

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Codes de calculs de radioprotection : lesquels et pourquoi ?

Tutoriale T9

SFRP - Lille 7, 8 & 9 Juin 2017

S. Vecchiola (IRSN/PRP-HOM/SER/BERAP)

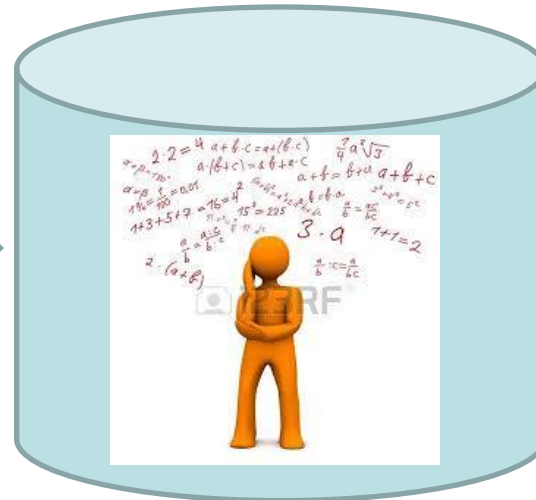
J. Bez (IRSN/PRP-HOM/SER/BERIN)

Importance du choix du code?

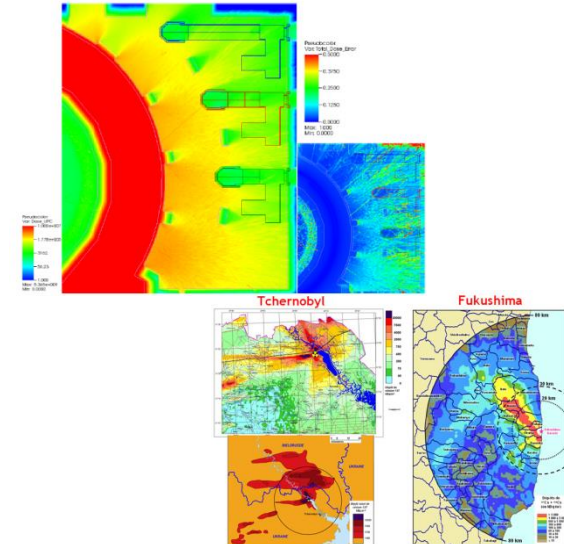
Situation d'exposition



Utilisation d'un outil ou d'une méthode de calcul



Evaluation du niveau d'exposition ou du dimensionnement d'une protection



- Complexité du problème à résoudre
- Précision sur le résultat
- Temps imparti...

VS

- Limites de validité des codes

Sommaire

■ Rejets dans l'environnement

- Différentes familles de codes
- Limites des codes
- Synthèse

■ Sources fixes

- Différentes familles
- Limites de chaque famille
- Comparaison
- Réflexions à avoir

■ Conclusion

Radioprotection liée aux rejets dans l'environnement



Evaluation d'impact : approche générale

Rejet

- Radionucléides
- Activités rejetées
- Formes physico-chimiques
- Temporalité

Description de l'environnement local

- Environnement naturel
- Population locale
- Agriculture
- Economie

Exposition de l'environnement

- Identification des voies d'atteintes de l'environnement
- Identification des compartiments
- **Calcul de la dispersion**
- **Calcul des transferts**

Evaluation de la dose

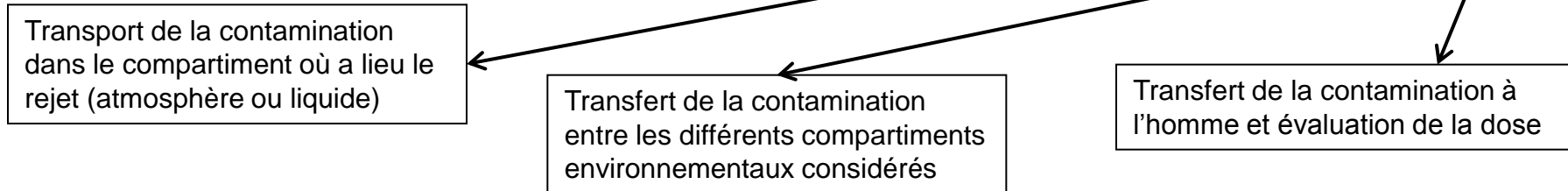
- Identification des personnes de référence
- Identification des voies d'exposition
- **Calcul des doses / voies d'exposition**
- **Somme des contributions à la dose**

Surveillance de l'environnement

- Mesures
- Echantillonnage
- Localisation
- Fréquences

Famille de code ?

➤ Une évaluation d'impact = dispersion + transfert + impact



Code « tout en un »

Famille de code = manière dont sont résolues les équations différentielles caractérisant l'évolution du niveau de contamination dans les compartiments (pour cet exposé)

Code dédié à un élément du calcul

- Pour répondre à un besoin spécifique
- Attention particulière à apporter aux interfaces entre les codes (compatibilité entre valeurs de sorties et d'entrées)

Codes dits « à l'équilibre »

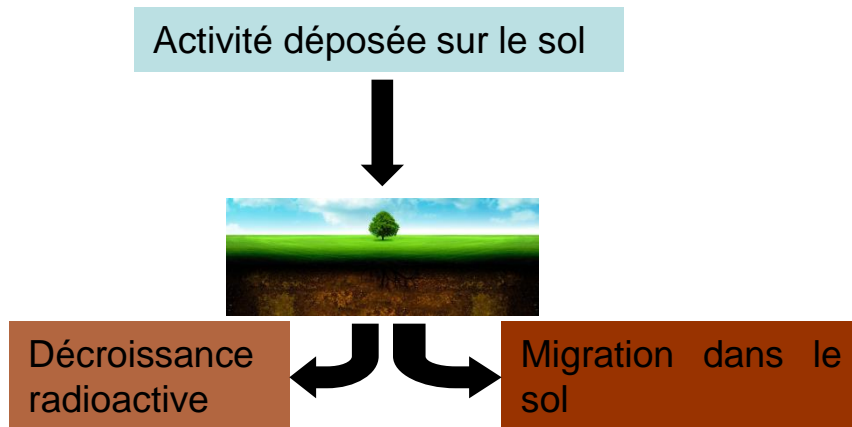
➤ Principe

- Résolution des équations différentielles de manière **statique** : **Equilibre** de la contamination atteint dans le compartiment considéré.

$$\frac{dA_{sol}}{dt} = \frac{DD_{moyen}}{\rho_{sol} \cdot P_{racinaire}} - (\lambda_{migration} + \lambda_r) \cdot A_{sol}$$

$$\frac{dA_{sol}}{dt} = 0$$

$$A_{sol} = \frac{DD_{moyen}}{(\lambda_{migration} + \lambda_r) \cdot \rho_{sol} \cdot P_{racinaire}}$$



Codes dits « à l'équilibre »

➤ Quand utiliser ces codes :

- Situation de rejets chroniques : temps nécessaire pour atteindre l'équilibre
- Rejets atmosphériques et liquides
- Screening ou expertise pour des cas simples (rejet plateau)

➤ Exemple de codes disponibles (liste non exhaustive)

- AIEA porte le développement de ce type de code : CROM (téléchargeable gratuitement)

Codes dits « analytiques »

➤ Principe

- Résolution des équations différentielles de manière **analytique** : **l'équilibre** de la contamination **n'est pas atteint** dans le compartiment considéré.

$$\frac{dA_{sol}}{dt} = \frac{DD_{moyen}}{\rho_{sol} \cdot P_{racinaire}} - (\lambda_{migration} + \lambda_r) \cdot A_{sol}$$

Activité déposée sur le sol



Décroissance
radioactive

Migration dans le
sol

$$\frac{dA_{sol}}{dt} \neq 0$$

$$A_{sol} = \frac{DD_{moyen} \cdot (1 - e^{-(\lambda_{migration} + \lambda_r)T})}{(\lambda_{migration} + \lambda_r) \cdot \rho_{sol} \cdot P_{racinaire}}$$

Codes dits « analytiques »

➤ Quand utiliser ces codes :

- Situation de rejets accidentels
- Rejets atmosphériques
- Screening ou expertise dans des cas simples (rejets ponctuels)

➤ Exemple de codes disponibles (liste non exhaustive)

- RODOS (développé au travers de projets européens)
- ASTRAL (développé par l'IRSN)

Codes dits « flexibles »

➤ Principe

- Résolution des équations différentielles par des solveurs dédiés
- Possibilité d'adapter (ou de développer) des modèles appropriés en fonction des besoins

➤ Quand utiliser ces codes

- Rejets complexes (ensemble de pics ou de plateaux de contamination)
- Rejets atmosphériques et liquides

➤ Exemple de code (liste non exhaustive)

- Plate-forme Symbiose (développé par l'IRSN et EDF)
- Plate-forme FRAMES (GENII) développée par un consortium d'agences des Etats-Unis

Limites de ces codes ?

➤ Dispersion

■ Résolution spatiale

- Directement dépendante du modèle de dispersion utilisé
Par ex : limite de validité du panache gaussien pour un rejet au sol ≈ 100 m
- Dépendante de l'orographie considérée (classe de stabilité, présence de bâtiments)

■ Réalisme des dépôts

- Directement dépendant de la forme physico-chimique du radionucléide rejeté et des données disponibles pour les vitesses de dépôt sec et les constantes de lavage
- Temporalité des rejets
- Dépendant du type d'orographie considérée (rugosité des surfaces)



➤ **Maîtrise du terme source, conscience des limites des modèles utilisés et des paramètres utilisés**

Limites de ces codes ?

➤ Transfert

I Incertitude sur les transferts

- Manque de données disponibles et fiables sur les paramètres liés aux transferts : données issues de mesures expérimentales
- Standardisation des données environnementales pour être facilement intégrables dans les codes
- Disponibilité de modèles propre au transfert de certains RN particuliers (^3H , ^{36}Cl , ...)

I Voies d'atteintes accessibles

- Cohérence entre les voies d'atteintes disponibles dans le code et contraintes liées au cas d'étude (par ex : transfert transcutané pour le ^3H ...)



➤ Conscience des limites des modèles utilisés et des paramètres utilisés

Limites de ces codes ?

➤ Impact

I Incertitudes sur les modes de vie

- Standardisation des données des enquêtes alimentaires locales (quantité ingérée, autoconsommation, ingestion par inadvertance ...)
- Adaptation locale des budgets temps

I Disponibilité des coefficients de dose

- Adaptés à la forme physico-chimique des composés (par ex : ^{18}F)
- Adaptés à toutes les voies d'exposition (par ex : inhalation et ingestion pour ^{13}N)
- ...



➤ Conscience des limites des modèles utilisés et des paramètres utilisés

Limites de ces codes ?

➤ Temps de calcul

I Types de modèle utilisé pour la dispersion

- Plus le modèle utilisé est complexe et le volume des paramètres d'entrée est important et plus le calcul sera long

I Famille de codes

- Calculs réalisés par les deux premières familles sont quasi-instantanés
- Calculs réalisés sur les plateformes flexibles peuvent prendre plus de temps (jusqu'à quelques heures)



➤ Adapter la famille de codes en fonction du délai de réponse attendu

Quid des résultats ?

➔ Estimer une incertitude ?

Incertitude paramétrique par tirage au sort des entrées, données ou paramètres dans des lois de distribution (calculs probabilistes de types Monte Carlo)

➔ Réaliser une étude de sensibilité ?

Evaluer la sensibilité de la dose par rapport à certains paramètres

➔ Compte tenu de l'ensemble des limites associées à l'évaluation d'impact : les résultats sont à considérer comme des ordres de grandeurs

Synthèse

➔ **Le code parfait n'existe pas !**
Le choix du code doit se baser sur :

■ **La question posée :**

- Le délai pour lequel la réponse est attendue
- Le niveau de réponse attendue

■ **Les données d'entrée :**

- Le type de données disponibles pour répondre à la question posée
- La qualité de ces données

■ **L'enjeu (radiologique, sociétal ...) :**

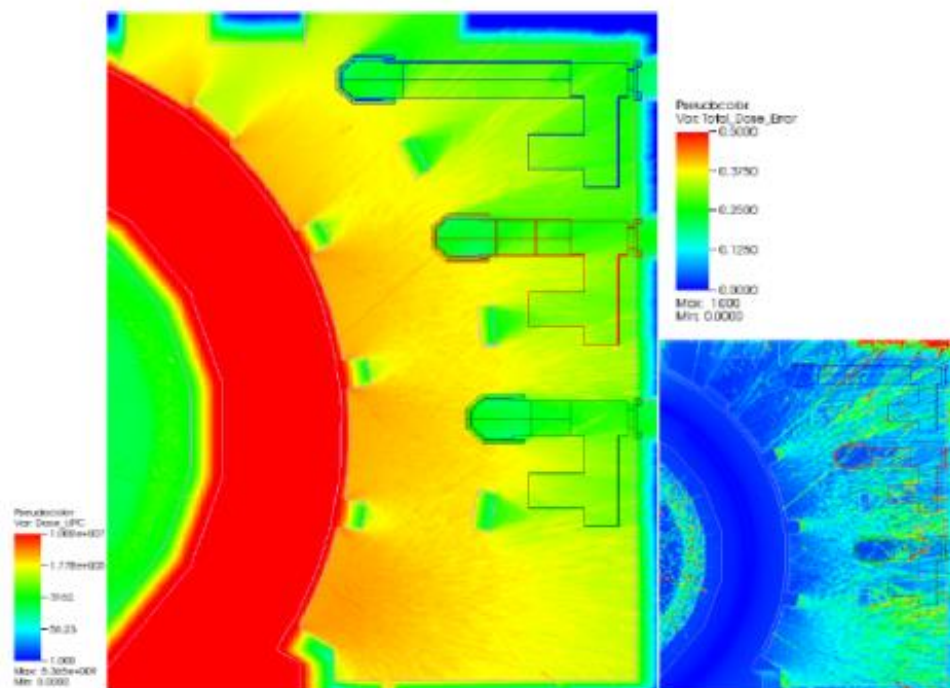
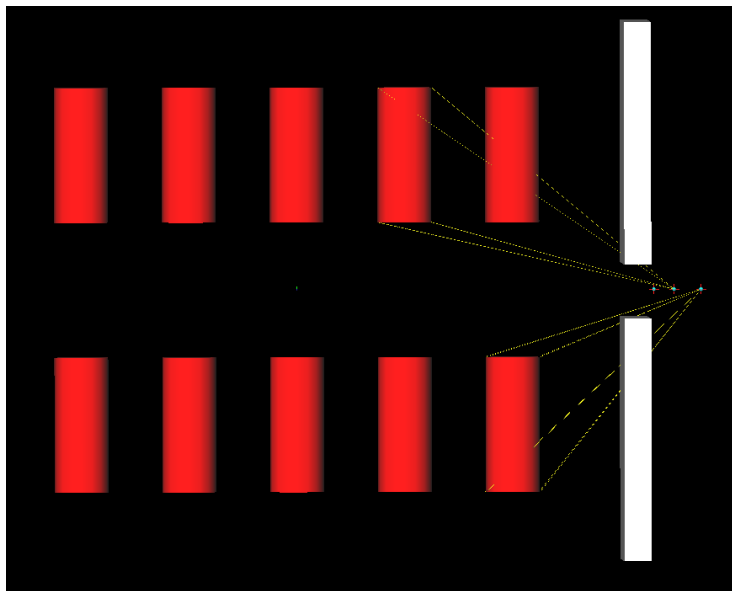
- Le raffinement nécessaire à faire sur le calcul

➔ **Toujours garder à l'esprit les simplifications faites et leurs limites !!!**

*Non mais
c'est pas possible*



Problématiques de sources fixes



Problématiques de sources fixes

➤ Catégorisation des problèmes

■ Estimation de source

- Filiation/décroissance
- Activation neutronique (voir protonique)

■ Transport de rayonnements et atténuation

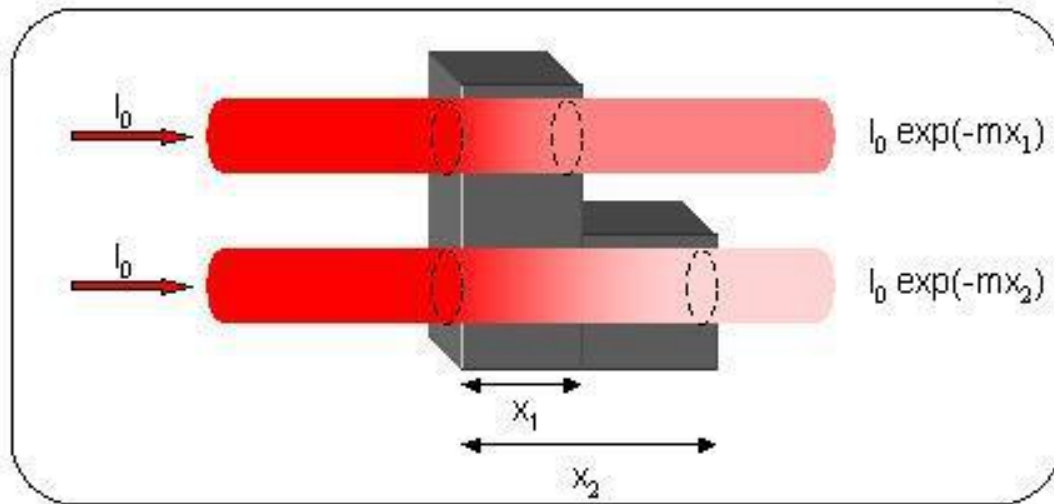
- Atténuation en ligne droite
- Approximation semi-numérique
- Méthode Monte-Carlo

Atténuation en ligne droite

➤ Principe

■ Modèle physique :

- Parcours des photons dans la matière suit une loi d'atténuation exponentielle
- On peut trouver un modèle similaire pour les neutrons (removal cross section) mais non décliné en code de calcul



Atténuation en ligne droite

➤ Limites du modèle

■ Modèle approprié pour écran mince

- Car diffus non pris en compte

■ Comment pallier à ça ?

- Utilisation du facteur d'accumulation (Build-up ou BU pour les intimes)
- Pour rappel les formules de BU, ne sont que des modèles approchés

$$R(E) = F_c(E) \cdot B(R, E, \mu(E) \cdot x) \cdot \frac{S(E)}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot e^{-\mu(E)x}$$

Conversion flux/dose
CIPR 74
par ex.

Build-up

Flux à la distance d

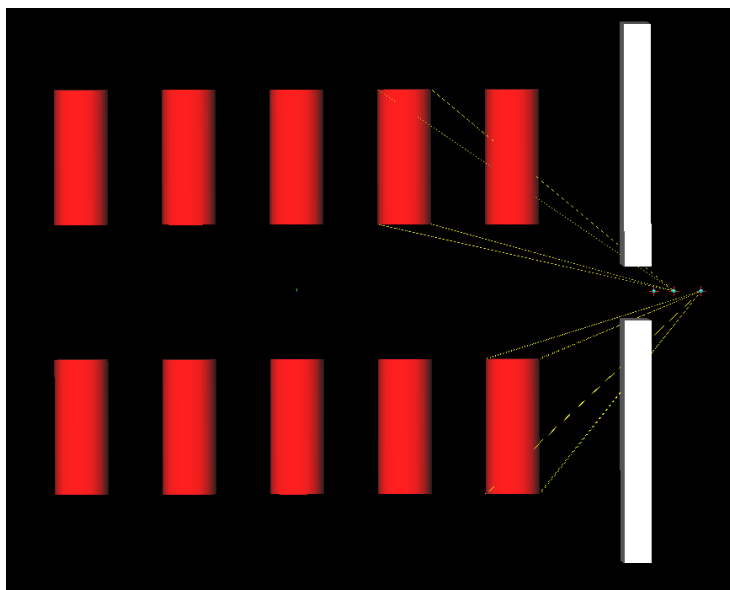
Atténuation

Atténuation en ligne droite

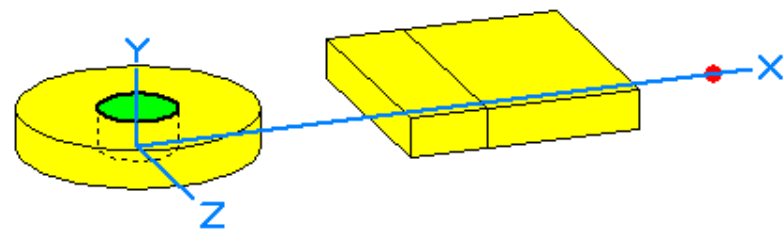
➤ Exemples de codes

■ Les codes de RP les plus connus reposent sur cette méthode :

- Coin de table !
- Mercurad
- Microshield



Sh 1	○	2	Cy
Sh 2	⊙	3	Tr
Sh 3	○	2	SI
Sh 4	○	4	SI
Sh 5	○	0	SI
Sh 6	○	0	SI
Sh 7	○	0	SI
Sh 8	○	0	SI
Sh 9	○	0	SI
Sh 10	○	0	SI

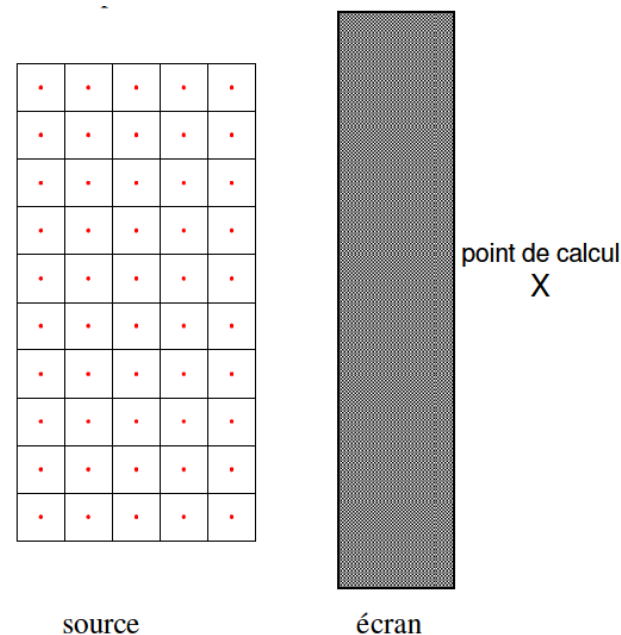


Atténuation en ligne droite

➤ Avantages

■ Avantages de ces codes par rapport au coin de table ?

- Discrétisation automatique d'un volume en plusieurs points sources
 - Auto-atténuation prise en compte
- Bibliothèque d'émissions
 - CIPR 107, 38 ...
- Calcul de BU automatique
 - +/-
- Calculs rapides
 - ~5 min (tout compris)

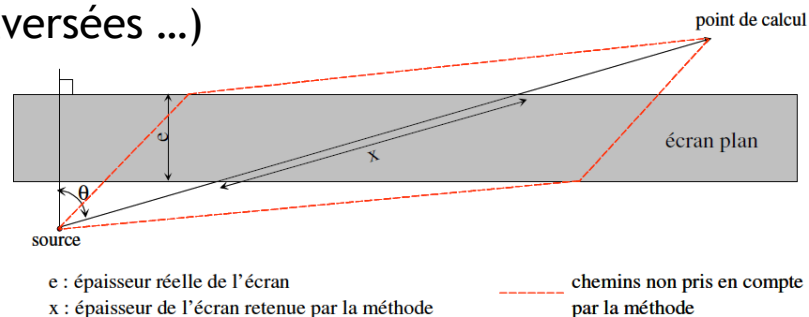


Atténuation en ligne droite

➤ Limites

- γ seulement !
- Pas d'effet de ciel
- Pas de réflexion/diffusion sur les parois environnantes
 - Sous-estimation possible du résultat
 - Négligence des contournements (traversées ...)

- Configuration limitée
 - Source -> écran -> détecteur



- En cas de source désaxée : sous-estimation possible

Atténuation en ligne droite

➤ Différences non-exhaustives entre ces deux codes

■ Gestion du BU

- Choix utilisateur vs multi-écrans

■ Bibliothèque des RN

■ Discrétisation de la source

■ Réponses possibles

■ Sortie +/- rapide du domaine de validité

Approximation semi-numérique

➔ Principe

- Transport de particules régi par l'équation de Boltzmann :
Différentielle (t, v) & intégrale (E, Ω)

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi(\mathbf{r}, E, \Omega, t)}{\partial t} = -\Omega \nabla \Phi(\mathbf{r}, E, \Omega, t) - \Sigma_t(\mathbf{r}, E, \Omega, t) \Phi(\mathbf{r}, E, \Omega, t) + \left[\int_0^\infty dE' \int \int_{4\pi} d^2\Omega' \Phi'(\mathbf{r}, E', \Omega', t) \right] + P(\mathbf{r}, E, \Omega, t) + Q(\mathbf{r}, E, \Omega, t)$$

Flux

Production (fission)



Approximation semi-numérique

➤ Principe

- Résolution de l'équation de Boltzmann au point désiré :
 - Connaître les populations (ou le flux) en chaque point
 - Être doué en maths
- Formes simplifiées : symétrie
 - Ω ne dépend plus que de Θ (angle entre directions)
- Hypothèses simplificatrices :
 - ϕ varie linéairement entre les Ω
- Recours aux polynômes de Legendre de degré N
- Calculs aux ordonnées discrètes (méthode Sn)
 - On ne considère qu'un ensemble limité de direction Ω

Approximation semi-numérique

➤ Principe à retenir

- En plusieurs points de l'espace, le flux est calculé par intégration numérique
- On en déduit une valeur moyenne



Approximation semi-numérique

➤ Limites du modèle

- Essentiellement de la 1D
 - Sphère ou cylindre (axial ou radial)
- On trouve tout de même des déclinaisons 2D/3D
- Pas d'effet de ciel
- Pas de réflexion/diffusion sur les parois environnantes
 - Sous-estimation possible du résultat
 - Négligence des contournements (traversées ...)
- Méthode limitée aux particules neutres : n et γ
- Calcul par groupes d'énergies

Approximation semi-numérique

➤ Exemples de codes

- SCALE/SAS1

- SN1D

- TWODANT

- DORT

Approximation semi-numérique

➤ Limites d'utilisation

■ Géométrie limitée

- Source -> écran -> détecteur

■ Calculs par groupes d'énergie

- Pré-traitement (manuel ? Autre code ?)

■ Pas d'IHM

- JDD au format texte

■ Taille des mailles à réfléchir avec attention

Méthode Monte-Carlo

➤ Principe

- Transport de particules régi par l'équation de Boltzmann
- Et si au lieu de la résoudre, on approchait la solution ?
- Par expérience ?
- Par simulation numérique ?
- Ok, mais on simule quoi ?
- TOUT !



Méthode Monte-Carlo

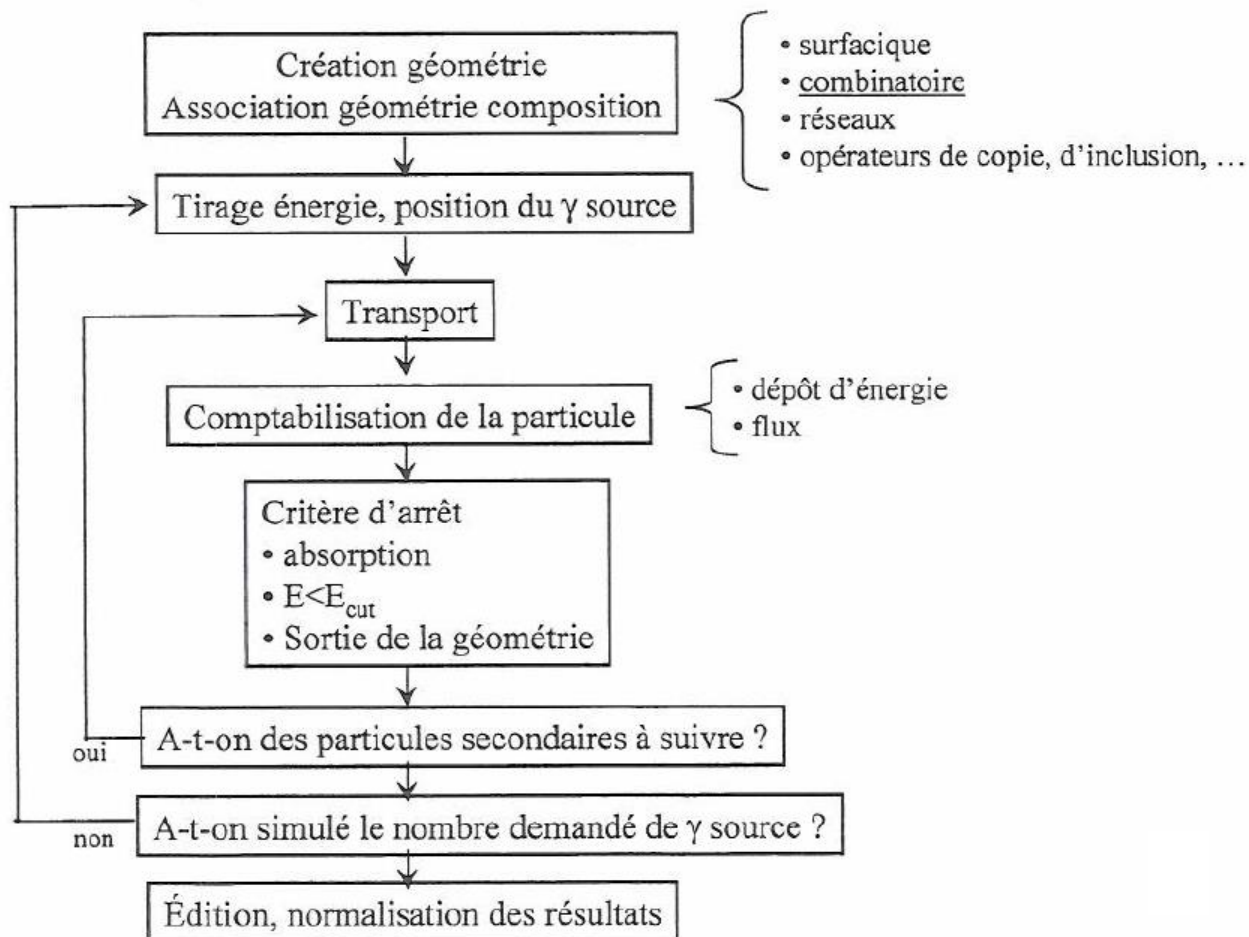
➤ Principe

- On va simuler la vie des particules qui nous intéressent de leur naissance à leur mort
- La nature de chaque événement est déterminée par tirage aléatoire
 - Lieu de l'événement
 - Type d'événement (diffusion, absorption, fission ...)
 - Résultantes de l'événement (énergie, direction, particule secondaire ?)
- À la fin, on comptabilise tout ce qui nous intéresse (nombre de particules dans un volume, dépôt d'énergie, directions ...)

Méthode Monte-Carlo

➤ Principe

Algorithme schématique



Méthode Monte-Carlo

➤ Limite de la méthode

■ Théoriquement ? Aucune !

- Prise en compte de tous les phénomènes physiques (ou non)
- Prise en compte des réflexions, diffusions ...
- Prise en compte des particules secondaires, tertiaires...
- Du micron au km
- De l'eV au GeV
- Toutes les particules : n, γ , e⁻, e⁺, muons, baryons, ions légers, ions lourds ...

■ Dans les faits ?

- Limitation par la puissance de la machine et par le temps imparti
Par ex : 1 calcul peut mettre en jeu facilement jusque 1H.an
- Sauts de convergence



Méthode Monte-Carlo

➤ Limite de la méthode

■ Pourquoi ?

■ La création du jdd : rébarbative et fastidieuse (si pas d'IHM)

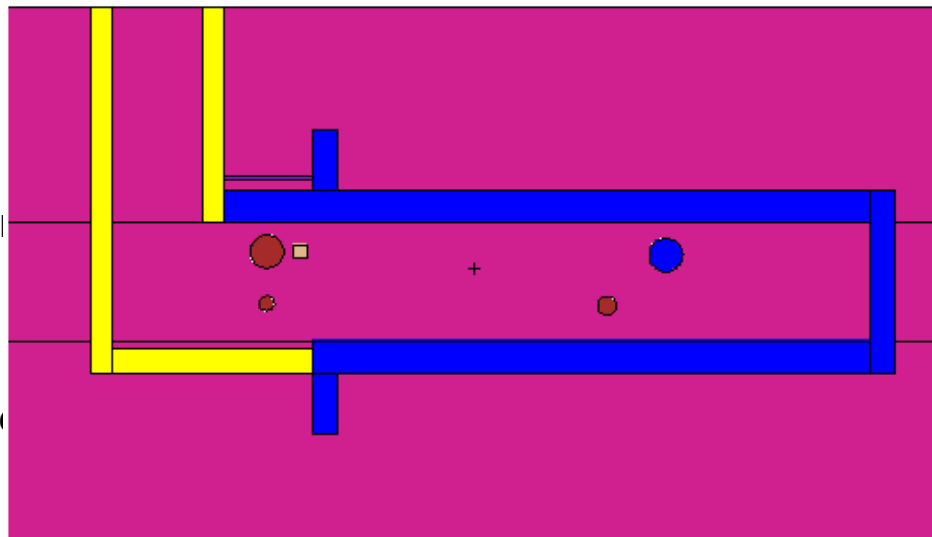
- Très souvent en ligne de code
- Source d'erreurs (nombreuses inattentions)
- Implication immense pour des choses simples

■ La simulation :

- Longue, ou très longue
- Fichier de 600 lignes pour modéliser le problème
- De 5 min à 5 h ? 5 j ? 5 semaines ?

■ Le post traitement

- Souvent, le résultat est donné



Méthode Monte-Carlo

➤ Limite de la méthode

- Le temps. Ex :
- Protection d'acier de 60 cm
 - Atténuation de $5 \cdot 10^{-12}$
- Il faut simuler $2 \cdot 10^{11}$ particules à la source, pour 1 sortant de la protection
- Atteinte des limites du code
 - En situation analogue
- Nécessité de biaiser le calcul
 - Beaucoup de temps humain peut être nécessaire afin de diminuer le temps machine.

Méthode Monte-Carlo

➤ Exemple de codes

■ Liste non exhaustive des codes utilisant cette méthode :

- MCNP
- Tripoli
- RayXpert
- Géant
- Fluka
- ...

Méthode Monte-Carlo

➤ Différences entre ces codes

- Présence d'une IHM ou non ? (RayXpert vs les autres)
- Particules simulées
 - certains ne font que γ et n
- Domaines énergétiques couverts
 - Domaine usuel RP
 - Domaine étendu pour la R&D (GeV, TeV voir PeV pour Fluka)
- Types de réponses
 - Réponses basiques de RP
 - Réponses multiples mais à post-traiter

Méthode Monte-Carlo

➤ Résumé

- On peut tout faire avec, mais :
- Sous réserve de temps suffisant
- Est-ce bien approprié aux enjeux ?

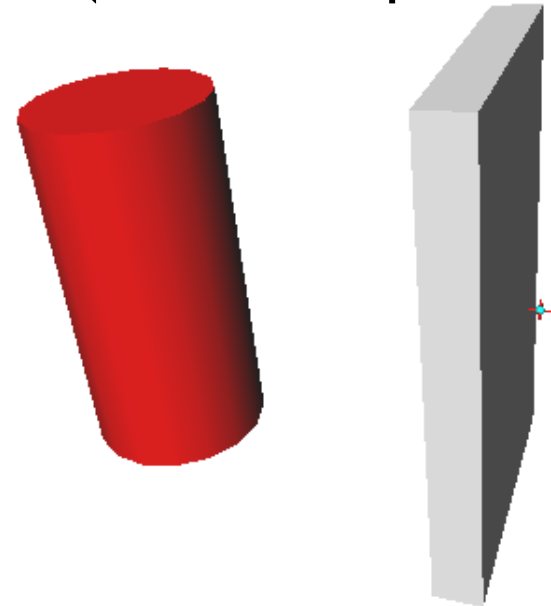


- Comparaison entre familles de codes :

Comparaison inter-familles

➤ Exemple

- 1 source d'eau contaminée (100l à 1GBq de ^{60}Co)
- Dans un cylindre en acier (3 mm d'épaisseur)
- Derrière une protection en béton (10 cm d'épaisseur)
- DED derrière ?



Comparaison inter-familles

➤ Exemple

	Temps de modélisation (min)	Temps de simulation (min)	Résultat (mGy/h)	Erreur de convergence
Mercurad	3,5	0,5	0,160	0,3%
Microshield	3,5	0,5	0,137	-
MCNP	20	15	0,122	3,9 %
RayXpert	15	15	0,144	6,9 %
		45	0,134	4,1 %
Delacroix + littérature	5	0	0,144 (CDA _{1/10})	-
			0,152 (CDA _{1/2})	-

Comparaison inter-familles

➤ Résumé

■ Chaque famille de codes a son utilité

	Ligne droite	Sn	Monte Carlo
Facilité d'utilisation	X		
Rapidité de création du jdd	X		
Rapidité d'exécution	X	X	
Exploitation aisée du résultat	X	X	
Polyvalence de réponses			X
Prise en compte de tous les phénomènes			X
Simulation au plus proche de la réalité			X
γ	X	X	X
n		X	X
Autres (e ⁻ / e ⁺ / p ...)			X

Discussion générale

➤ Données de base

- Ok, le besoin détermine la famille de codes à utiliser
- On sait ce que chaque famille de codes peut donner comme résultat et comment c'est fait.
- Mais sur la base de quelles données ?

	Ligne droite	Sn	Monte Carlo
Composition des matériaux	Éditeur/utilisateur	Utilisateur	
Coeff de conversion flux/dose	Éditeur		Utilisateur
BDD émissions	Éditeur	Utilisateur	
Sections efficaces	Éditeur		Utilisateur

Discussion générale

➤ Conclusion

- Certains codes peuvent tout faire et d'autres non
 - Enjeux en adéquation avec les moyens ?
- Certains codes ont des domaines de validité restreints
 - Modélisation toujours valide ? (traversées, point éloigné ...)
- C'est à l'utilisateur de se poser ces questions
- Il doit être critique envers le choix du code
- Il doit être critique envers les résultats
 - Bug, inattention sur le jdd
- Il doit se faire vérifier

Conclusion générale

À chaque problème, sa solution.

À chaque solution, son code.

À chaque code, ses problèmes ...

