



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Combinaison de méthodes de réduction de variance pour optimiser l'estimation des débits de dose dans les opérations de démantèlement

Nicolas Guillevic

Stagiaire

GUILLEVIC Nicolas – CEA/DES/IRESNE/DER/SPRC/LPN

Encadrante CEA

LE LOIREC Cindy – CEA/DES/IRESNE/DER/SPRC/LPN

Université

Université de Strasbourg – Faculté de Physique et Ingénierie

Master Physique subatomique et Astroparticules



École d'ingénieurs

Télécom Physique Strasbourg – 3^{ème} année filière Généraliste
département Physique option Physique et Modélisation



Soutenance M2 PSA – 24 Juin 2021

- ❖ Présentation globale du stage
- ❖ La simulation Monte Carlo
- ❖ Configuration d'étude
- ❖ Performance de l'estimateur e -TLE
- ❖ Mise en œuvre de l'ajustement des cartes d'importance
- ❖ Calendrier & Perspectives

► Comment et dans quel contexte se déroule le stage ?

Présentation globale du stage

Environnement :



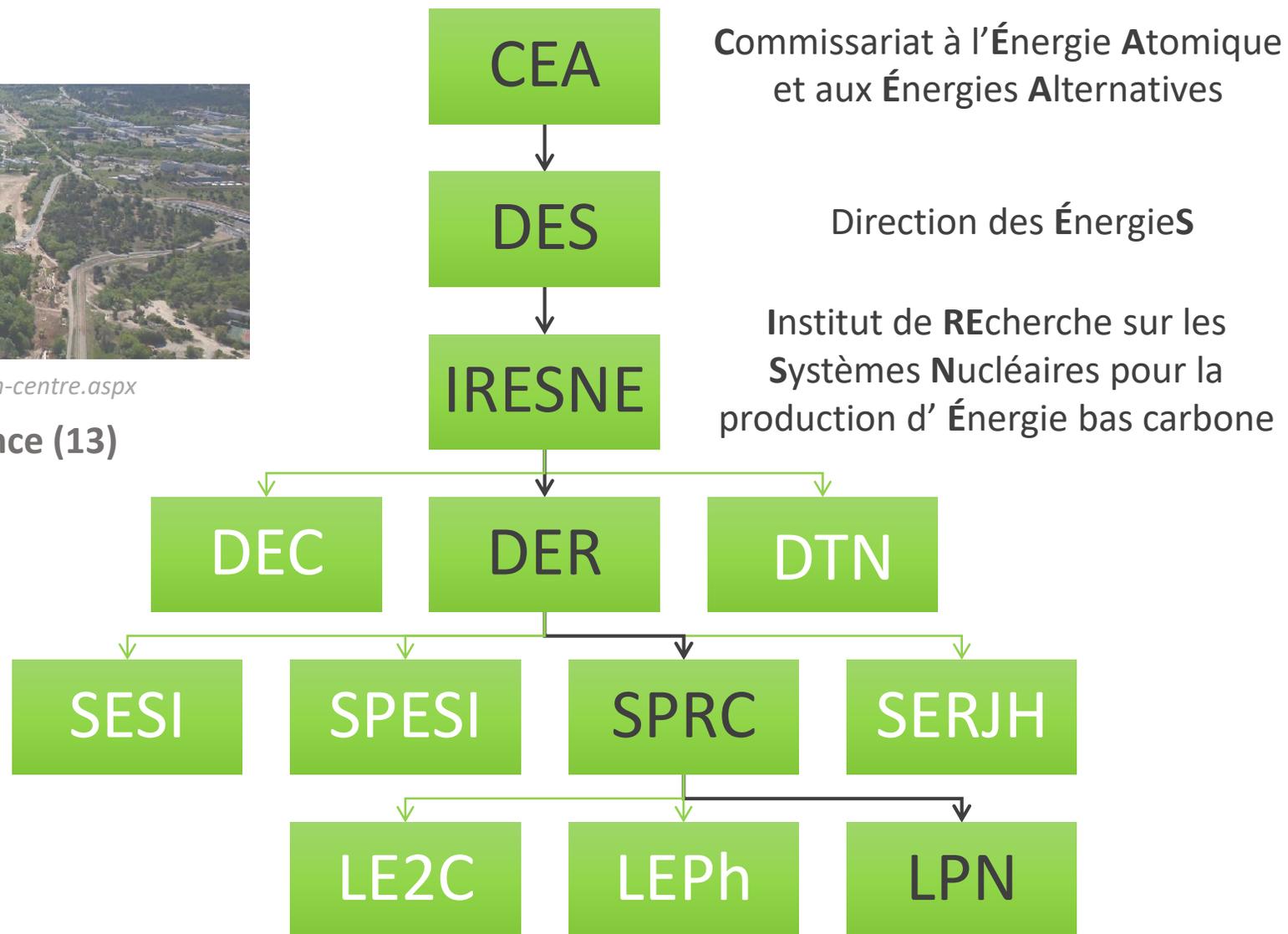
cadarache.cea.fr/cad/Pages/Centre/Presentation-centre.aspx

À Cadarache, St-Paul-lès-Durance (13)

Département d' Études des Réacteurs
DER

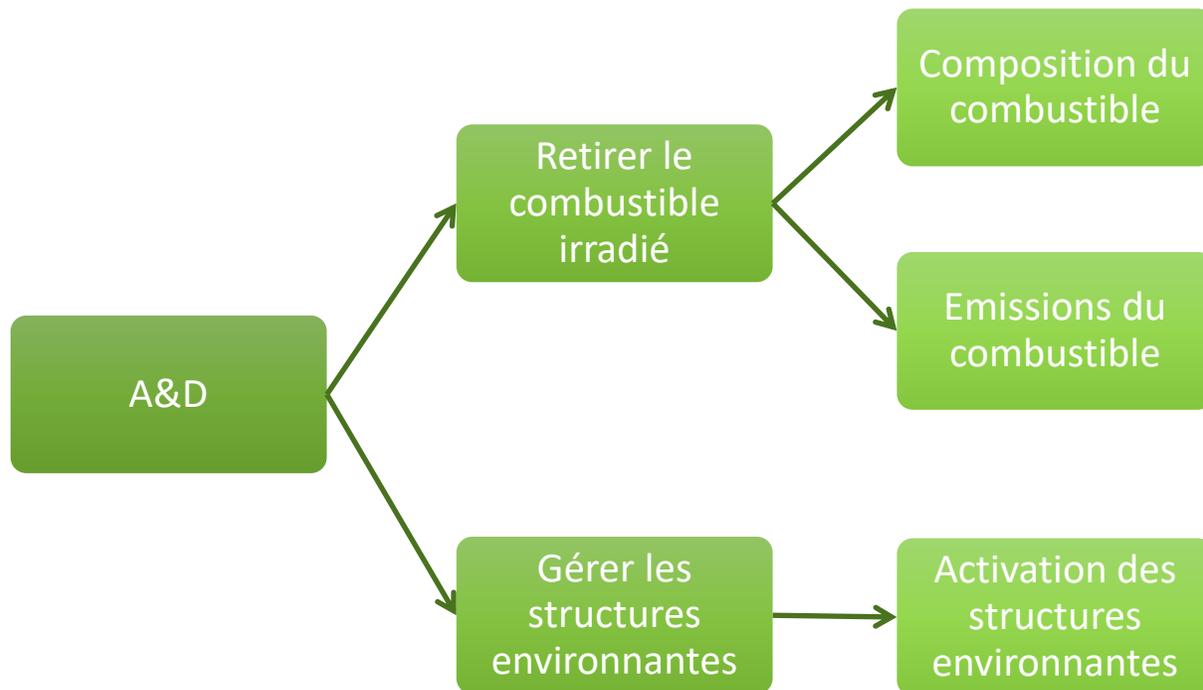
Service de Physique des Réacteurs et du Cycle
SPRC

Laboratoire de Projets Nucléaires
LPN



Problématique : Les installations nucléaires ont une durée de vie limitée.

Enjeu : Maîtriser l'ensemble du cycle de vie des Installations Nucléaires de Base (INB), y compris la phase d'**Assainissement-Démantèlement (A&D)**



Activation : Matériau stable qui devient radioactif suite à une capture neutronique

Besoin : Connaître l'ambiance radiologique de l'INB pour établir un scénario de démantèlement adapté à la radioprotection des opérateurs

Comment faire ?

- Mesures *in situ*
 - Avantages : résultats réels / fiables
 - Inconvénients : mesures chères / impossibles
- Estimations *in silico*
 - Avantages : apports de connaissances pour des configurations plus complexes
 - Inconvénients : résultats possiblement biaisés, temps de calcul

- ▶ Comprendre et s'appropriier les bases théoriques et les outils informatiques

La simulation Monte Carlo

Simulation déterministe

(résolution analytique)

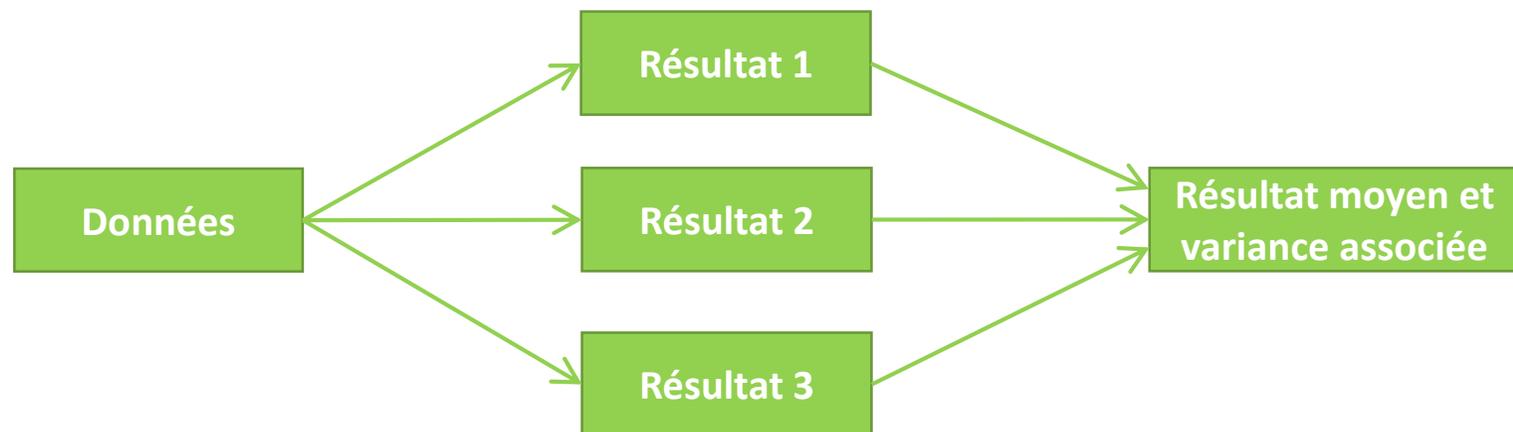


Avantage : Temps de calcul court

Inconvénients : Résultat possiblement biaisé et domaine d'utilisation limité

Simulation Monte Carlo

(résolutions stochastiques)



Avantage : Convergence vers un résultat moyen sans biais

Inconvénient : Temps de calcul long pour atteindre un niveau de convergence optimal (variance faible)

Solution ⇒ Utilisation de techniques de réduction de variance (VRT)

Équation intégrro-différentielle de Boltzmann

Hypothèse: gaz parfait de neutrons

Bilan de la densité de neutrons sur un volume élémentaire, stationnaire, dans un milieu isotrope non multiplicateur

$$\vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) + \Sigma_t(\vec{r}, E) \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) = \int \Sigma_s(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, E' \rightarrow E) \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}', E') d^2\vec{\Omega}' dE' + Q(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$$

↑ Terme de sortie par déplacement (transport)
 ↑ Terme de sortie par absorption et diffusion
 ↑ Terme d'entrée par diffusion
 ↑ Terme source autonome

Reformulation intégrale de l'équation, adaptée pour la simulation Monte Carlo

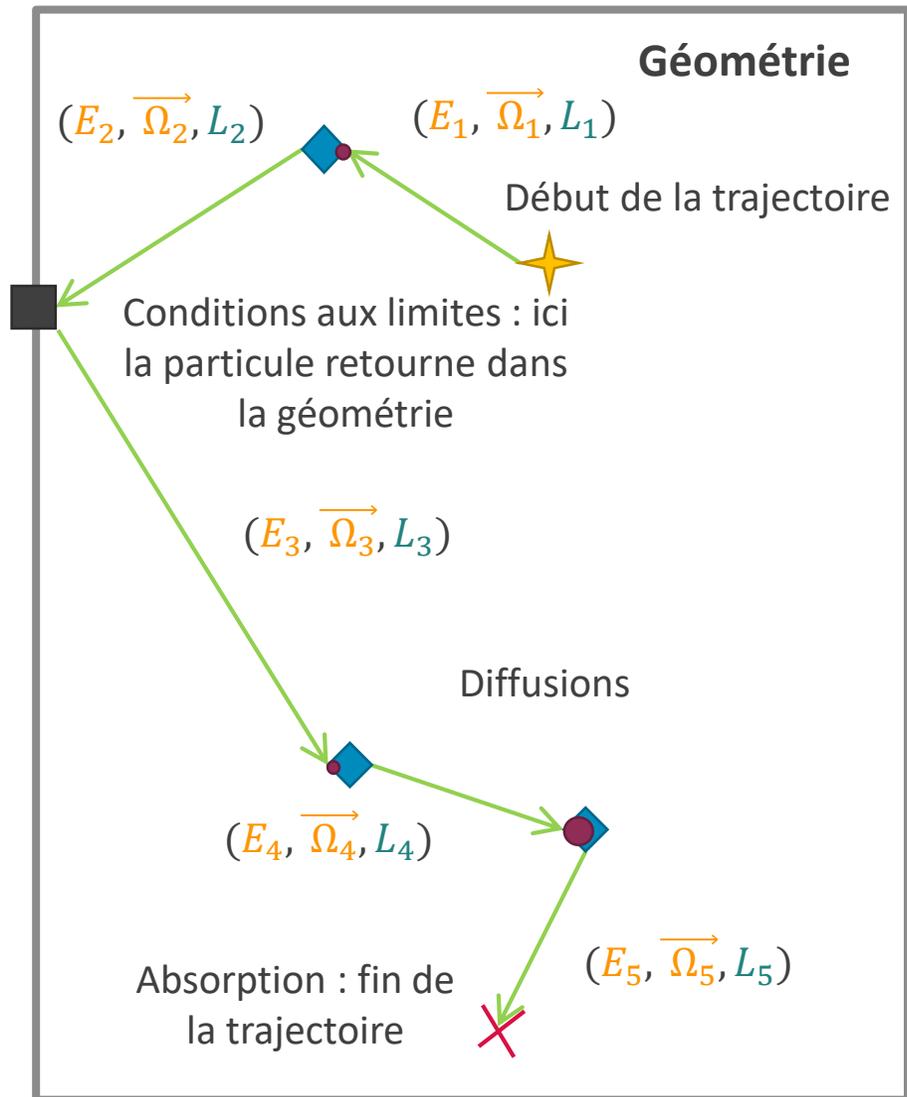
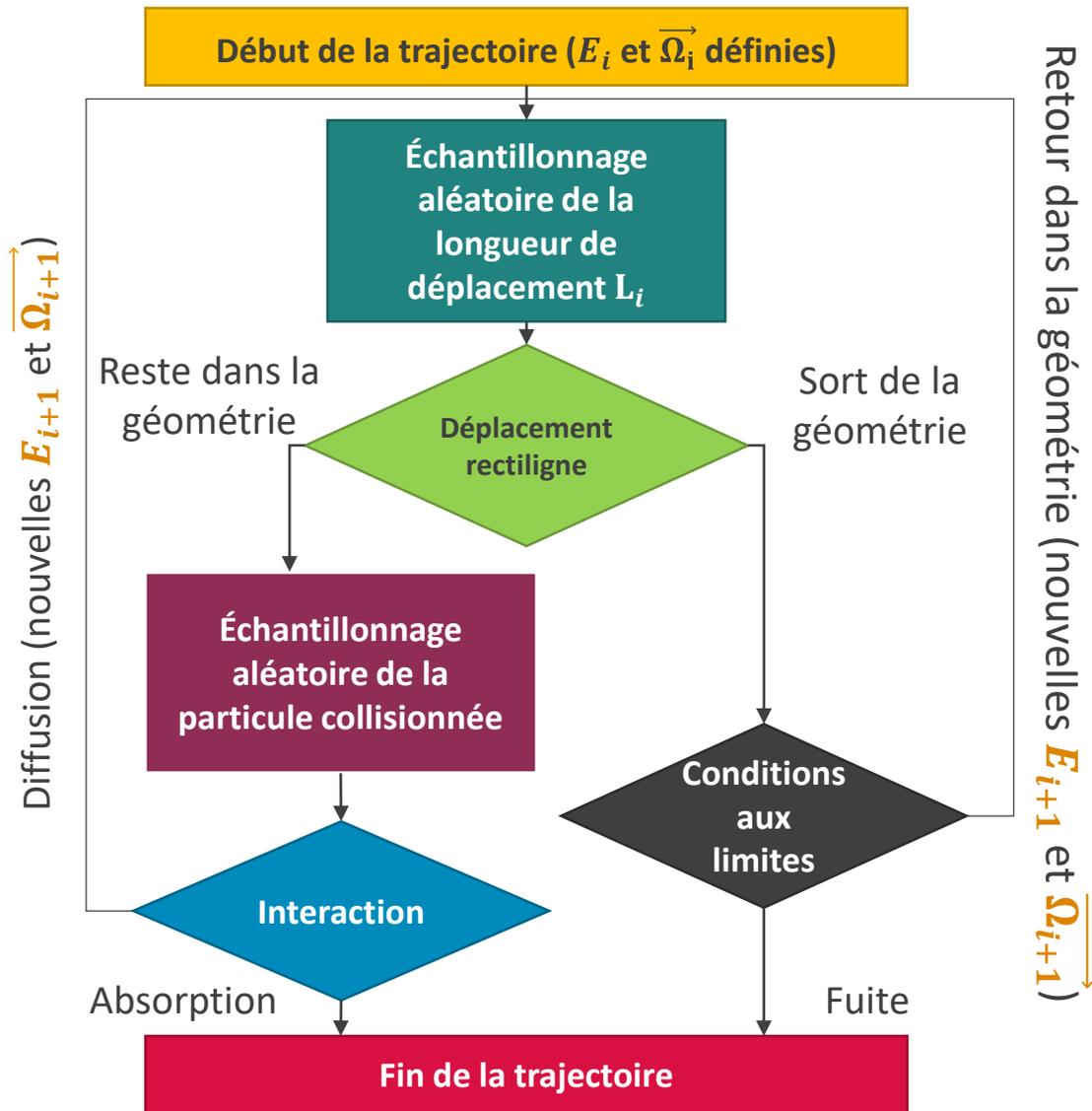
$$\psi(P) = \int \psi(P') \tau(P' \rightarrow P) dP' + \int Q(P') D(\vec{r}' \rightarrow \vec{r}, \vec{\Omega}, E) dP'$$

Densité de collision :

$$\psi(P) = \Sigma_t(\vec{r}, E) \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$$

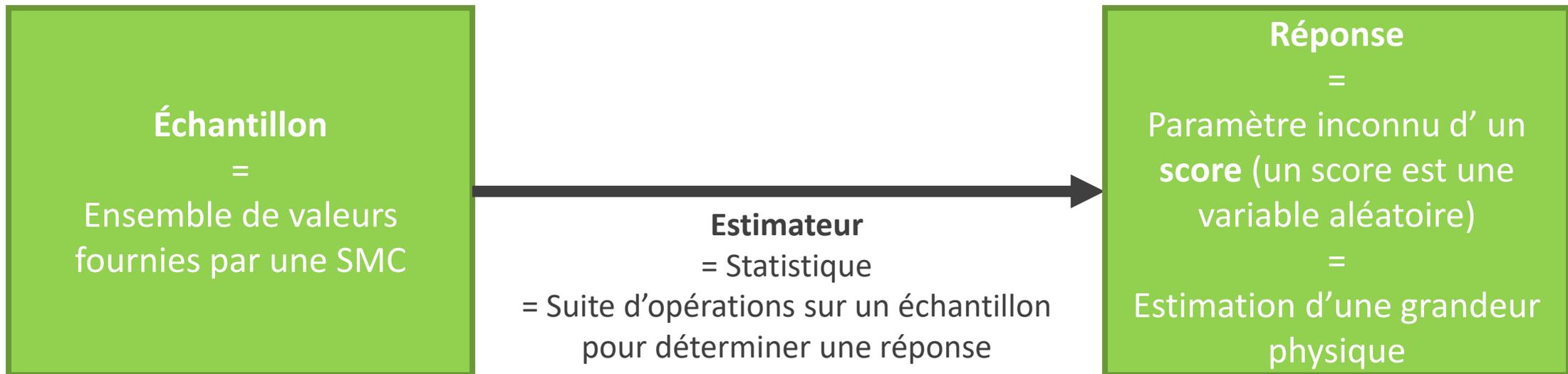
Opérateur de transport = opérateur de déplacement x opérateur de collision :

$$\tau(P' \rightarrow P) = D(\vec{r}' \rightarrow \vec{r}, \vec{\Omega}, E) C(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, E' \rightarrow E)$$



Logigramme de la simulation Monte Carlo d'une trajectoire

Qu'est-ce qu'estimer ?



Les estimateurs permettent à partir de données de simulation d'établir des estimations de grandeurs telles que **le flux de particules, le débit de dose, le KERMA ...**

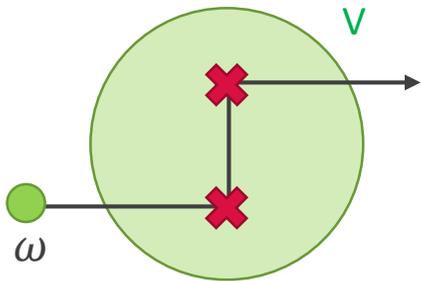
Chaque estimateur converge vers le même résultat à condition qu'il ne soit pas biaisé. Les caractéristiques à prendre en considération pour un estimateur sont la convergence, le biais, l'efficacité et la robustesse

Estimateur COLL

Basé sur le comptage des n **collisions** des particules à scorer à l'intérieur d'un volume V

$$\hat{\phi}_{COLL} = \frac{1}{nV} \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{\Sigma_t(E_i)}$$

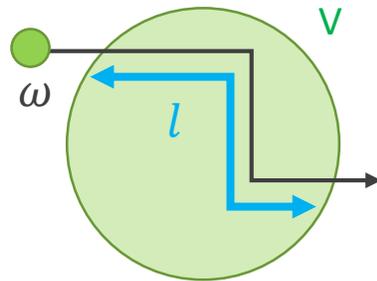
ω : le poids de la particule
 Σ_t : section efficace macroscopique totale



Estimateur « Track Length » (TLE)

Basé sur le calcul des n **longueurs de trajectoires** des particules à scorer à l'intérieur d'un volume V

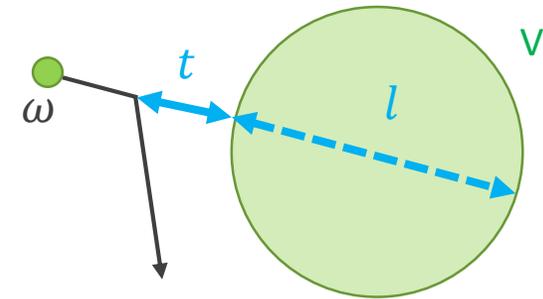
$$\hat{\phi}_{TLE} = \frac{1}{nV} \sum_{i=1}^n l_i \omega_i$$



Estimateur « exponential Track Length » (e-TLE)

Basé sur TLE et qui comprend les n contributions des trajectoires potentielles des particules traversant le volume V

$$\hat{\phi}_{eTLE} = \begin{cases} \frac{1}{nV} \sum_{i=1}^n \frac{e^{-\mu t_i} (1 - e^{-\mu l_i})}{\mu} \omega_i & \text{si } l_i > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$



Plus-value : effectuer une VRT

Trajectoire aléatoire de la particule remplacée par la trajectoire qui aurait lieu s'il n'y avait pas eu interaction

* ω_i : poids de la particule $i \rightarrow \omega_i = 1$ dans le cas d'une simulation classique, sans modification du comportement de la particule

Importance I : pour orienter les particules vers une zone d'intérêt (des sources vers les détecteurs)

Des VRT sont basées sur une carte d'importance générée selon la **POSITION**, l'**ÉNERGIE** et la **DIRECTION** des particules.

Exemple : Carte d'importance selon la **POSITION**



Poids statistique ω : pour ne pas biaiser les résultats avec des VRT

Le poids va quantifier la contribution de la particule à la réponse de la simulation. Quand aucune VRT est utilisée, toutes les particules ont un poids égal à : $\omega_{analogue} = 1$.

Le poids varie en fonction de l'intérêt de la particule au score considéré.

Figure de mérite – FOM (ou efficacité - ϵ) : On compare les différentes VRT avec cette grandeur qui est indépendante du nombre N de particules simulées . L'objectif étant d'obtenir la plus grande FOM possible.

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

Variance des résultats
(proportionnel à $1/N$)

Temps de calcul
(proportionnel à N)

3 grandes familles de techniques de réduction de variance :

Contrôle de la
population

$$\sigma^2 \searrow$$

Modification de
l'échantillonnage

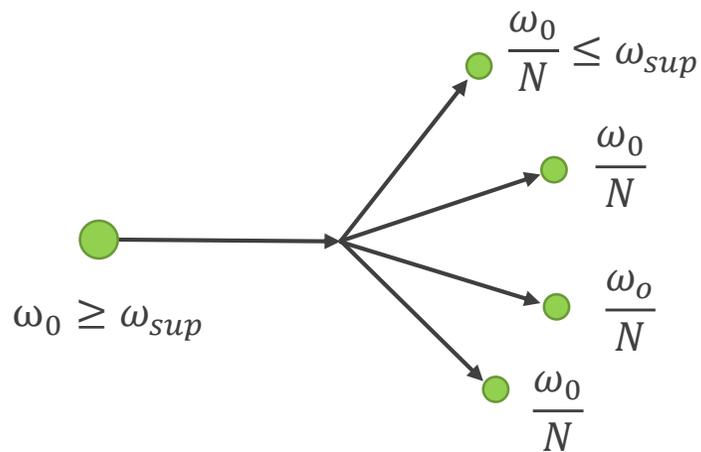
$$\sigma^2 \searrow$$

Hybridation de
procédés déterministes
et stochastiques

$$\sigma^2 \text{ et/ou } T \searrow$$

Contrôle de la population

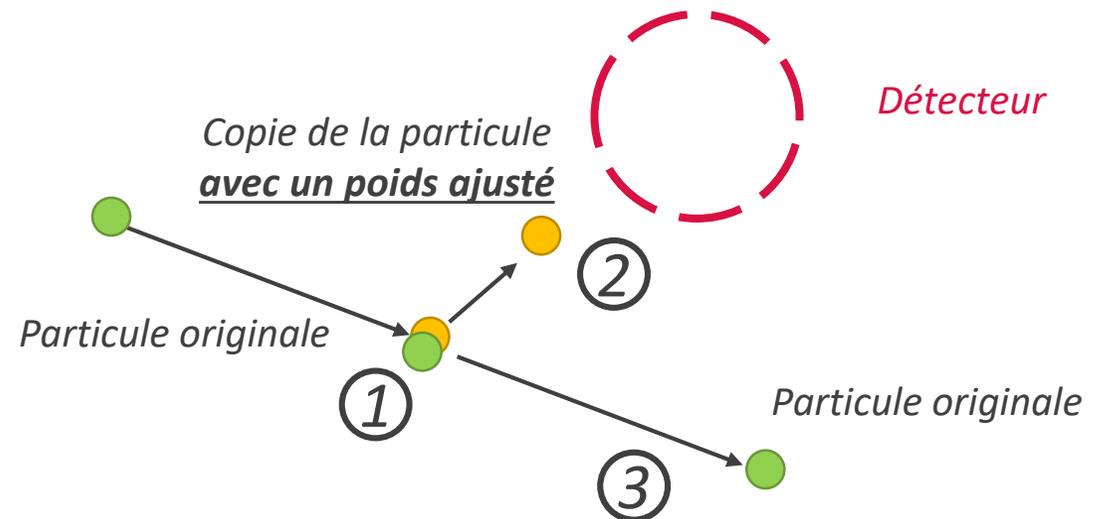
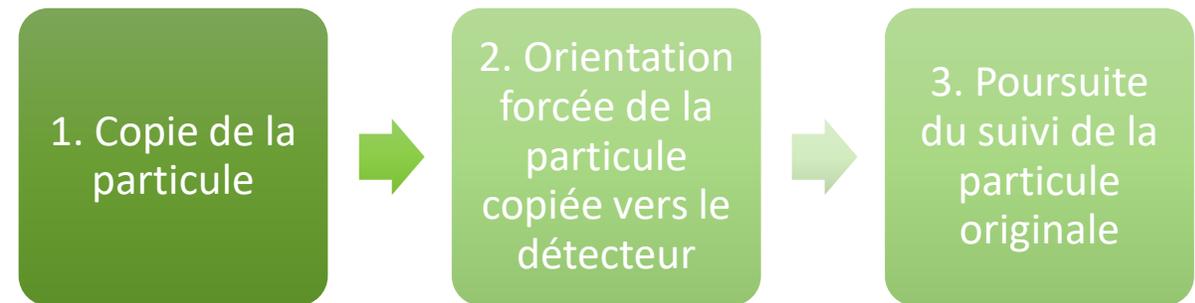
L'intérêt est de *maîtriser dans tout l'espace des phases le nombre de particules sans biaiser les résultats.*



Splitting : (fractionnement) d'une particule de poids ω_0 en N particules de poids $\frac{\omega_0}{N}$
 → **augmente la statistique de la détection**

Modification de l'échantillonnage

Détection forcée



Jeu de données (JDD)

GEOMETRY

- Définition des surfaces et des volumes de la géométrie

COMPOSITION GEO_COMP

- Matériaux utilisés qui constituent les volumes

SOURCES_LIST

- Définition des sources de particules (nature, position, énergie, direction ...)

RESPONSES SCORE

- Nature du résultat recherché (flux, dose, kerma ...)
- Méthode d'estimation du résultat (estimateur, position du détecteur ...)

SIMULATION

- Paramètres de la simulation (nombre de batches, taille d'un batch, stockage des lieux de sources et de collisions ...)

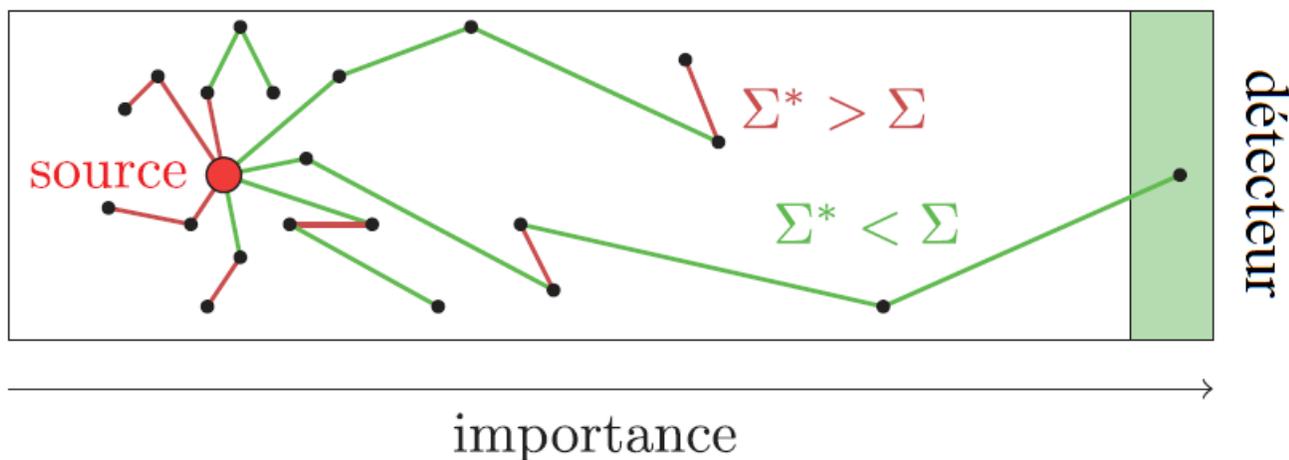
Transformée exponentielle (ET)

Modification de l'échantillonnage

Objectif : faciliter le transport sur une grande distance

La longueur des déplacements est artificiellement **agrandie/raccourcie** par la modification de la section efficace macroscopique totale

$$\Sigma_t \rightarrow \Sigma_t^* = \Sigma_t - K(\vec{\Omega} \cdot \vec{\Omega}^*)$$



$\vec{\Omega}$: direction de la particule

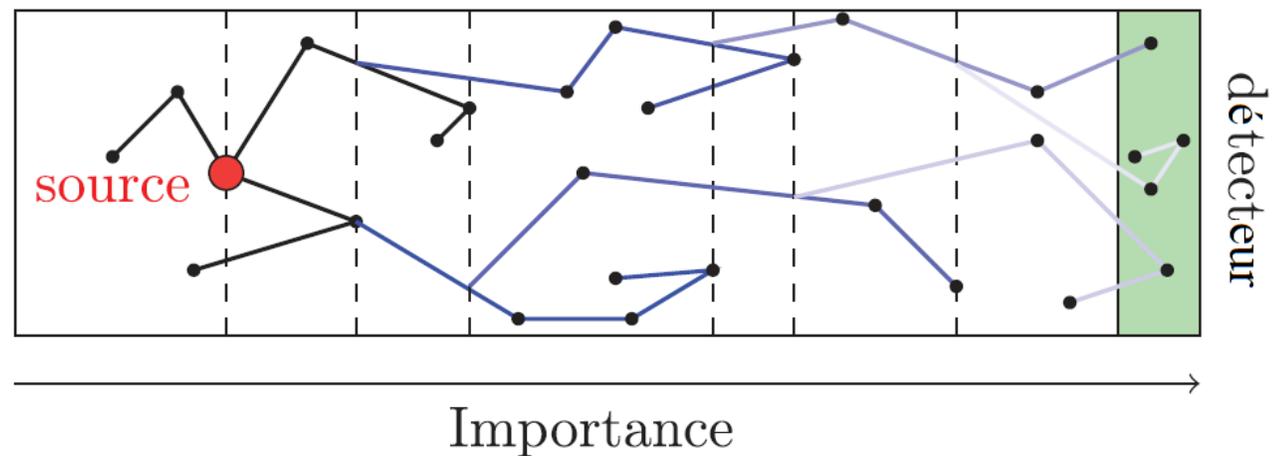
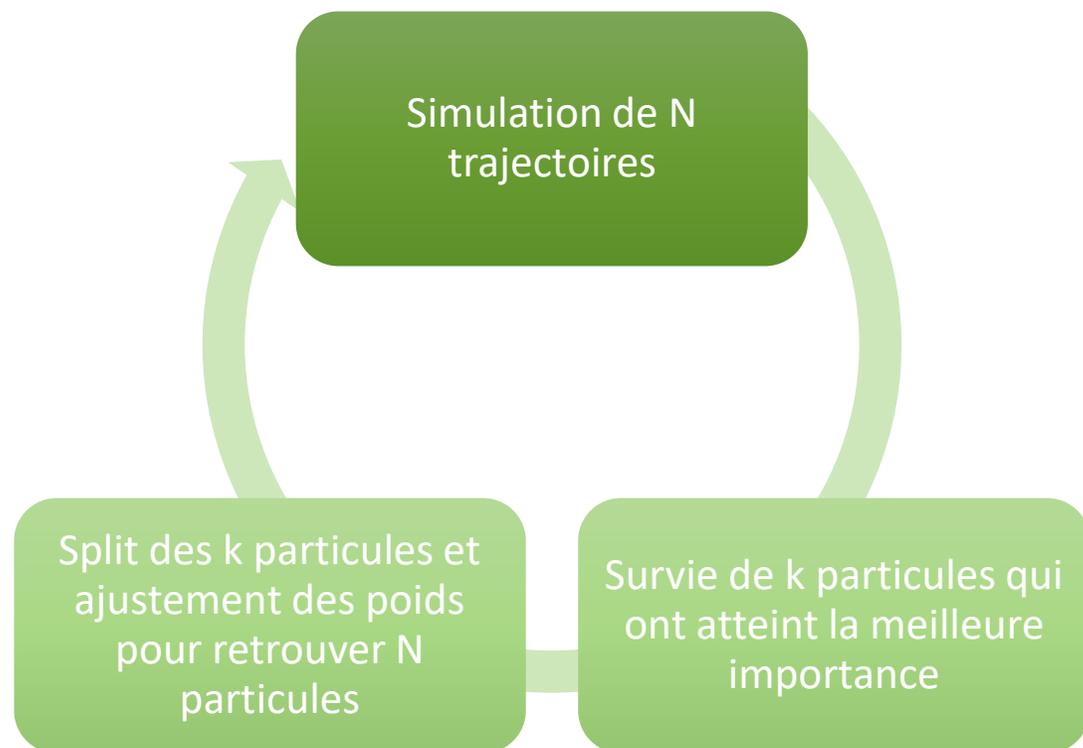
$\vec{\Omega}^*$: direction préférentielle pour atteindre le détecteur

$K \in [0; \Sigma_t]$: paramètre de biais relatif à l'importance de la position de la particule

AMS (Adaptive Multilevel Splitting)

Modification de l'échantillonnage et contrôle de la population

Procédure itérative :



M. Nowak, D. Mancusi, D. Sciannandrone, E. Masiello, H. Louvin & E. Dumonteil, *Accelerating Monte Carlo Shielding Calculations in TRIPOLI-4 with a Deterministic Adjoint Flux*, Nuclear Science and Engineering, Volume 193(9) : 966-981
DOI: 10.1080/00295639.2019.1578568

AMS a 2 formes :

- AMS avec un attracteur géométrique : **AMS geo**
- AMS avec des cartes d'importance : **AMS map**

A quoi servent les cartes d'importance ?

- 1) Utiliser **ET** et **AMS** avec TRIPOLI-4®
- 2) Améliorer l'**efficacité des SMC** (recherche des meilleures cartes d'importance)

$$I = I_{\vec{r}} \times I_E \times I_{\vec{\Omega}} \quad \text{où} \quad I_{\vec{r}} = \frac{1}{\beta+1} \frac{E_{g+1}^{\beta+1} - E_g^{\beta+1}}{E_{g+1} - E_g} e^{-k \|\vec{r} - \vec{r}_0\|}$$

Paramètres à ajuster :

Maillage spatial

**Découpage
énergétique**

**Coefficients k de
Placzek**

Évolution de la
densité de collisions

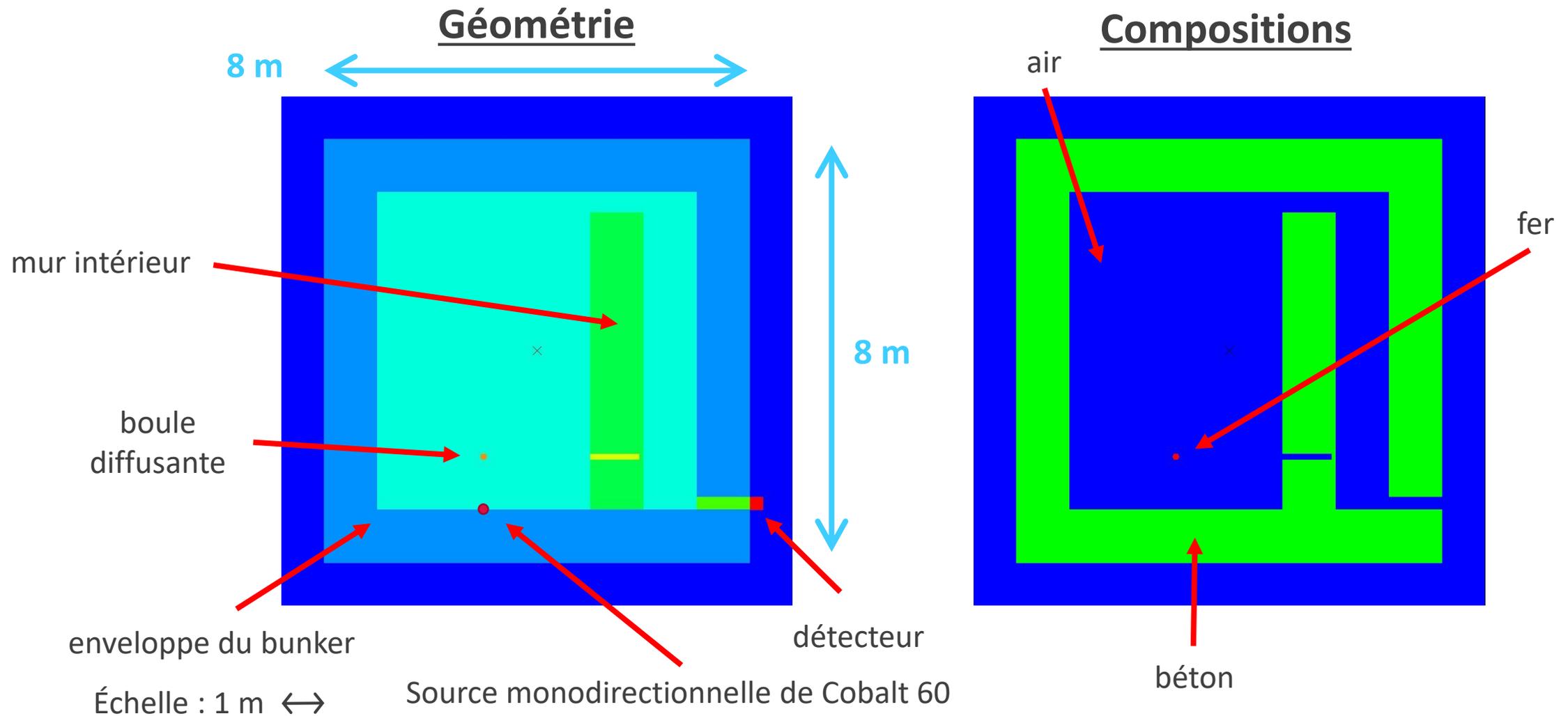
Paramètre β

Force d'attraction du
détecteur

► **Sujet de l'étude et objectifs du stage**

Configuration d'étude

Visualisation sous T4G



Plusieurs trajectoires possibles de la source au détecteur

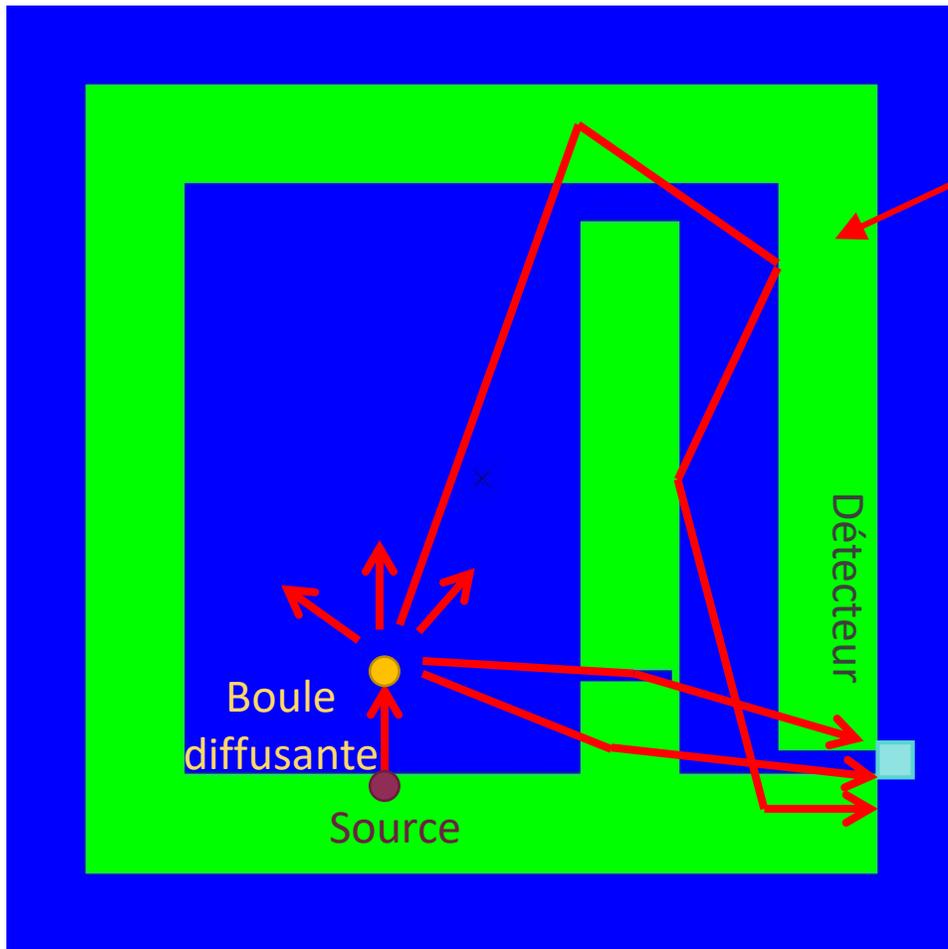
Les particules sont soumises à **plusieurs phénomènes**

⇒ **Complexité du problème**

Objectifs du stage :

Étudier les **performance de l'estimateur e-TLE**

Mettre en place une **méthodologie d'ajustement des cartes d'importance** basée sur les travaux de Florent CHEVALLIER

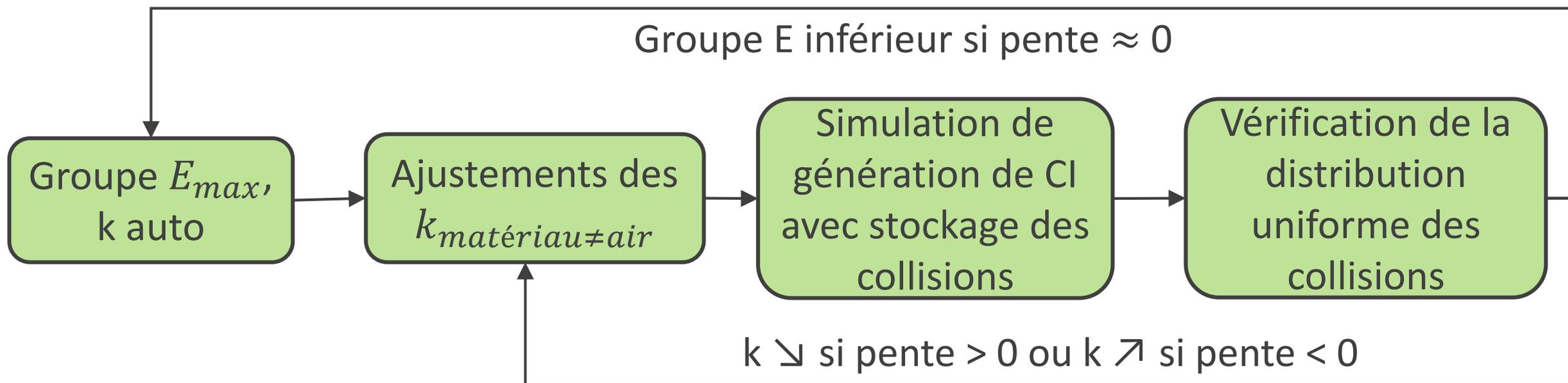


Comment mesurer la performance de l'estimateur e-TLE ?

Comparaison des efficacités des simulations entre TLE et e-TLE

Type de simulation	Épaisseur du mur interne (cm)
Analogue	1 – 5 – 10 – 20 – 50 – 100
AMS geo	1 – 5 – 10 - 20 – 50 – 100
ET	50
AMS map	50

Configuration plus simplifiée, source isotrope au niveau de la boule diffusante



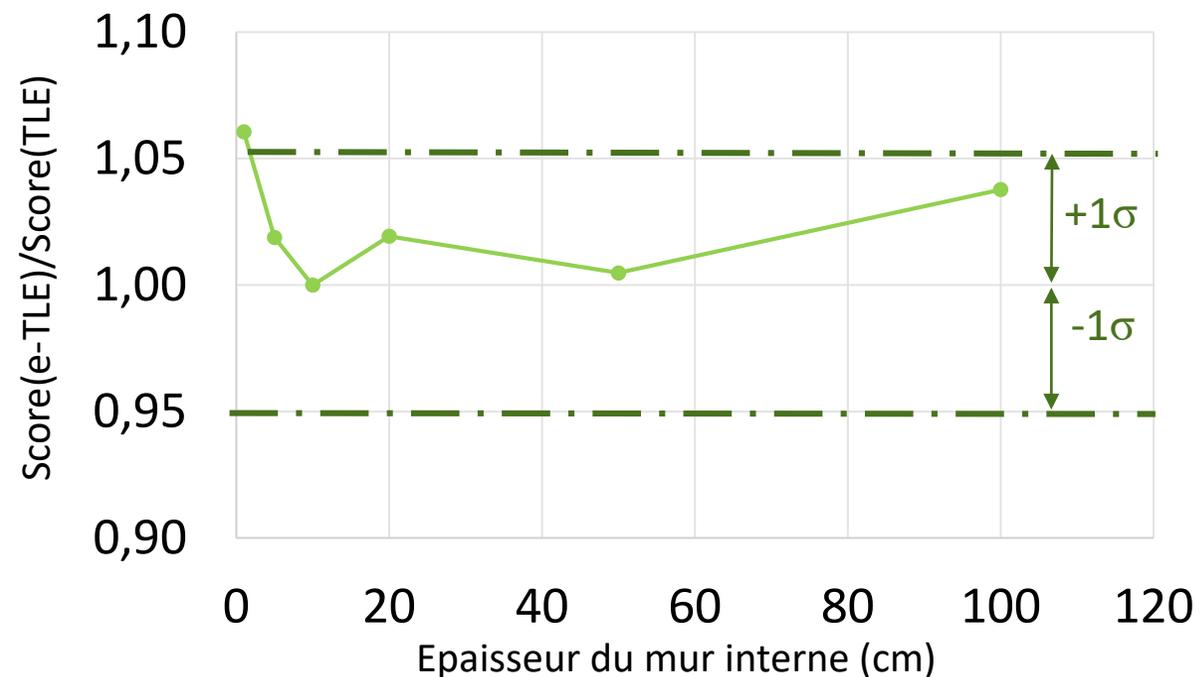
⇒ Une fois tous les $k_{matériau \neq air}$ réglés pour tous les groupes d'énergie, on ajuste les k_{air} à la moitié du $k_{matériau \neq air}$ le plus faible pour chaque groupe d'énergie

► Résultats de l'étude

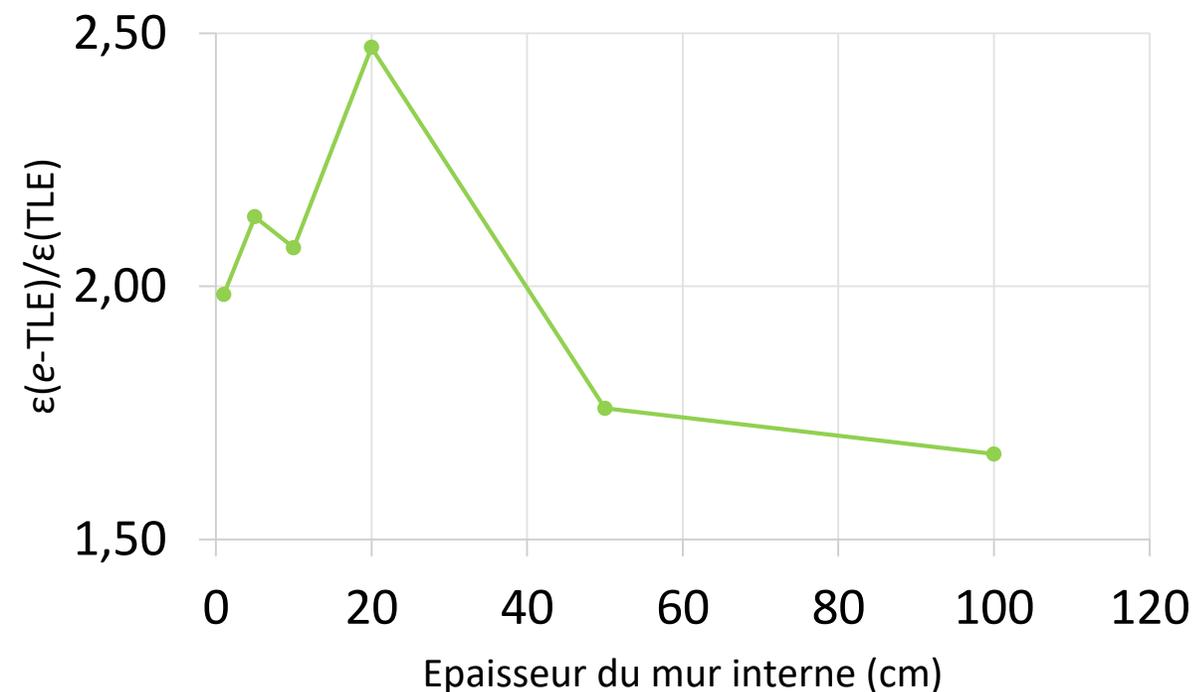
Performances de l'estimateur e-TLE

1^{ère} étude paramétrique sans VRT (analogue) avec les estimateurs TLE et e-TLE

Comparaison du score obtenu
par les deux estimateurs



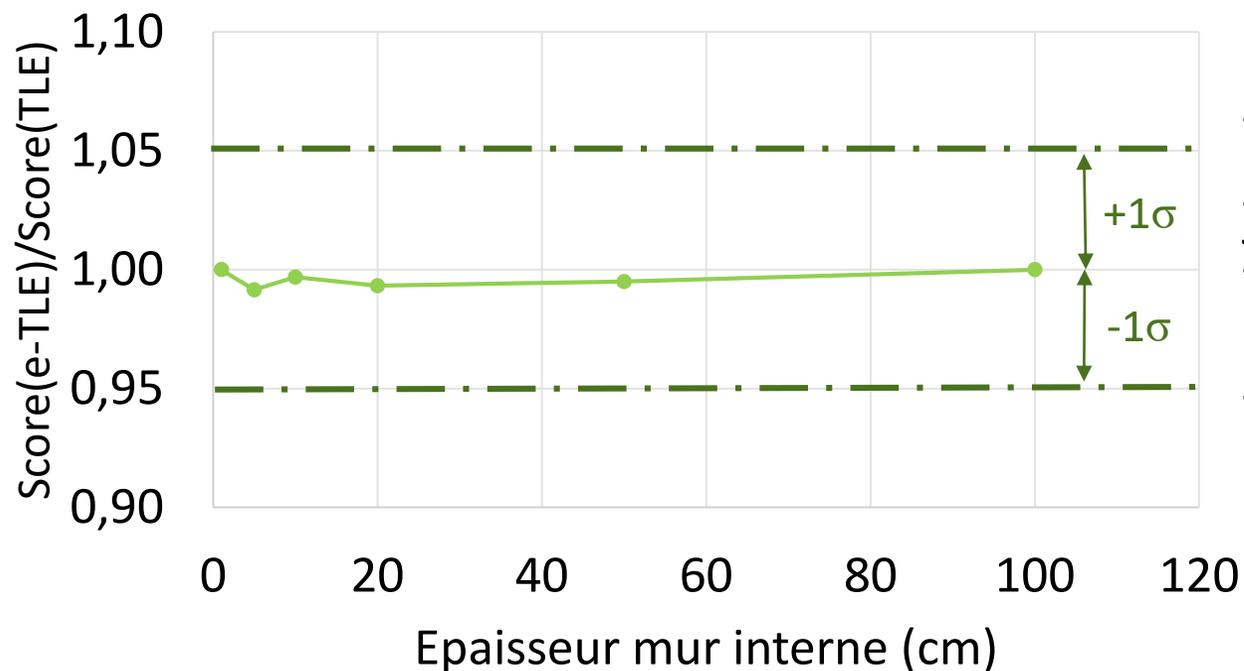
Comparaison de l'efficacité
obtenue avec les deux estimateurs



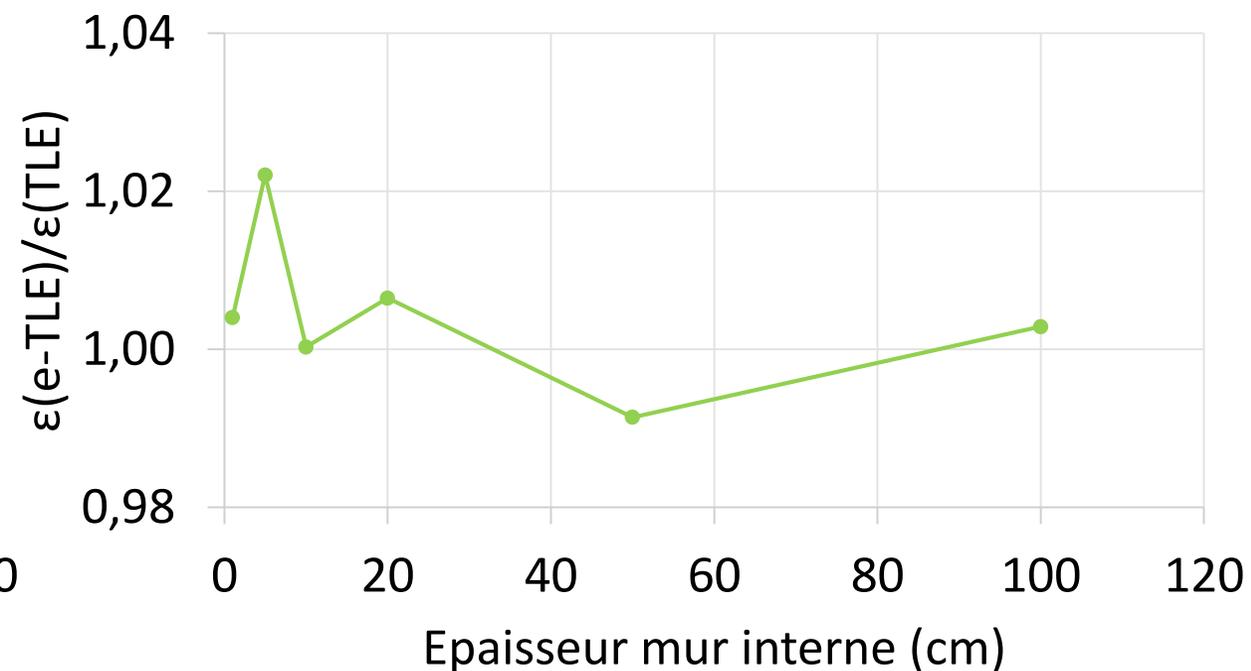
⇒ Amélioration des performances (jusqu'à x2.5) avec l'e-TLE

2^{ème} étude paramétrique : utilisation de l'AMS avec attracteur géométrique de type ligne

Comparaison du score obtenu
par les deux estimateurs

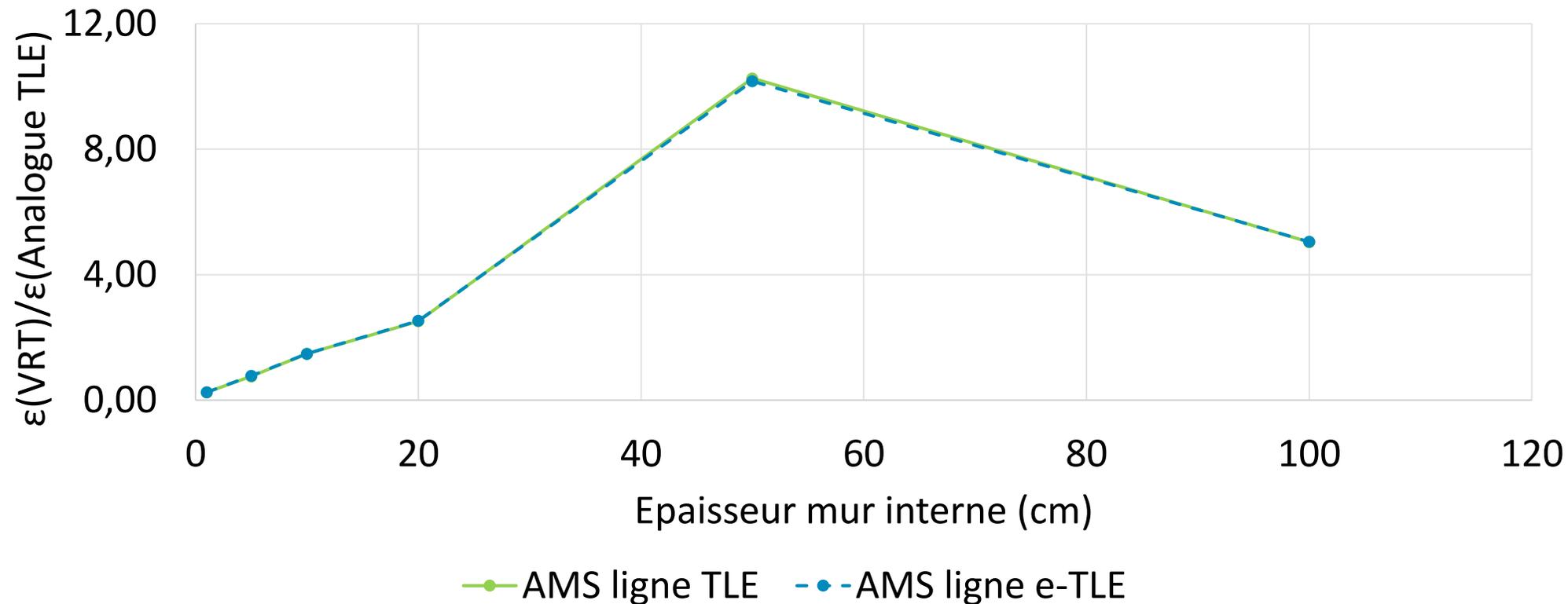


Comparaison de l'efficacité
obtenue avec les deux estimateurs



⇒ Pas d'amélioration notable des performances avec l'e-TLE

2^{ème} étude paramétrique : utilisation de l'AMS avec attracteur géométrique de type ligne

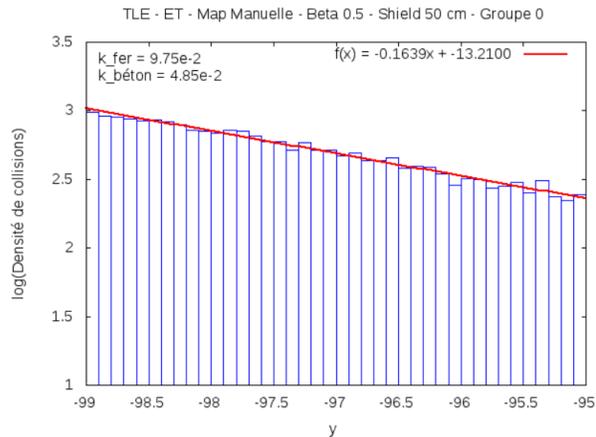


⇒ Amélioration des performances (jusqu'à x11)
avec l'AMS ligne quelque soit l'estimateur

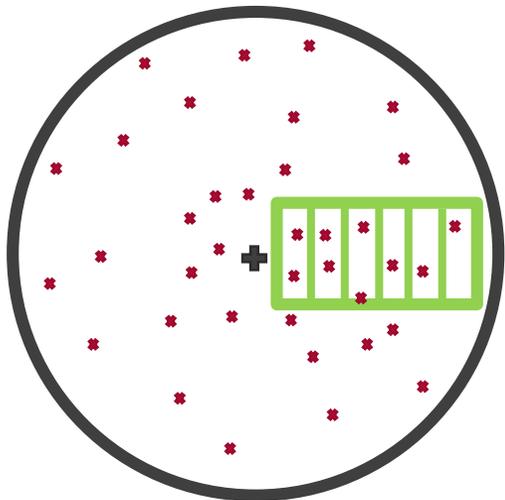
► Résultats de l'étude

***Mise en œuvre de l'ajustement des cartes
d'importance***

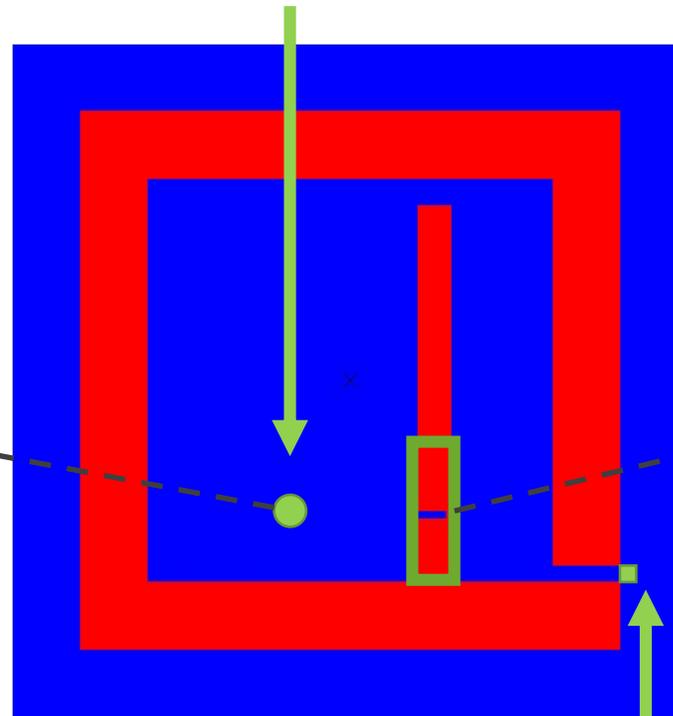
Evolution logarithmique des collisions dans les milieux non vides pour une carte d'importance non ajustée



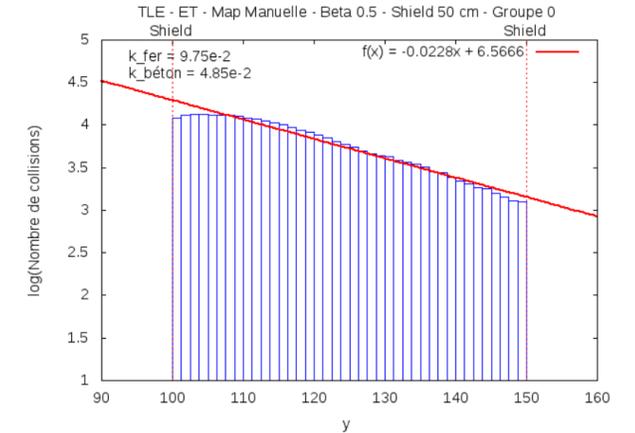
Zone de comptage des collisions dans la boule en fer



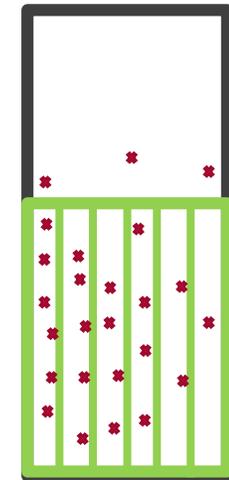
Source isotrope dans la boule en fer



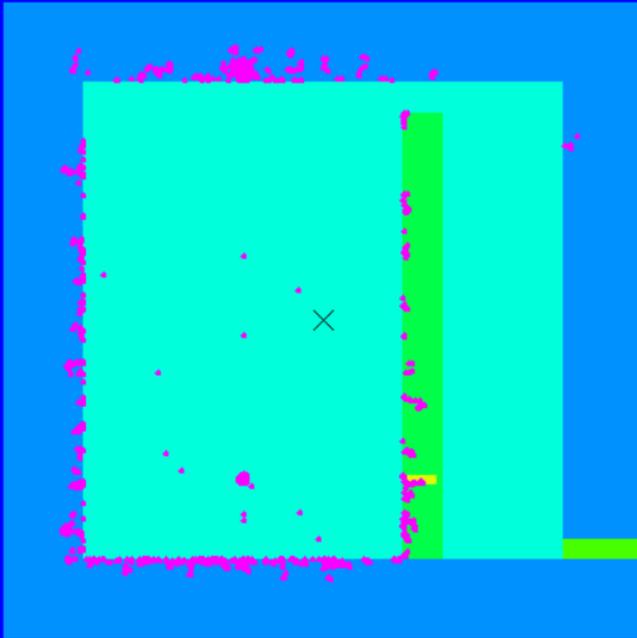
Détecteur



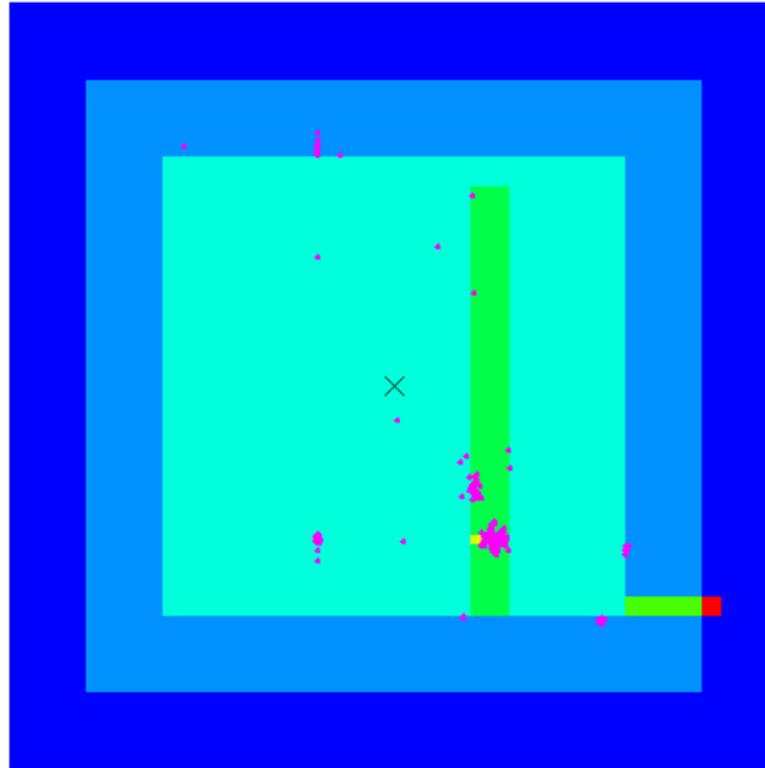
Zone de comptage des collisions en bas du mur interne en béton



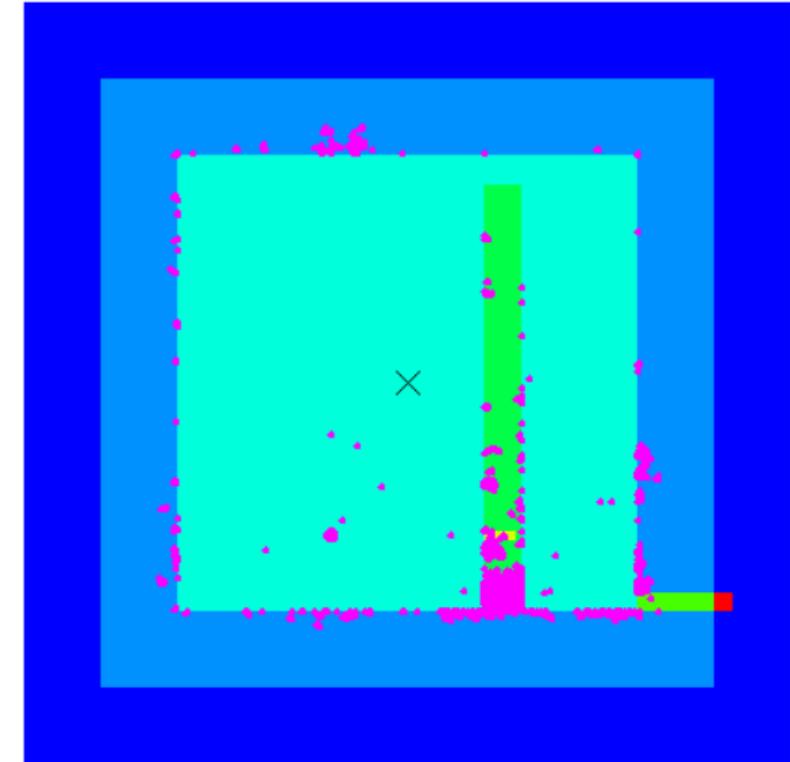
Collisions des particules avec ou sans cartes d'importance (non ajustées)



Analogue



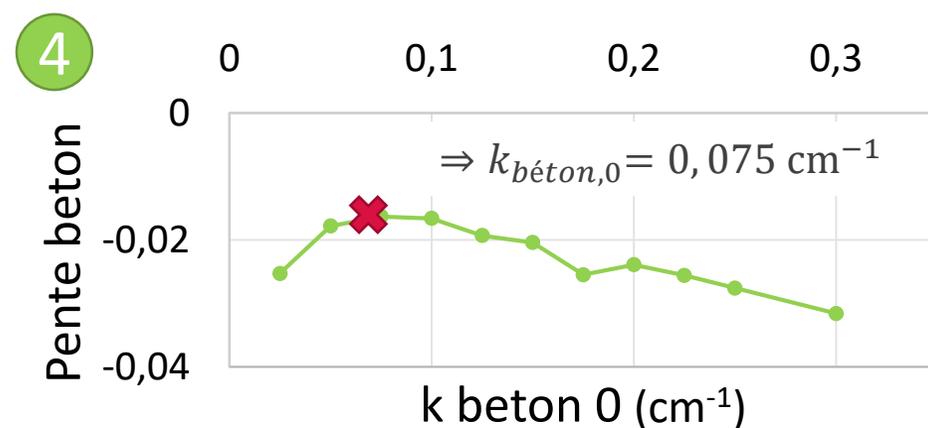
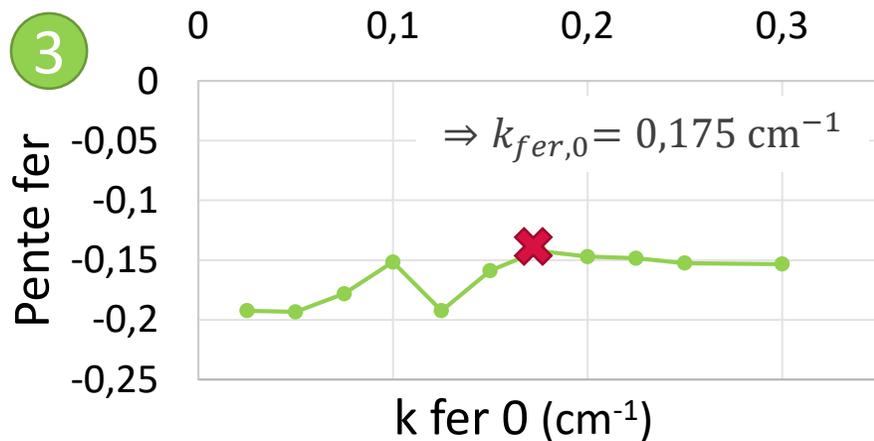
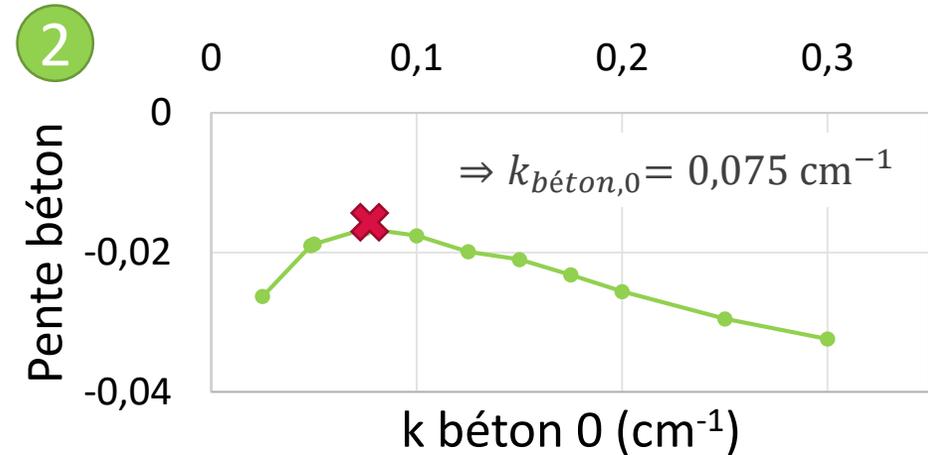
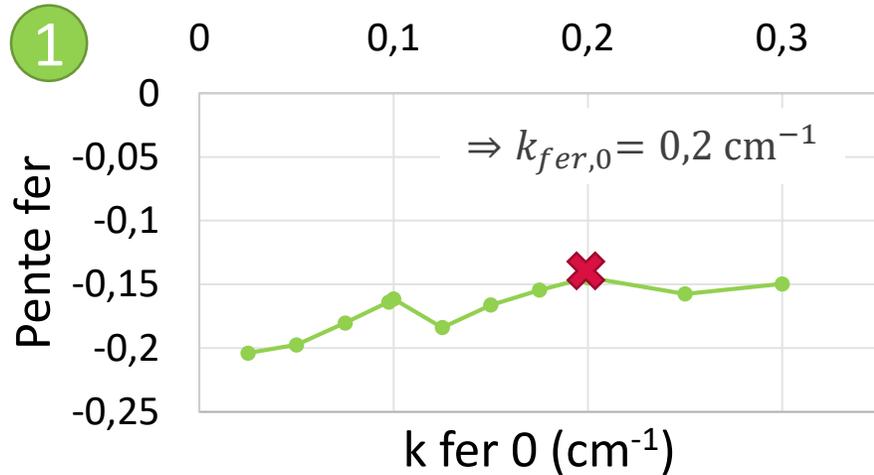
Transformée exponentielle



AMS map

1 batch de 100 particules visualisé

Ajustement des coefficients de Placzek du béton et du fer du groupe d'énergie 0 (le plus élevé)

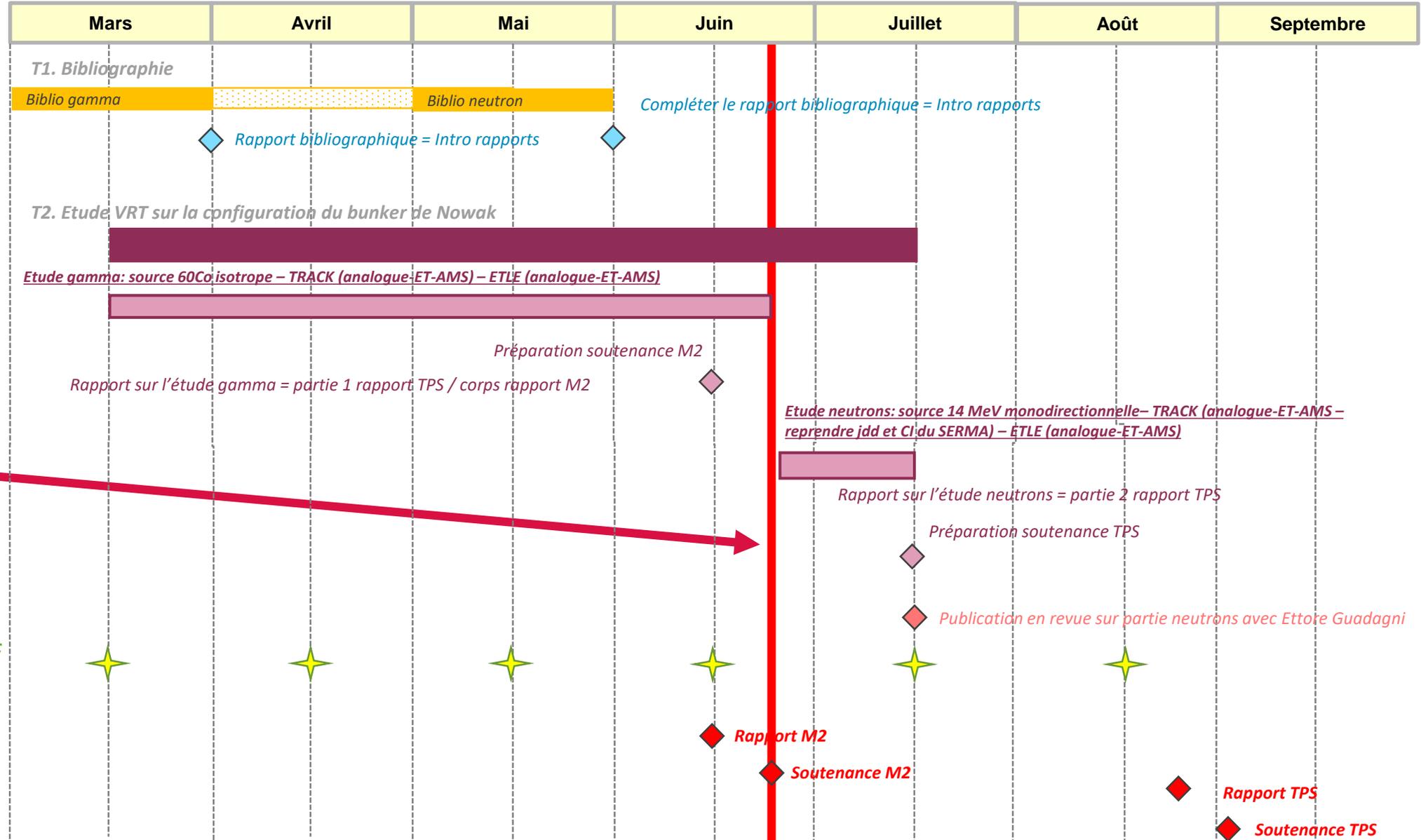
Valeurs initiales : $k_{fer,0} = 0,0975 \text{ cm}^{-1}$ et $k_{béton,0} = 0,0485 \text{ cm}^{-1}$ 

► Où en suis-je ? Qu'est-ce qu'il est prévu par la suite ?

Calendrier & Perspectives



Points avancement avec
présentation à l'appui

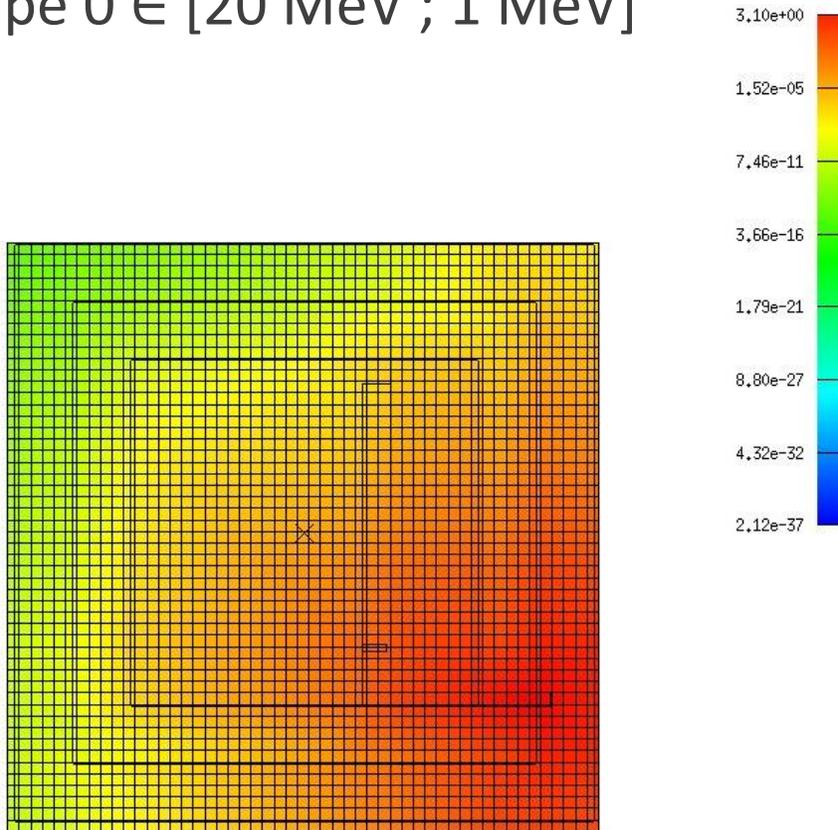




Merci de votre attention !
Avez-vous des questions ?

Génération automatique des cartes d'importance

Groupe 0 $\in [20 \text{ MeV} ; 1 \text{ MeV}]$



Groupe 1 $\in [1 \text{ MeV} ; 0.5 \text{ MeV}]$

