

Journée thématique de l'ARRAD 2019

Lausanne, 10.01.2020

Surveillance de la dosimétrie interne pour les radionucléides conventionnels et exotiques

Siria MEDICI, Andreas PITZSCHKE, Laurent DESORGHER,
Pierre CARBONEZ, Jérôme DAMET, François BOCHUD

CERN & Institut de Radiophysique (IRA/CHUV)

✉ siria.medici@cern.ch



Structure de la présentation

- **Contexte**

- Risque de contamination interne au CERN et surveillance de l'incorporation en Suisse.

- **Approche pour un programme de surveillance**

- Concept général.
- Solveur de modèles biocinétiques, caractérisation des instruments.
- Mesures vs simulations Monte Carlo et évolution des fantômes.

- **Perspectives & conclusions**

- Radionucléides exotiques et fantômes voxélisés.

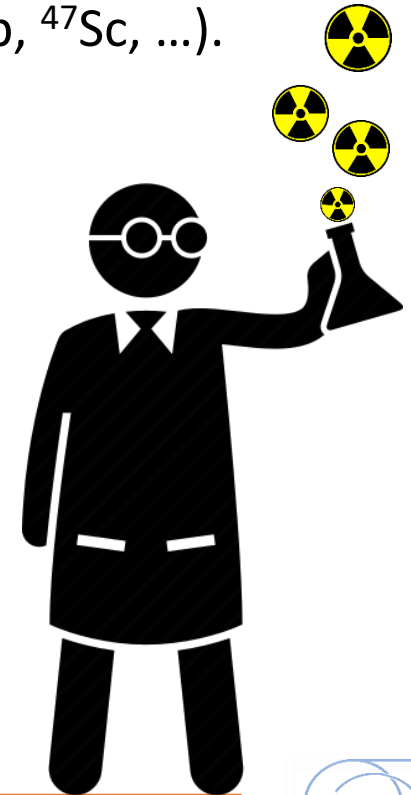
Contexte

Évènement majeur au CERN : mise en place de l'installation **CERN-MEDICIS*** (2018- ...)

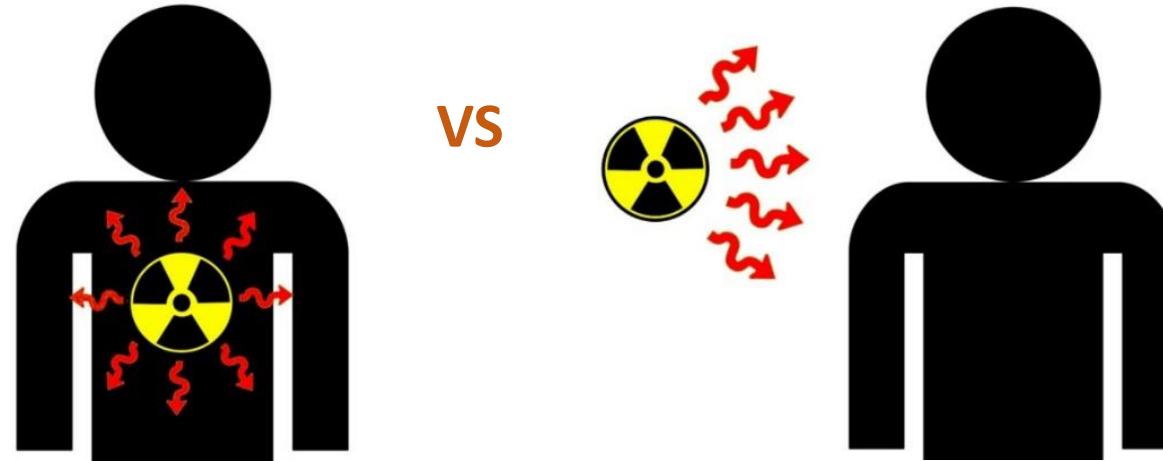
- But : production de radioisotopes pour des **applications médicales**.
- Manipulation de sources **non-scellées**, de **haute activité**, avec **demi-vie courte** (^{149}Tb , ^{47}Sc , ...).
- Radionucléides envoyés aux **centres partenaires** (CHUV, PSI, HUG,...) :
→ marquage /  dosimétrie> produits radiopharmaceutiques.

→ Augmentation du risque de **contamination interne** des travailleurs.

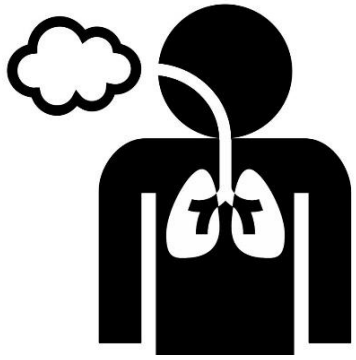
→ Mise à jour du **programme de surveillance** est nécessaire.



Contamination interne et programmes de surveillance



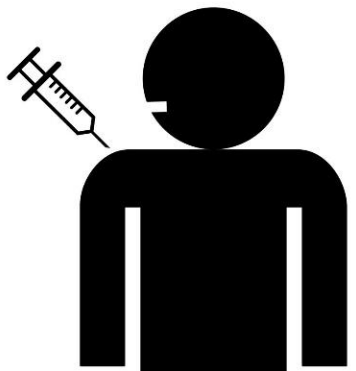
Contamination interne et programmes de surveillance



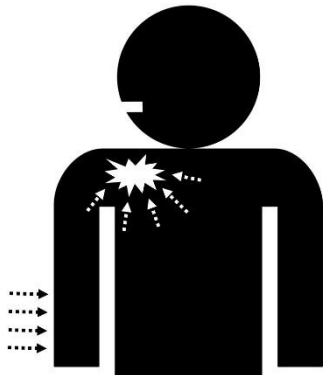
Inhalation



Ingestion



Injection

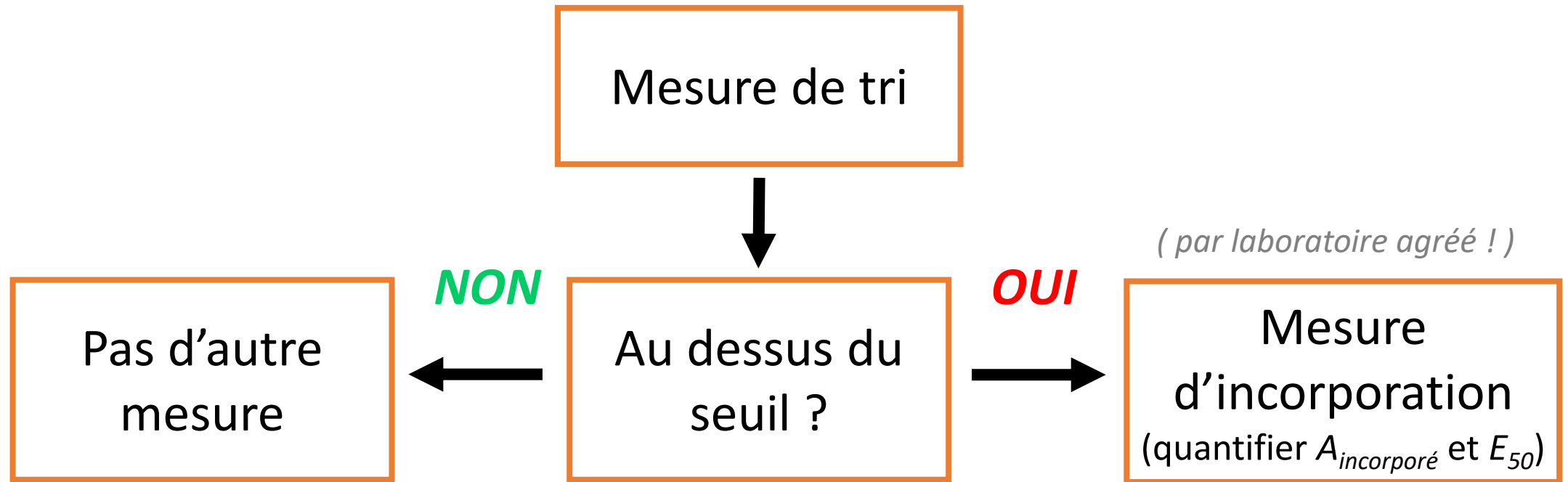


Absorption
(peau ou blessures)

- Le risque stochastique associé à une contamination interne est quantifié par la **dose efficace engagée E_{50}** (Sv).
- **Pas** de grandeur opérationnelle **directement mesurable**.
- E_{50} peut être évaluée de façon **rétrospective** par :
 - mesures **in vivo** (radiations qui sortent du corps) ;
 - mesures **in vitro** (d'un échantillon biologique).
- **Programme de surveillance** de la contamination interne vise à vérifier que* :
 - les travailleurs sont **protégés** efficacement contre le risque d'incorporation de radionucléides.
 - la protection est en accord avec les **exigences légales**.
- Le nouveau programme de surveillance du CERN s'inspire de la **règlementation suisse** (limite annuelle : **$E_{50} = 1$ mSv**).



Surveillance de la contamination interne en Suisse



- Mesure périodique, rapide & simple, (idéalement) effectuée par les travailleurs eux-mêmes avec des instruments de RP conventionnels.
- Valeur seuil → détection d'une incorporation menant à $E_{50} > 1$ mSv/an.

Adapter l'approche suisse

Définir approche **générale & pragmatique** pour implémenter des **mesures de tri *in vivo*** pour la détection d'incorporations pouvant mener à E_{50} annuelle > 1 mSv.

- Operations **ponctuelles** → **moment** de l'incorporation potentielle **connu**.
- **Rotation rapide** du personnel: mesures de tri ~~périodiques~~ → **tout de suite après l'opération**.
- Déterminer la **dose minimale détectable** associée à une mesure ponctuelle ($E_{50,min}$).
- Limiter le nombre d'opérations autorisées du travailleur, pour que $E_{50} < 1$ mSv/an.

$$E_{50,min} = AMD \cdot \frac{e_{50}}{m(T)}$$

- Activité minimale détectable (Bq).
- Instrument (limites caractéristique, efficacité).
- Fantôme.

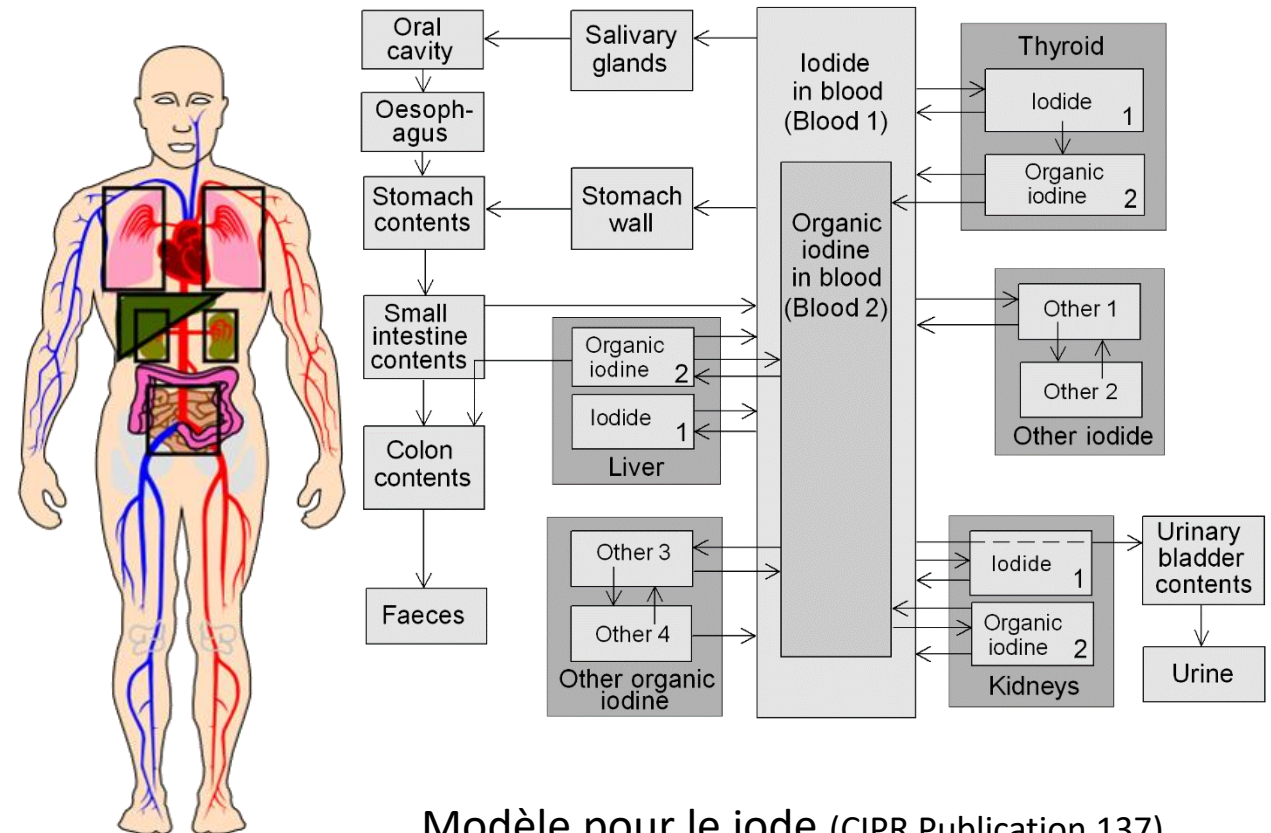
- Dose par unité d'incorporation (Sv/Bq).
- Radionucléide.
- Voie d'incorporation.
- Modèles dosimétriques.
- Fonction de rétention (Bq par Bq incorporé).
- Radionucléide, temps écoulé.
- Modèles biocinétiques.

Modèles compartimentaux

- **Approche CIPR*:**

La distribution d'une substance radioactive dans le corps peut être décrite par des modèles compartimentaux (biocinétiques):

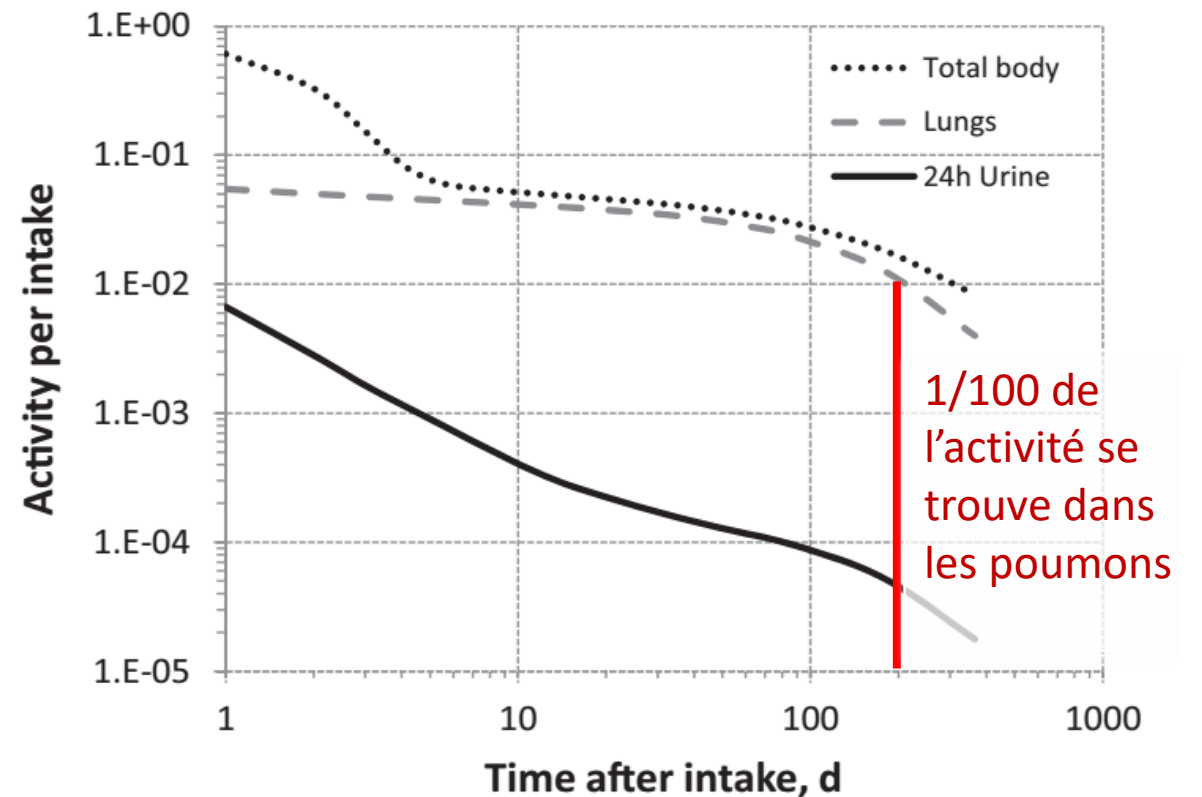
- Le corps est modélisé comme un ensemble de compartiments.
- L'échange de la substance radioactive à travers les différents compartiments est décrit par des taux de transfert.
- L'évolution temporelle de la substance suit une cinétique du premier ordre.



Modèle pour le iode (CIPR Publication 137)

Fonction de rétention/excrétion $m(T)$

- Fraction d'activité initialement incorporée qui reste / quitte un compartiment donné en fonction du temps (en Bq par Bq incorporé).
- Obtenue en résolvant les modèles biocinétiques.
- Donne des informations essentielles pour la mise en place d'un programme de surveillance.



Total body and lung contents, and daily urinary excretion of ^{60}Co following inhalation of 1 Bq Type M. (CIPR Publication 134)

Résolution des modèles biocinétiques

Objectifs:

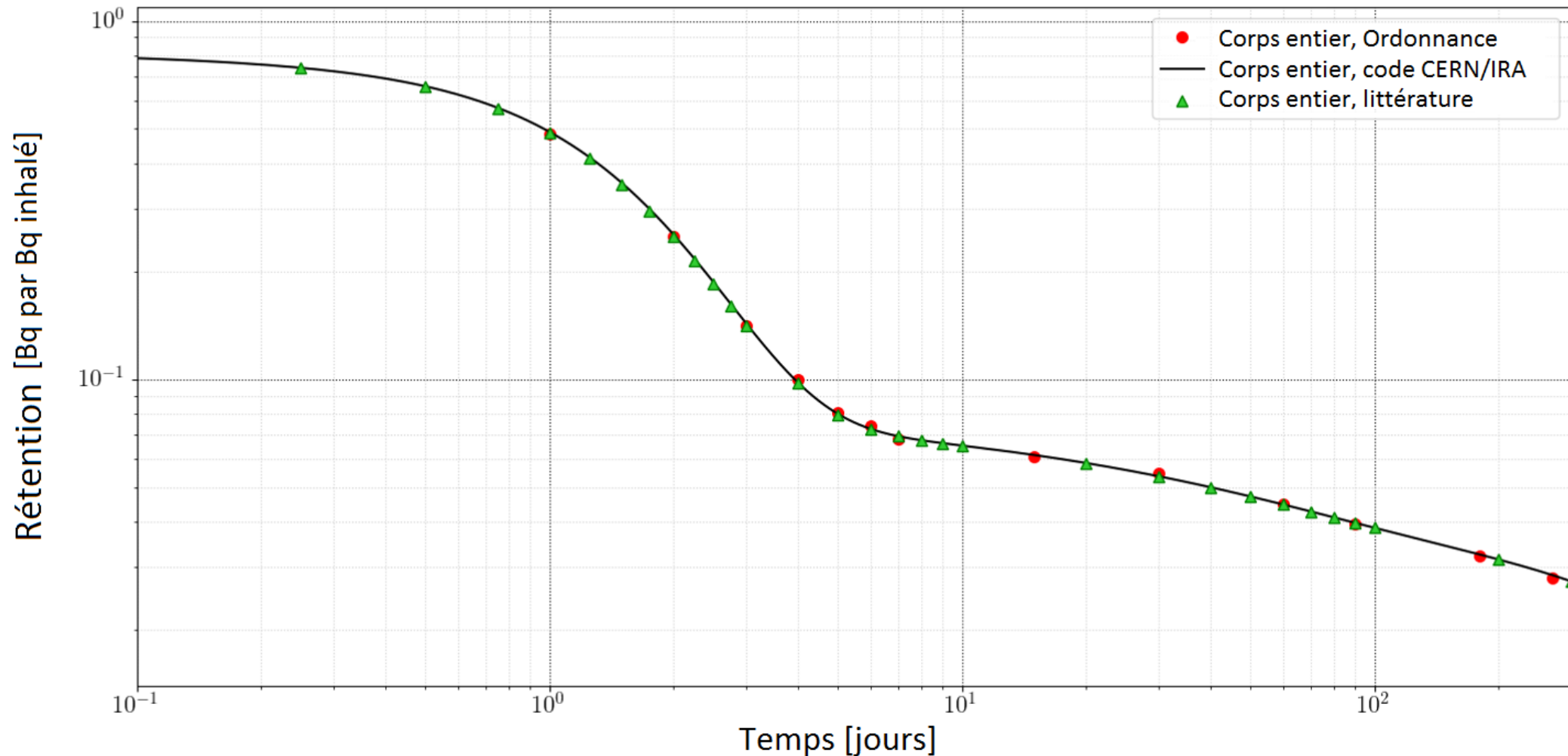
- Développer un **outil** indispensable à l'**établissement d'un programme de surveillance** *.
- Résoudre les modèles biocinétiques décrits par la CIPR et **obtenir les fonctions de rétention**.

Avantages :

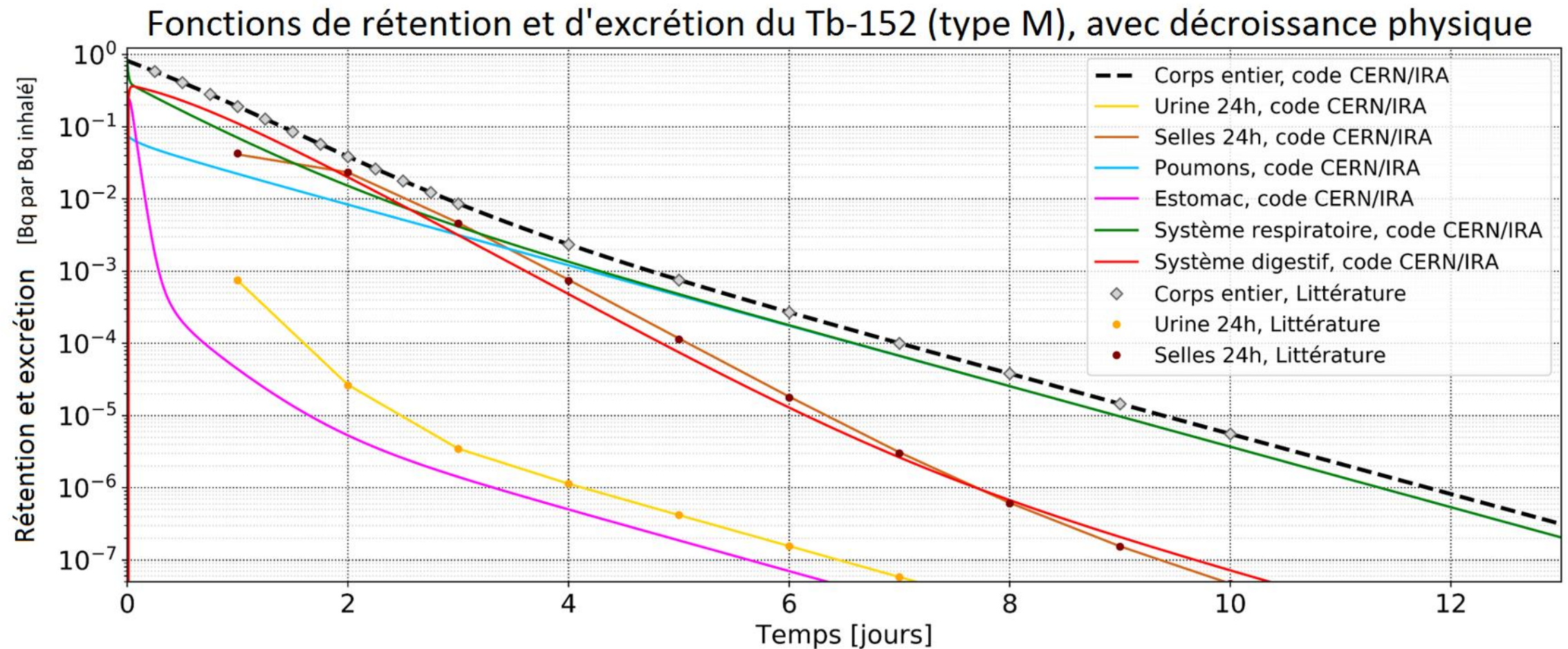
- **Flexible**, entièrement **personnalisable**.
- **Informations** plus **complètes** que des valeurs tabulées (cf. Ordonnance Suisse).
 - Résolution temporelle.
 - Compartiments visualisables.

Exemples – Incorporation aigue

Rétention du Co-60 (type S) dans le corps entier, avec décroissance physique



Exemples – Incorporation aigue



Synthèse

- Développement d'un **outil** qui permet de résoudre les modèles biocinétiques et **d'obtenir les fonctions de rétention et d'excrétion**.
 - ▶ Modèles implémentés pour 90 éléments (> 1200 radionucléides).
 - ▶ Nécessaire pour l'établissement d'un programme de surveillance.
- **Discussion** des résultats avec l'**Office fédéral de la santé publique**.
 - ▶ Mise à jour de l'Annexe 15 de l'ODosim est envisageable.

Caractérisation instruments : objectifs

- Comment l'approche suisse peut-elle être adaptée aux exigences du CERN ?

$$E_{50,min} = \mathbf{AMD} \cdot \frac{e_{50}}{m(T)}$$

- Établir les AMD* pour les instruments :
 - RP conventionnels communément utilisés au CERN.
 - Spectromètres- γ .

* AMD = activité minimale détectable.

Choix des instruments

Avantages	Désavantages
facile & rapide assez économique	Identification ✗ ↑ AMD (et $E_{50,min}$)

Avantages	Désavantages
Identification ✓ (+ mélanges) ↓ AMD (et $E_{50,min}$)	complexe & long pas tjrs économique



Falcon 5000 (HPGe)



2x2 NaI(Tl)

Instruments RP conventionnels

Spectromètres

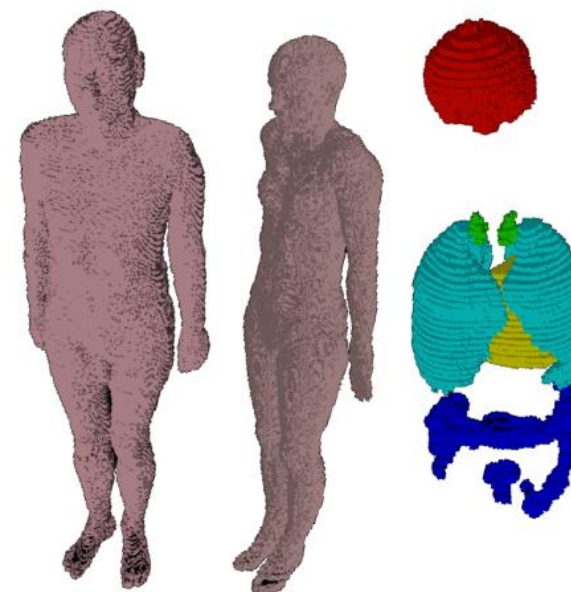
Pictures: <https://www.nmas.no/produkt/59556475/scintillator-probe>
http://www.laurussystems.com/products/products_pdf/LS_thermo_FH-40.pdf
<http://www.tridinamika.com/shop/products/saphymo-como-170-300/>
<https://all-pribors.ru/opisanie/43292-09-falcon-5000-45430>
<https://www.directindustry.it/prod/canberra-industries/product-23661-555299.html>

Choix du fantôme

simple



complexe



- Approche progressive + validation de chaque étape par simulation MC

AMD (instruments RP conventionnels)

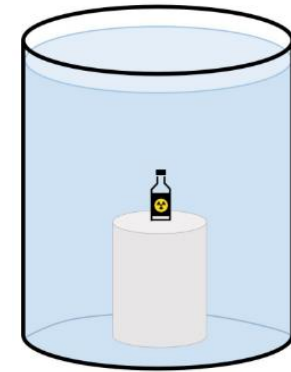
$$AMD = LC \cdot CF$$

LC : limites caractéristiques
(mesurande in: nSv/h or cps)

- Seuil de décision et limite de détection.
- Calculé selon la norme ISO 11929.
- Pour différentes valeurs de bruit de fond.

CF : facteur de conversion mesurande–activité
(Bq/(nSv/h) or Bq/cps)

- Obtenu en plaçant des sources connues dans le fantôme simplifié :
- **Tronc**



^{57}Co (124 keV), ^{133}Ba (268 keV), ^{137}Cs (662 keV), ^{60}Co (1253 keV)

Calcul du $E_{50,min}$: exemple pratique CERN-MEDICIS

$$E_{50,min} = MDA \cdot \frac{e_{50}}{m(T)}$$

- Exemple : collections à CERN-MEDICIS de **terbium** + **scandium**.
- Mesures de tri : une demi-heure après incorporation suspectée ($T = 30$ min).
- Voie d'incorporation: inhalation (AMAD = 5 μm , type d'absorption par défaut).
- Endroit de la mesure de tri : thorax.
- $e_{50} = e_{inh}$ pris de ICRP 68, $m(T)$ d'après notre programme.
- Bruit de fond au moment de la mesure = 100 nSv/h.

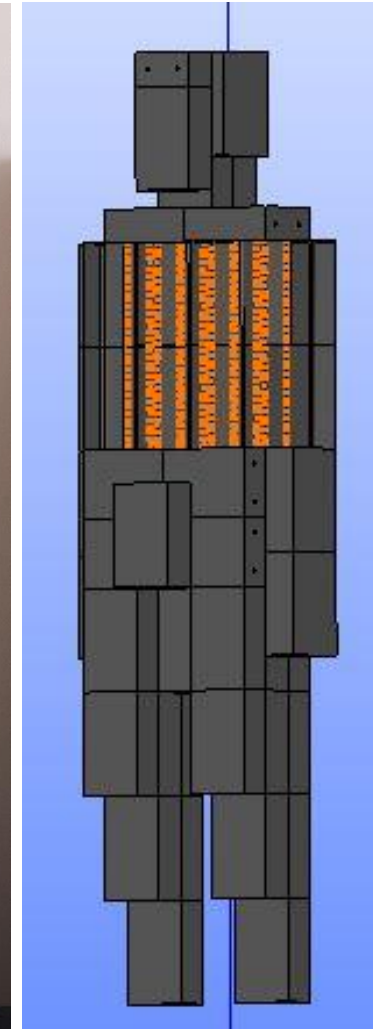
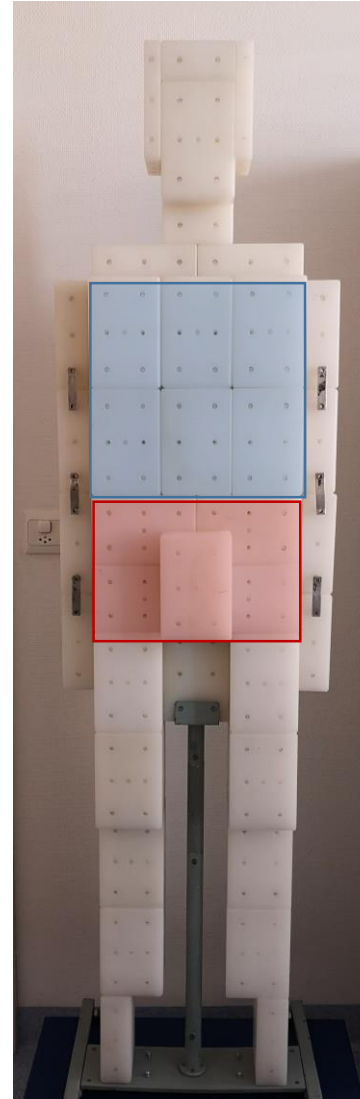


$E_{50,min}$ [μSv] (arrondi à la 10^{aine} supérieure)

Instrument	¹⁴⁹ Tb	¹⁵² Tb	¹⁵⁵ Tb	⁴⁷ Sc
CoMo 170	170	30	20	140

Évolution des fantômes

- Étendre l'approche à une géométrie plus réaliste / plus anthropomorphe.
- Estimation des CF plus réaliste.
- Distribution de l'activité plus «personnalisable».
- Tester aussi spectromètres- γ portables:
 - Identification radionucléides.

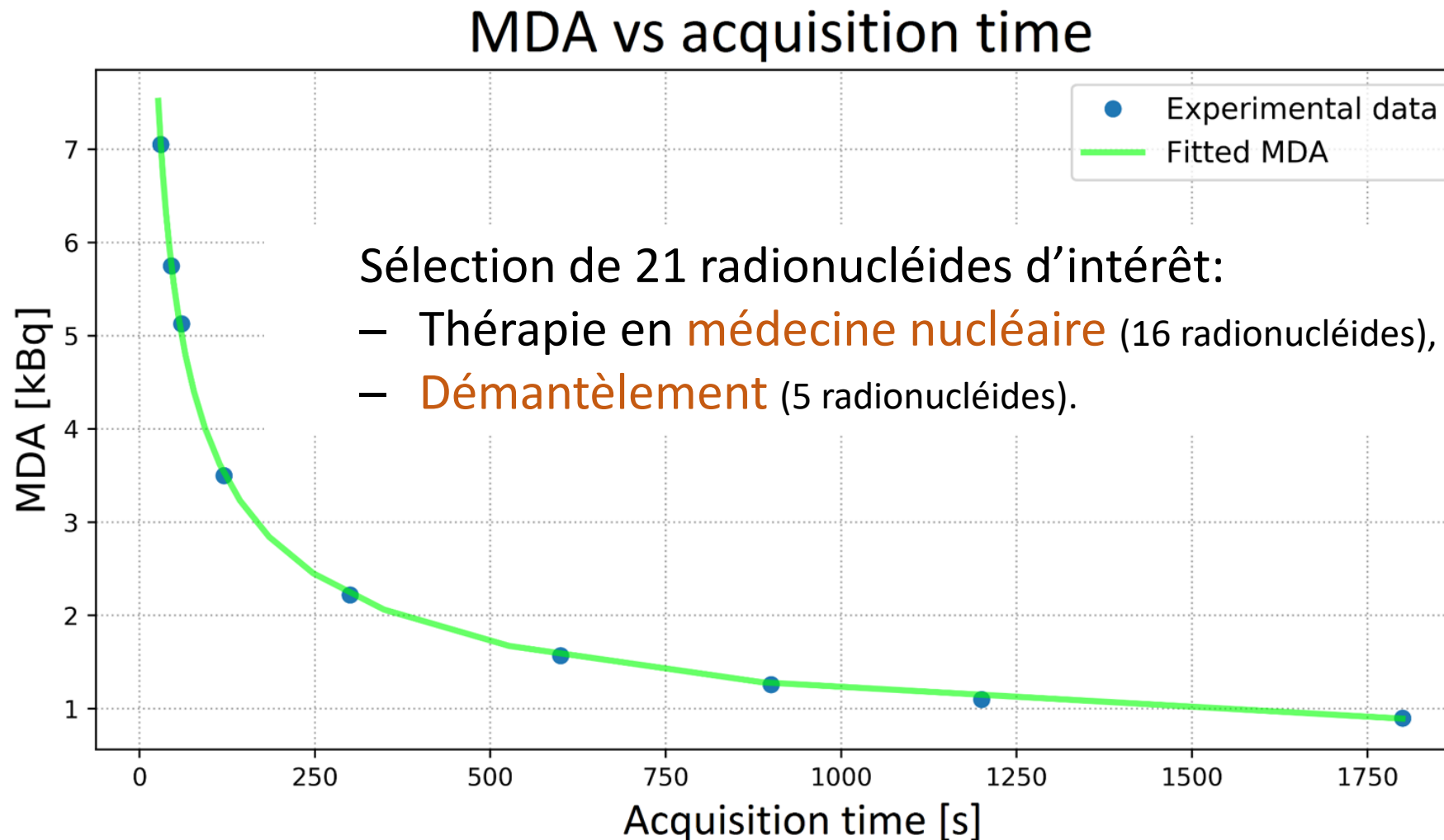


Modèle Geant4 du fantôme IGOR par Dr L. Desorgher



AMD et temps d'acquisition

Étalonnage: sonde NaI
Fantôme : tronc
Source : ^{133}Ba





Outils pour experts locaux

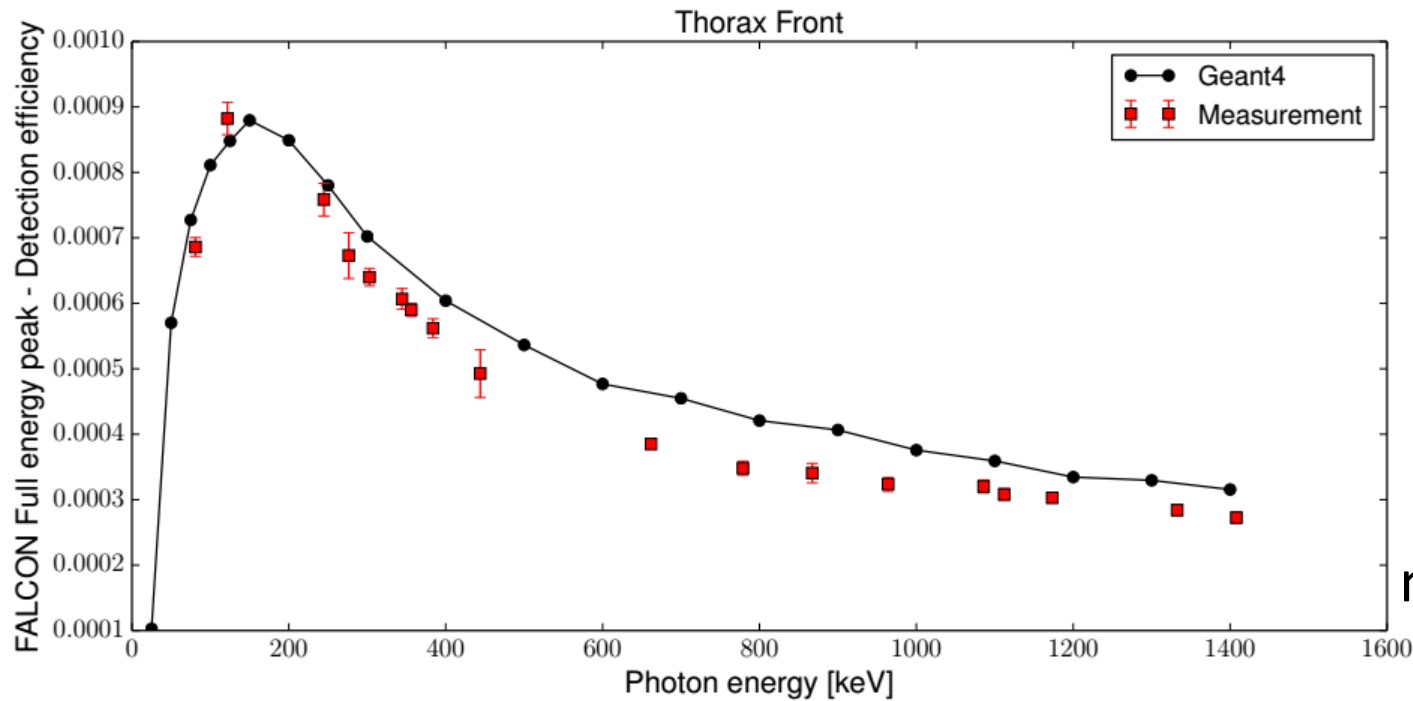
Étalonnage : IGOR, avec Falcon 5000
Scénario : inhalation de Tb-161 (paramètres : défaut)
Endroit mesure : abdomen

E50,min [μ Sv], Tb-161		Temps d'acquisition												
		30 s	40 s	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	7.5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
T tri	1 h	58	50	41	34	29	26	24	22	21	19	18	17	15
	2 h	57	50	40	33	29	26	23	22	20	19	18	17	15
	3 h	57	50	40	33	29	26	23	22	20	19	18	17	15
	6 h	58	50	41	34	29	26	24	22	21	19	18	17	15
	9 h	59	51	42	34	30	27	24	22	21	20	19	17	15
	12 h	63	54	44	36	31	28	26	24	22	21	20	18	16
	1 day	84	73	60	49	42	38	34	32	30	28	27	24	22
	1.5 days	98	85	69	57	49	44	40	37	35	33	31	28	25
	2 days	116	100	82	67	58	52	47	44	41	39	37	33	30
	2.5 days	200	173	141	115	100	89	82	76	71	67	63	58	52
	3 days	361	313	255	208	181	162	148	137	128	121	114	104	93
	4 days	542	469	383	313	271	243	222	205	192	181	172	157	140
	5 days	1518	1315	1074	877	760	680	621	575	538	507	481	440	393
	6 days	4150	3595	2936	2398	2077	1858	1697	1571	1470	1386	1315	1201	1075
	7 days	10337	8954	7313	5973	5174	4629	4227	3914	3662	3453	3277	2992	2678

Perspectives



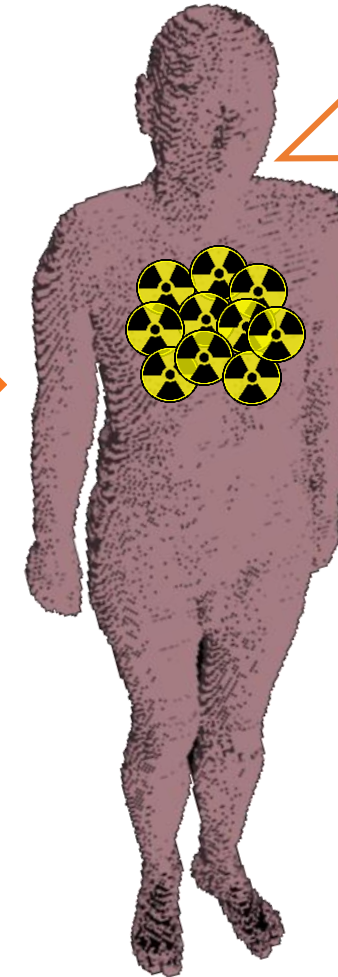
Perspectives: fantômes plus complexes



Des
fantômes
physiques



aux
fantômes
numériques



Courbe en
efficacité +
comparaison?

Conclusions

- Validé la **preuve de concept** : l'approche  peut être adaptée aux exigences du CERN, plusieurs mesures avant de dépasser la limite annuelle de $E_{50} = 1 \text{ mSv}$.
- Développé un **outil** et une **procédure générale** pour la mise en place d'un programme de surveillance.
- Étude des **performances de 7 instruments** conventionnels et communément utilisés au CERN.
 - Proposition de mesure de tri pour : ^{149}Tb , ^{152}Tb , ^{155}Tb , $^{111\text{m}}\text{Cd}$, $^{199\text{m}}\text{Hg}$, ^{47}Sc , ^{175}Yb , $^{194}\text{Hg}/^{194}\text{Au}$.
 - Procédures testés et améliorés grâce au **retour** des experts locaux.
- Étude des **performances de 2 spectromètres** portables:
 - Étalonnages avec des fantômes et géométries de remplissage différentes.
 - Calcul des AMD (et des $E_{50,\text{min}}$) pour différents temps d'acquisition.
 - Pour différents scénarios d'incorporation (inhalation, ingestion, injection).
 - Pour des radionucléides d'intérêt : exotiques et conventionnels.

Remerciements

- François BOCHUD
- Pierre CARBONEZ
- Jérôme DAMET
- Andreas PITZSCHKE

Superviseurs



- Élodie AUBERT
- Alexandre DORSIVAL
- Fabio POZZI
- Nicolas RIGGAZ
- Markus WIDORSKI

Collègues CERN



- Claude BAILAT
- Thierry BUCHILLIER
- Laurent DESORGHER
- Frédéric JUGET
- Michel LERESCHE
- Corinne MORATAL
- Claude PILLOUD

Collègues Institut
de Radiophysique

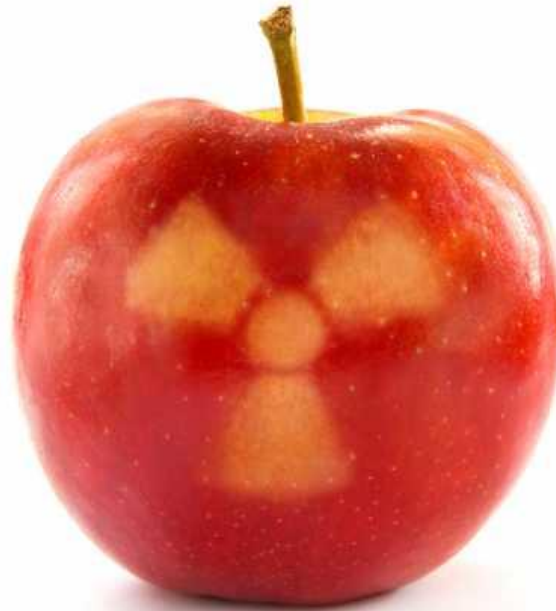


- Frank ASSENMACHER
- Roman GALEEV

PSI



Merci de votre attention



Questions?