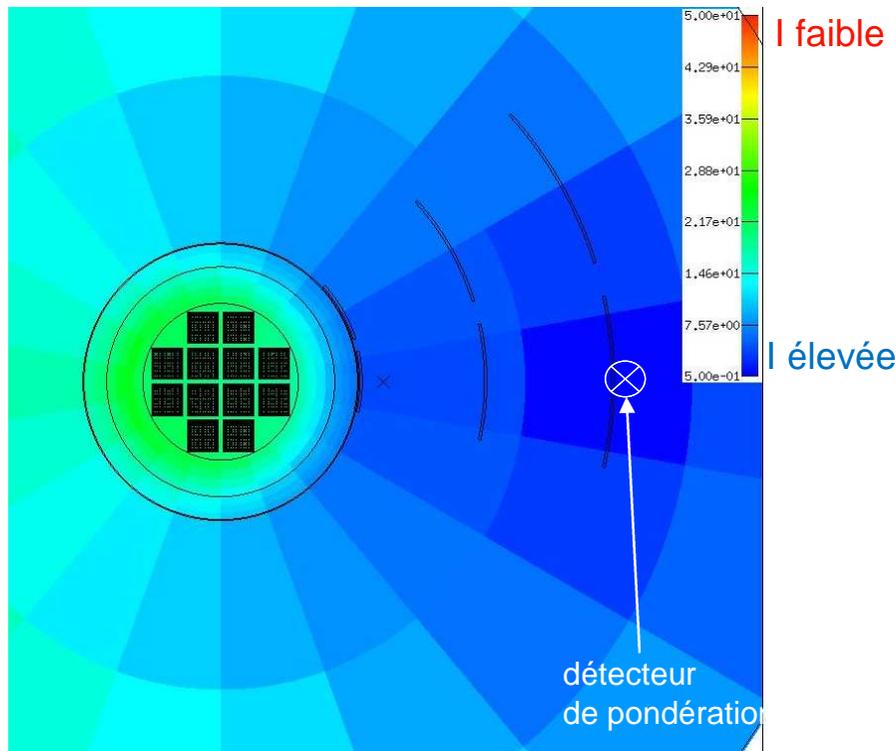
3 ■ Résultats



Cartes d'importance

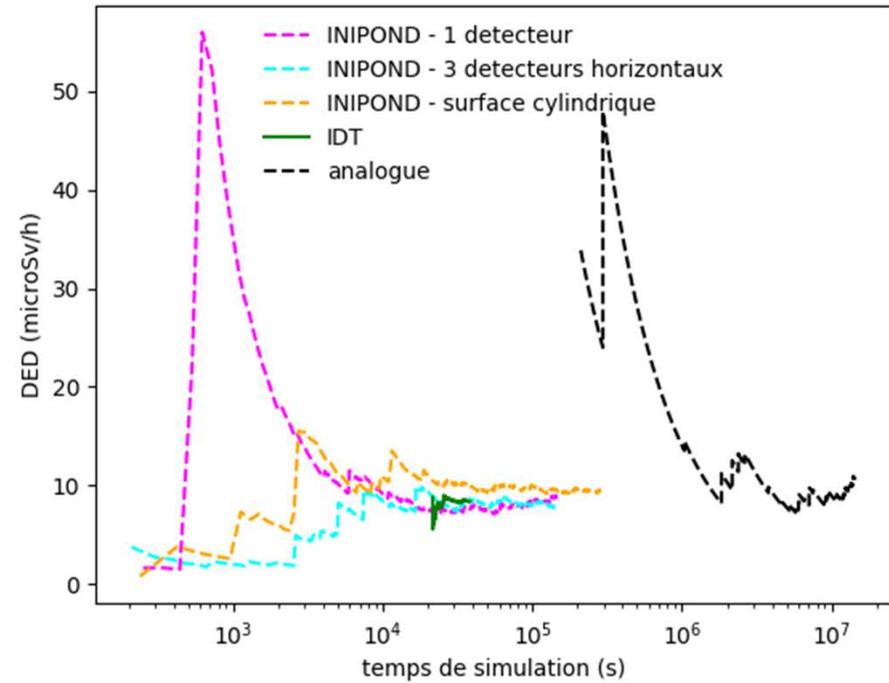
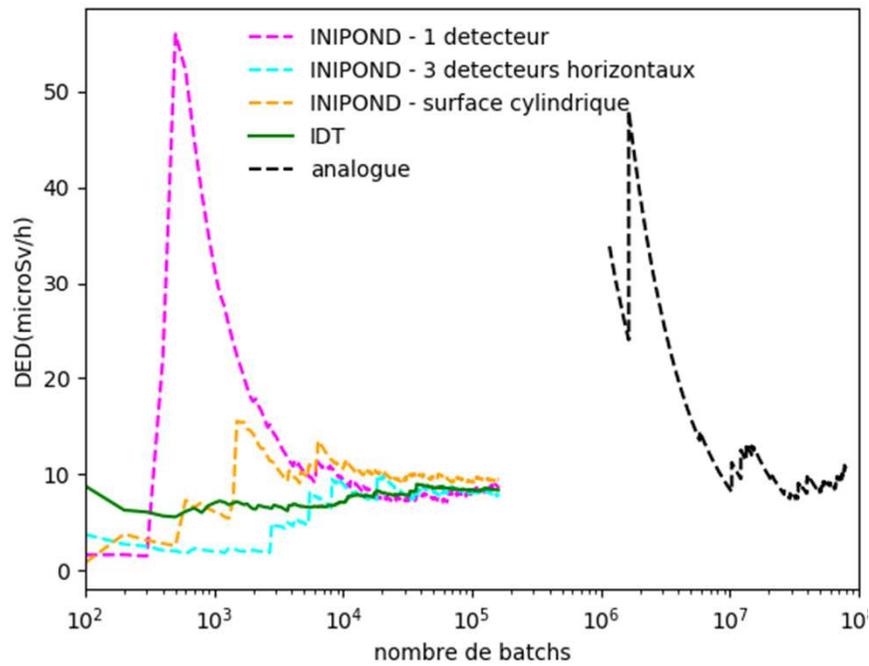
Méthode historique de TRIPOLI-4®
Mot-clef INIPOND

Méthode CADIS de TRIPOLI-4®
Mot-clef IDT



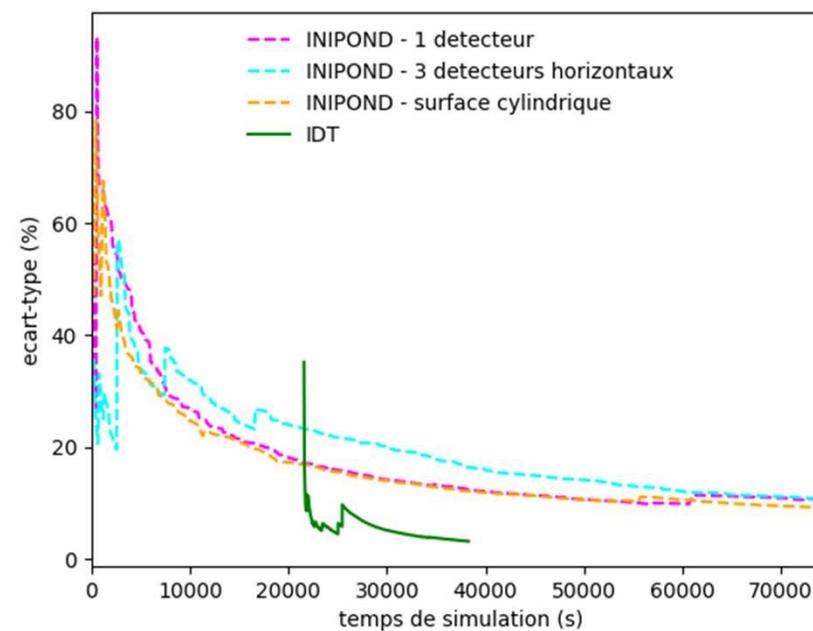
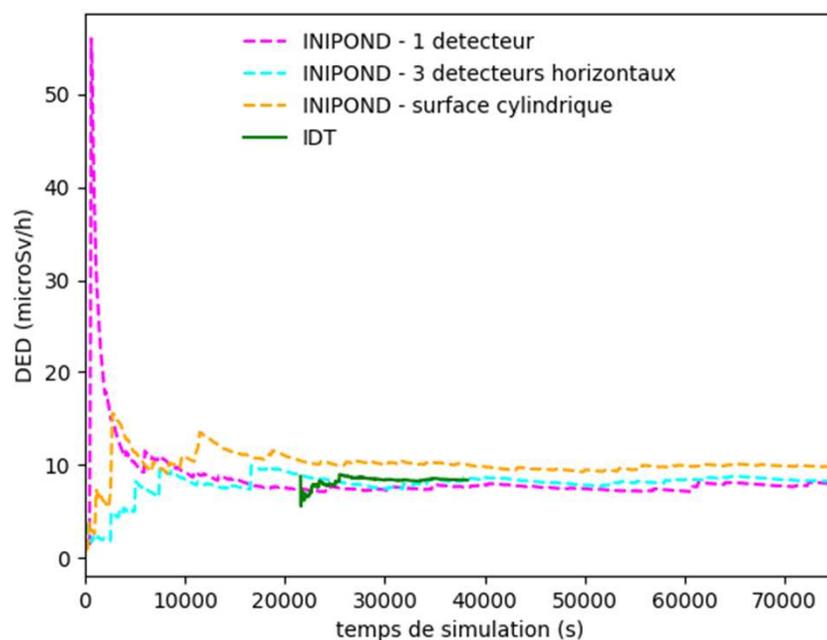


DED



Les temps de calcul sont ramenés à 8 cœurs, car le calcul IDT est effectué par défaut sur 8 cœurs 09/03/2023

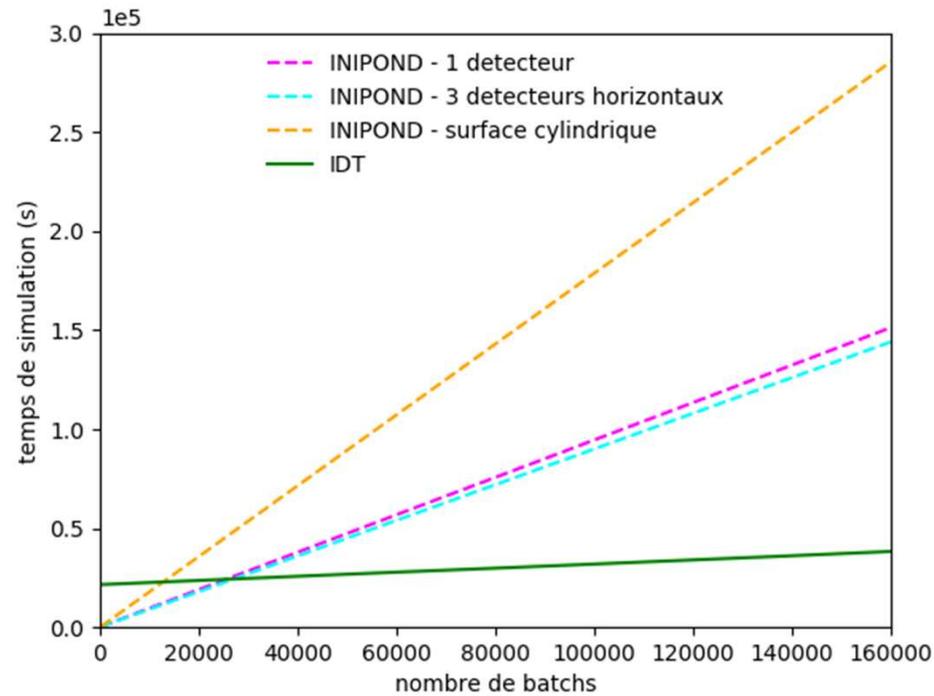
DED



Le calcul « IDT » a le même nombre de batches que les calculs « INIPOND ». Le temps de calcul de la carte par IDT est largement compensé par des batches plus rapides.



Temps d'exécution des batchs



10 000 particules par batch



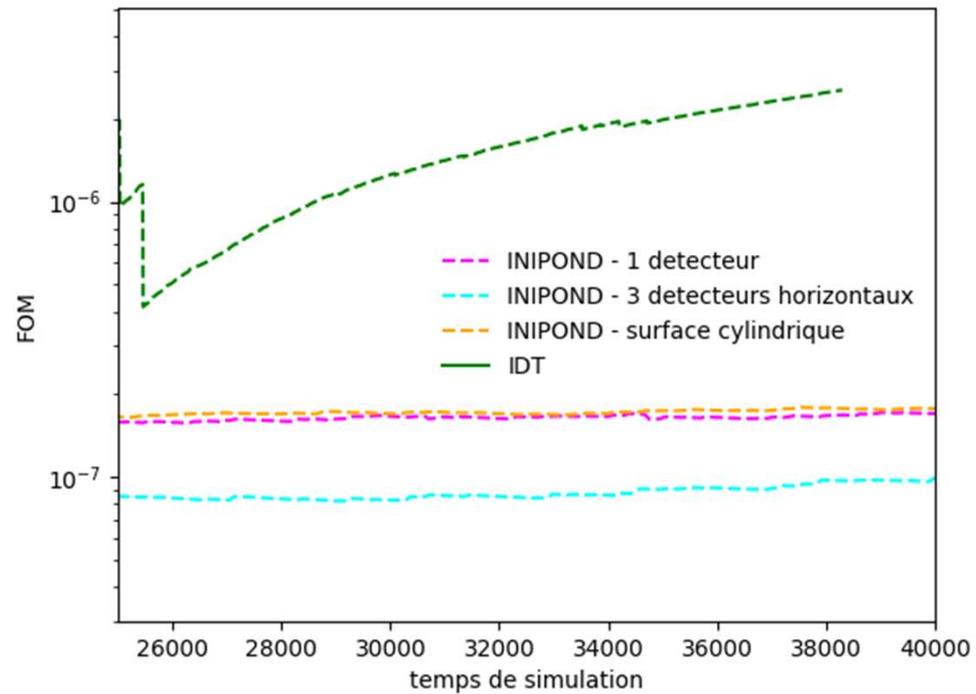
Évolution de la FOM

FOM: *Figure Of Merit*

$$FOM = \frac{1}{\sigma^2 T}$$

σ^2 : variance

T : temps de simulation





Conclusion

La méthode CADIS nouvellement implémentée dans TRIPOLI-4® permet d'obtenir des cartes pour la réduction de variance par la transformée exponentielle de manière simple et robuste.

Le temps de résolution du problème adjoint est assez long, mais la simulation avec cette carte est nettement plus efficace.

La FOM est meilleure avec CADIS qu'avec la méthode historique pour cette application.

Remerciements à Davide Mancusi (ISAS/DM2S/SERMA), qui m'a permis de tester les premières versions de la méthode CADIS