

# ActiWiz 3 – un code déterministe pour la caractérisation radiologique

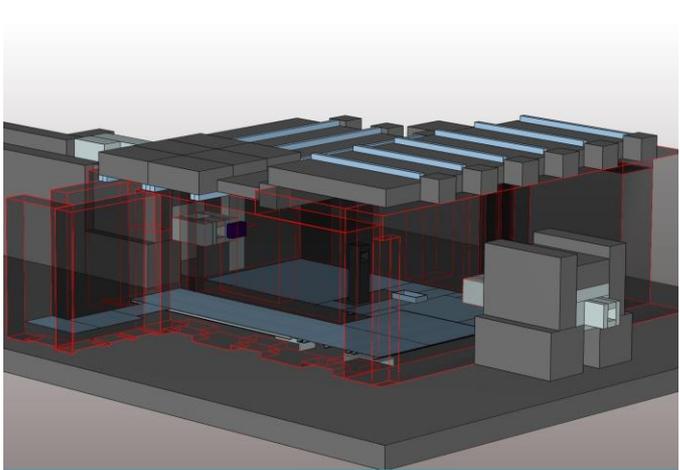
Chris Theis et Helmut Vincke

# Sommaire

---

- Introduction
- Calcul de l'inventaire des radionucléides
- Aperçu d'ActiWiz 3
- Exemples d'applications

# Les installations nucléaires



Conception

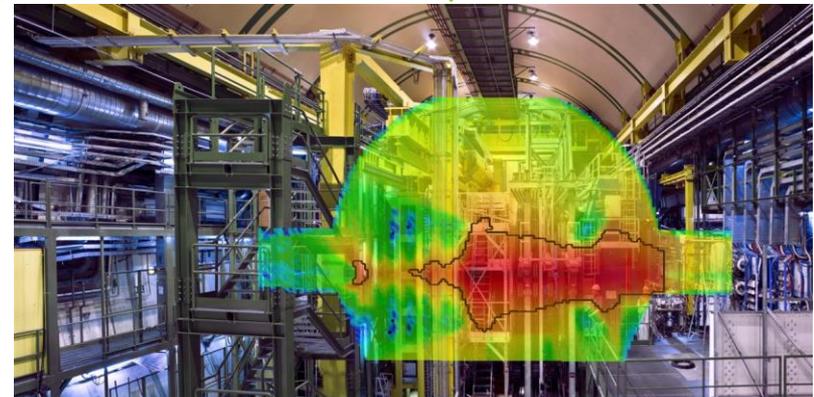


Construction

Matériaux  
activés et  
futurs déchets

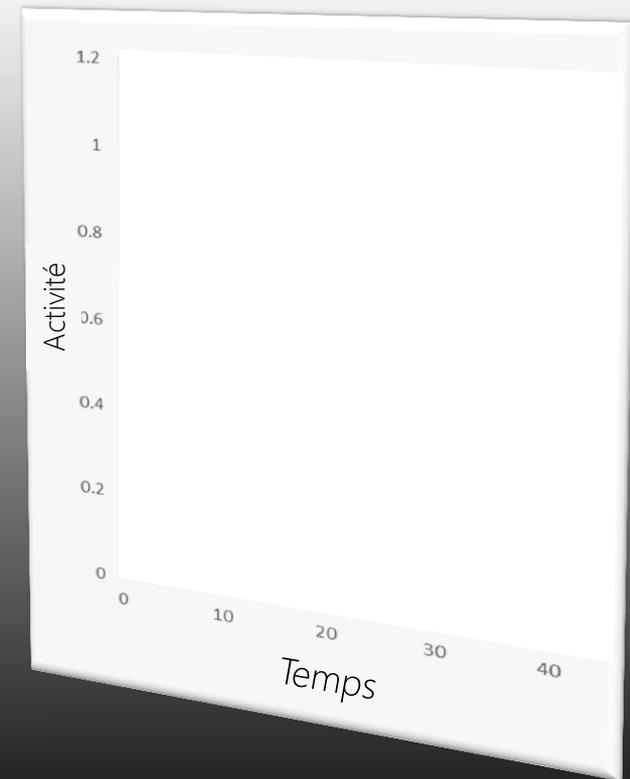
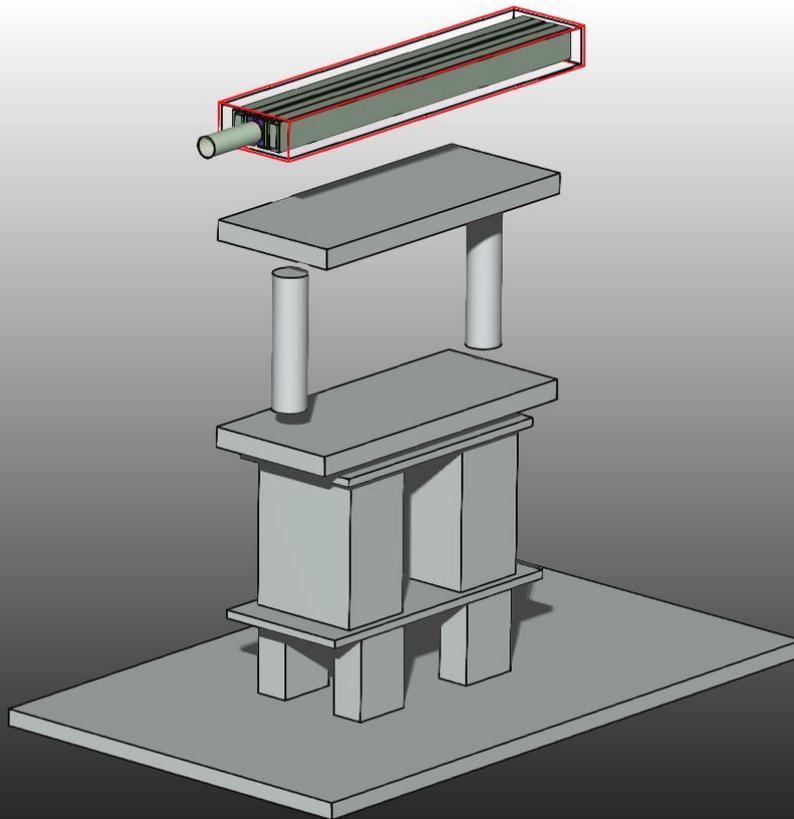


Démantèlement



Opération

# Processus d'activation



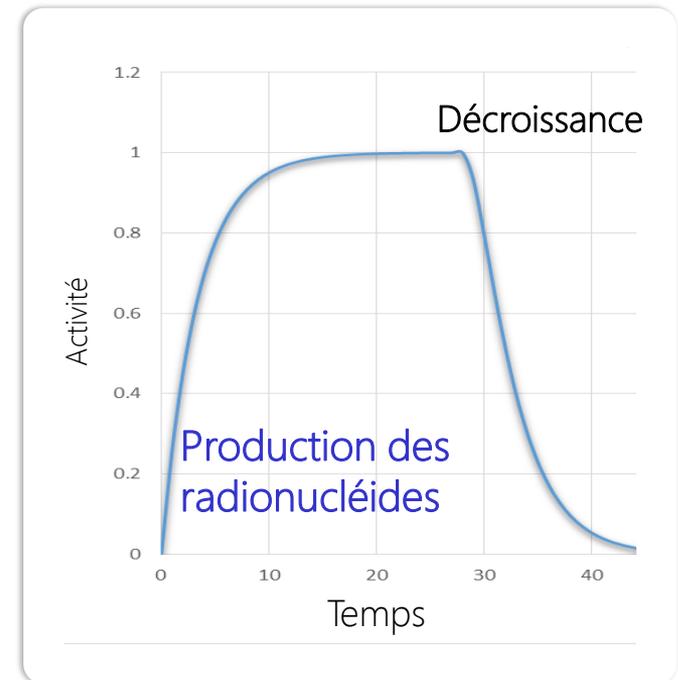
# Calcul de l'inventaire des radionucléides

L'activité d'un radionucléide est calculée par un système d'intégrales et d'équations différentielles pour chaque voie de production

- Fer : > 300 isotopes
- Plomb : > 2400 isotopes



La connaissance de toutes les voies de production & chaines de décroissance est nécessaire!



# Calcul de l'inventaire des radionucléides

Option 1 : utilisation de méthodes Monte-Carlo



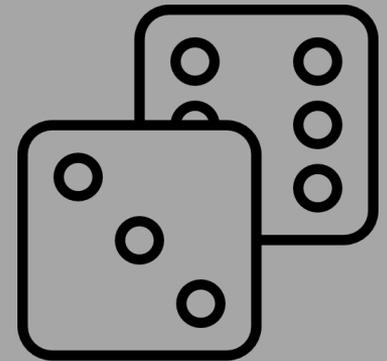
## Méthodes Monte-Carlo

### Avantages :

- informations sur le flux de particules et l'activation simultanément
- prise en compte de la géométrie → distribution spatiale

### Inconvénients :

- temps de calcul long & parfois difficile d'obtenir des résultats avec une statistique suffisante (par ex. couches minces)
- la nécessité de traiter les données brutes



# Calcul de l'inventaire des radionucléides

Option 2 : utilisation d'une méthode déterministe



ActiWiz 3 – bibliothèque spécifique

neutrons < 20 MeV : JEFF 3.1.1

neutrons > 20 MeV, p, pi+, pi-, photons  
jusqu'à 100 TeV : 100 années CPU de calculs  
génériques FLUKA (2011.2c)



# Calcul de l'inventaire des radionucléides

## Méthodes déterministes

### Avantages :

- très performantes & pertinence statistique élevée
- outils d'analyse directement intégré

### Inconvénients :

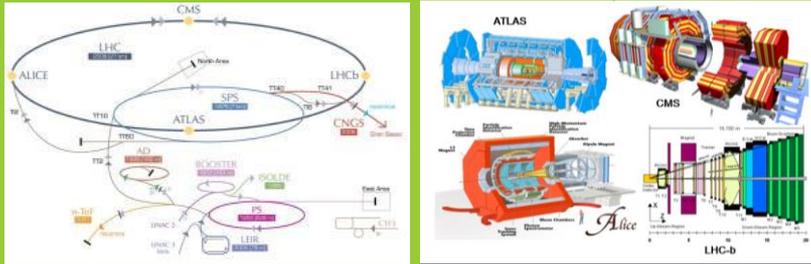
- information sur le flux de particules nécessaire
- pas d'information sur la distribution spatiale



ActiWiz ne vise pas à remplacer les codes génériques Monte-Carlo pour la caractérisation radiologique mais à les compléter

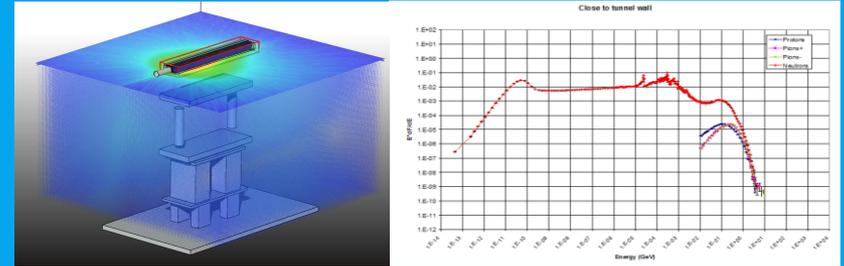
# Sommaire d'ActiWiz 3

champs de radiations prédéfinis



accélérateurs CERN & expériences LHC

champs de radiations externes



spectres énergétiques de particules



- Matériau défini par l'utilisateur  
(basé sur 85 éléments chimiques différents)
- Scenarios d'irradiation & de décroissance au choix  
(possibilité de définir des milliers de séquences, calculées avec une précision en virgule flottante en 512 bits)

# Analyse des radionucléides



inventaire des radionucléides

radio-toxicité  
(limites EU, CH, US,  
A, Japon, IAEA)

spectres  
d'émission  $\gamma$

radionucléides  
dominants

provenance de  
radionucléides

épaisseur de  
blindage

analyse  $\alpha/\beta$

évolution  
temporelle

extrapolation de  
débit dose,  
radio-toxicité, ...

Vert = ActiWiz 2

Bleu = ajouté dans ActiWiz 3



# Exemples



# Etude d'activation du sol

Évaluation de l'activation du sol dans le cadre de travaux de génie civil HiLumi LHC:

- quantité d'intérêt : **radio-toxicité**  $\sum_i \frac{a_i}{LE_i}$
- 2016 échantillons de béton & de sol prélevés
- calcul de **flux de particules** avec **FLUKA**

<b><u>Arrêt 2016/17 (~3 mois de décroissance)</u></b>		
	mesures spectrométrie $\gamma$	ActiWiz 3
		total
béton	0.12	0.5
sol	0.008	0.016



Ca-45 est un émetteur  $\beta$  pur :  
non visible par spectrométrie  $\gamma$

Ca-45	68%
Na-22	28%
S-35	2%

Ca-45	80%
Na-22	7%
Zn-65	3%
Fe-55	3%
S-35	1%
Mn-54	1%

C. Adorasio, S. Roesler,  
*Induced activation studies for the LHC  
upgrade to High Luminosity LHC,*  
ARIA 2017 Workshop, Lund



# Autres applications...



Evaluation of induced activity and assessment of in-situ clearance procedures for MedAustron ion therapy accelerator components

C. Weixelbaumer, L. Jaegerhofer, M. Deutsch, R. Wanzenboeck

<https://indico.esss.lu.se/event/560/session/35/contribution/14>



Radiological characterization of very-low-level radioactive waste at CERN

M. Magistris, R. Froeschl, F. La Torre, C. Theis, L. Ulrici, N. Walter, B. Zaffora

<https://indico.esss.lu.se/event/560/session/34/contribution/21>



Application des codes FLUKA et ActiWiz pour l'élimination inconditionnelle des cavités supraconductrices du grand collisionneur électron-positon du CERN

F. Pozzi, C. Duchemin, M. Magistris, M. Silari

→ **présentation dédiée lors de cette conférence**

# Bilan

---

- Dernière génération d'ActiWiz : plus puissante et plus flexible  
nouvelles fonctionnalités disponibles
- Données nucléaire basées sur [JEFF 3.1.1](#) et 100 années CPU de calculs génériques  
[FLUKA](#)
- Pris en compte des [réactions photo-nucléaires](#)
- Gamme d'énergie des [neutrons thermiques](#) étendue à [100 TeV](#)
- Utilisation de [spectres énergétiques de particules](#) fournis par l'utilisateur
- [Outil standard pour la caractérisation de déchets radioactives au CERN](#),  
complémentaire au code FLUKA
- Outil pour les [études de design](#) de nouvelles installations avec [optimisation des matériaux d'un point de vue radiologique](#)

# Merci de votre attention !

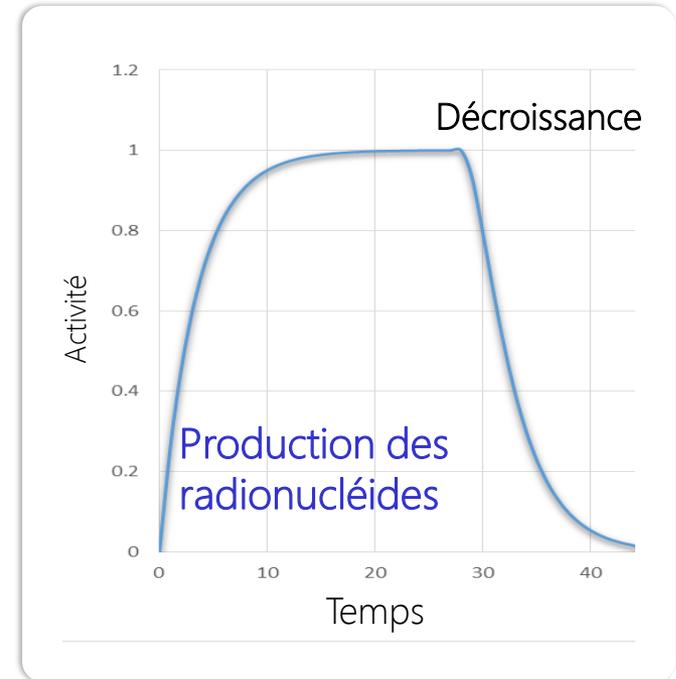
---

chris.theis at cern.ch & helmut.vincke at cern.ch

# Backup slides

# Calcul de l'inventaire des radionucléides

$$P_i = \sum_j \sum_k v_j \int_0^{\infty} \sigma_{j \rightarrow i, k}(E) \Lambda_k(E) dE$$



- $P_i$  le **taux de production direct total** d'un radionucléide  $i$
- $v_j$  la **densité atomique**
- $\sigma_{j \rightarrow i, k}$  la **probabilité** de créer un **isotope  $i$**  à partir d'un **noyau  $j$**  avec une **particule  $k$**
- $\Lambda_k$  le **flux de particules  $k$**

C. Theis, H.Vincke, *The use of ActiWiz in operational radiation protection*,  
Proceedings of the SATIF-12 conference at Fermilab 2014, Nuclear Science Report NEA/NSC/R 3, (2015)

# Calcul de l'inventaire des radionucléides

$$\rightarrow N_i(t) = \left( \dots \underbrace{\quad \quad \quad}_{\text{production}} \quad \quad \quad \right)$$

The equation shows a large opening parenthesis followed by an ellipsis, then a blue bracket under a blank space labeled "production", and finally a closing parenthesis. The term  $P_n^q$  is positioned above the "production" bracket.

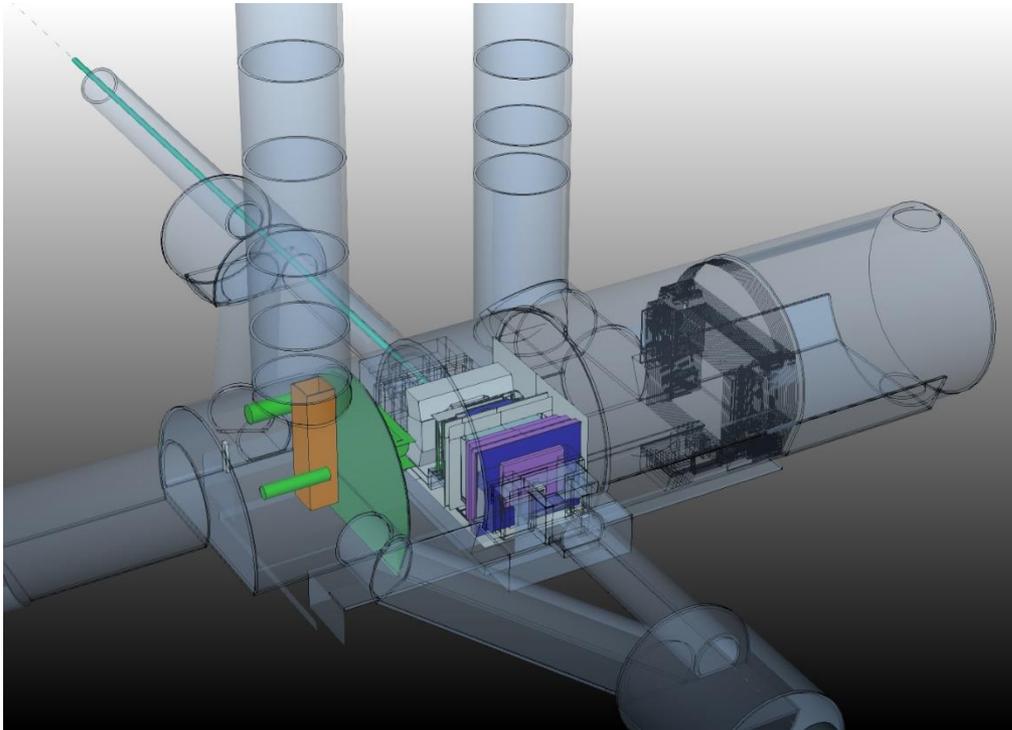
- $N_i$       quantité de radionucléide  $i$  dans une certaine chaîne de décroissance  $n$   
 $q$       index de temps d'irradiation  $[0, r]$   
 $n$       index de la **generation** dans une certaine chaîne de décroissance



Connaissance des **toutes les voies de production & chaînes de décroissance** nécessaire :

- Fer :            > 300 isotopes
- Plomb :        > 2400 isotopes

# Maintenance d'un circuit de refroidissement

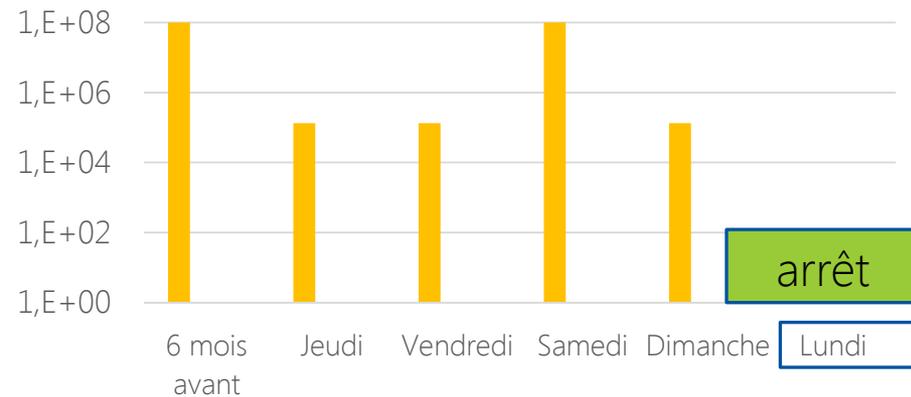


- détecteur LHCb avec un circuit de refroidissement  $C_6F_{14}$
- demande d'accès pour maintenance
- intensité nominale =  $1E8$  pp collisions/s
- intensité diminuée =  $\sim 0.1\%$  de l'intensité nominale

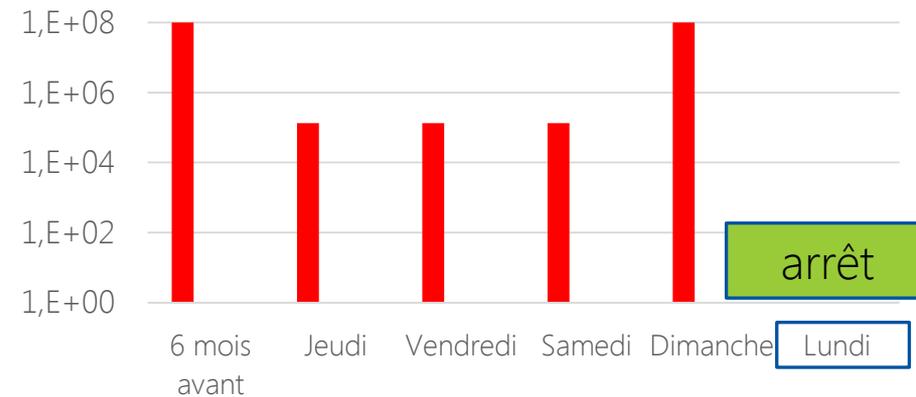
- Quel est le niveau de radio-toxicité attendu?
  - *Quel impact a une variation de l'intensité du faisceau pendant les journées avant l'arrêt?*
- nous devons fournir une réponse dans l'heure pour décider du mode opératoire ☺

# Maintenance d'un circuit de refroidissement

Scénario 1 – profil de l'intensité faisceau



Scénario 2 - profil de l'intensité faisceau



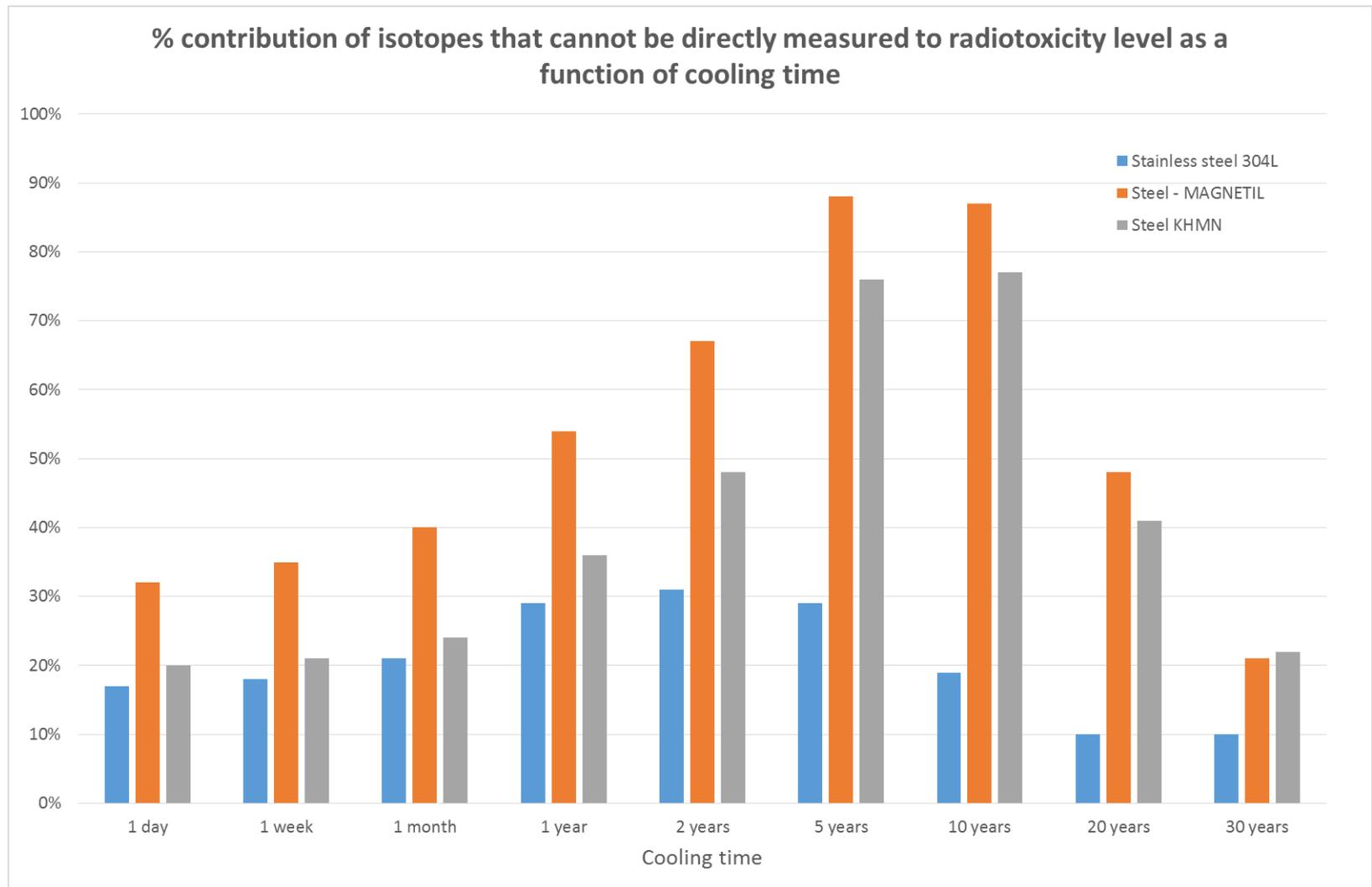
Scénario ID	Niveau de radio-toxicité (limite d'exemption)
Scénario 1	0.37%
Scénario 2	2.61%

Dans les deux cas :

→ le liquide de refroidissement n'est pas radioactif

→ domination des radio-isotopes à demi-vie courte en saturation

# L'impact des émetteurs alpha/beta sur la radio- toxicité



# Analysis & reporting

---



How long do I have to wait for the residual dose rate to drop by X?



# Nuclide inventory extrapolation

Typical questions:

- “how long do I have to wait to reduce the  $H^*(10)$  by a factor of  $X$ ?”
- “how much longer would I have to wait if I used the new LL values for clearance instead of the current LE clearance values”?
- ...

Trivial for single isotopes but full inventories are considerably more complicated

→ requires to solve the following equation for the time  $t$  efficiently(!):

$$\left( \sum_{i=1}^M \sum_{i \xrightarrow{\text{yields}} l} \frac{\lambda_l N_i^0}{LL_l} \prod_{j=1}^{l-1} \lambda_{j,j+1} \sum_{k=1}^l \frac{e^{-\lambda_k t}}{\prod_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^l (\lambda_p - \lambda_k)} \right) - \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i N_i^0}{LE_i} = 0 \quad \text{with nuclide concentration } N(t=0) = N^0$$

ActiWiz 3 will provide this capability including full consideration of the temporal evolution of the nuclide inventory

# Analysis & reporting

For example: *Stainless steel (304L) support irradiated in the PS. How long do I have to wait to reduce my dose rate by a factor of 10?*

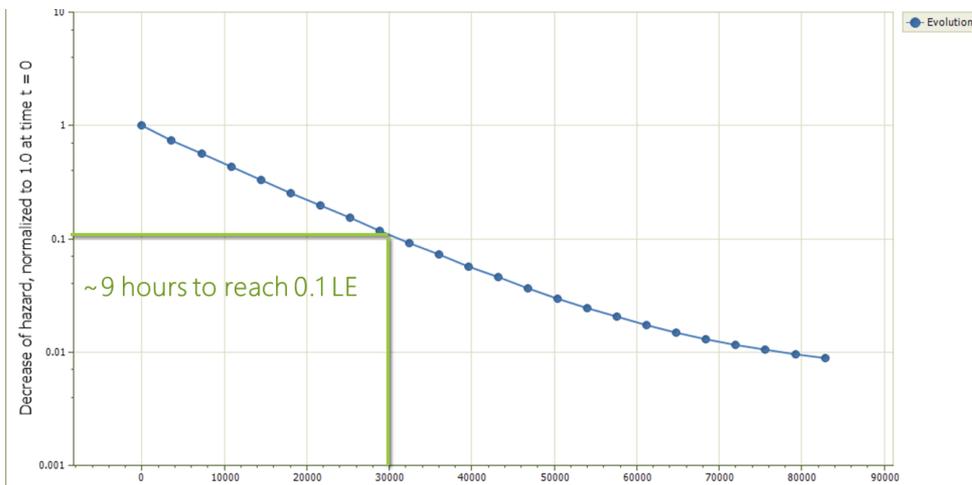
Selected hazard: **H\*(10) level**

Current hazard:  $5.99\text{E}-014$ , **requested decrease: 0.1**

Decreased hazard:  $5.74\text{E}-015$

**after: 30878 s +/- 4.245% (= 8 hours, 2077 seconds)**

Calculation time: 1.688 s



# Brief feature summary

---

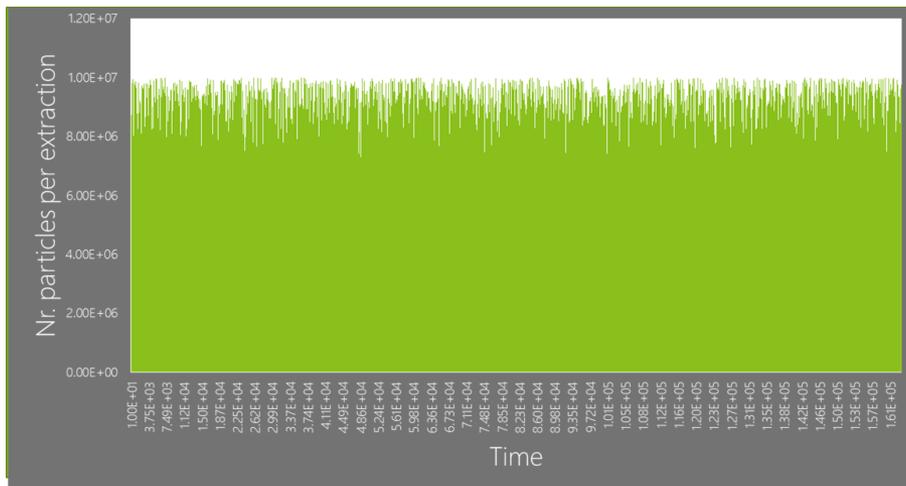


- Supports 85 different chemical elements as compound constituents
- High energy reactions based on FLUKA, low energy neutron reactions based on JEFF 3.1.1
- Creation of metastable states by low E neutrons based on evaluated data (JEFF)
- Decay engine limits numerical problems due to 170 digits accuracy (512 bits)

# Brief feature summary



- Multi-layer caching system for performance optimization of build-up & decay calculation



- calculation of the nuclide inventory of stainless steel for 55600 consecutive, different beam extractions (SPS case) in ~1.5 minutes with a precision of 170 significant digits
- 1 full year of SPS operation (>612.000 consecutive extractions) in ~15 minutes
- Now supports also loading of external radiation fields via rad. environment files

# Build-up & decay engine

- **fully analytical** solution without approximations, including also treatment of buildup
- allows for **pairing irradiation & cooldown** calculation in one step + modelling of **complex irradiation/cooling patterns**
- **normalized partial solutions** can be stored and **reused** in a 2-level cache → considerable speed-up in ActiWiz 3
- **numerical issues** treated by **arbitrary precision arithmetics** implemented with 512 bits significand ~ 170 digits

