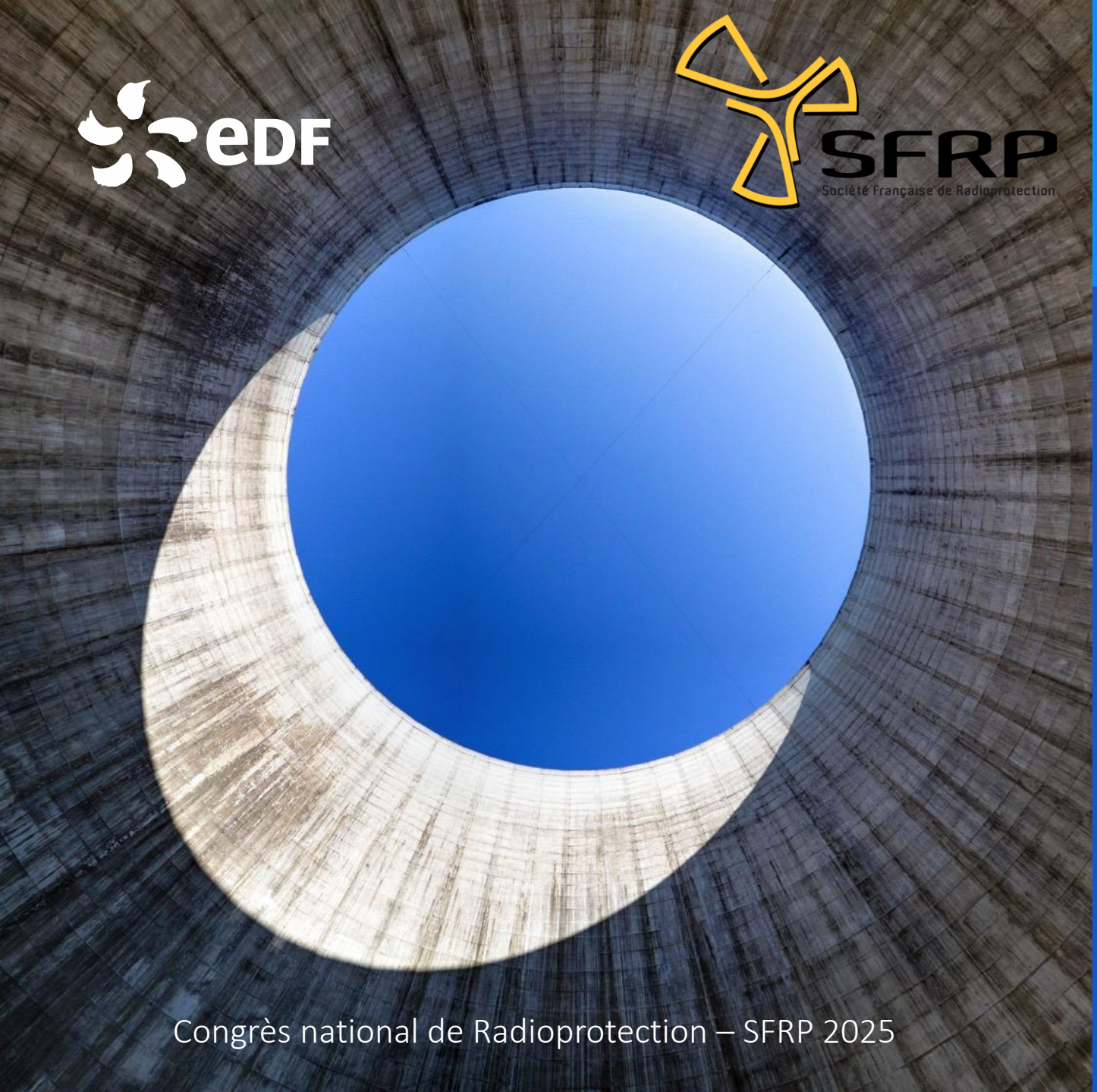


Christopher FILOSA (EDF R&D)

Renaud Crinon, Fabrice Hoareau, Elisa Farkas, Ludovic Idoux, Eric Jarlegan, Marianne Delfaud

17/06/2025

Evaluation de la dosimétrie autour des cylindres de transport d'hexafluorure d'uranium

Congrès national de Radioprotection – SFRP 2025

Plan de la présentation

1. Rappel du contexte et des objectifs
2. Présentation des outils de calcul
3. Campagnes de mesures
4. Résultats : comparaison calculs-mesures
5. Conclusions et perspectives

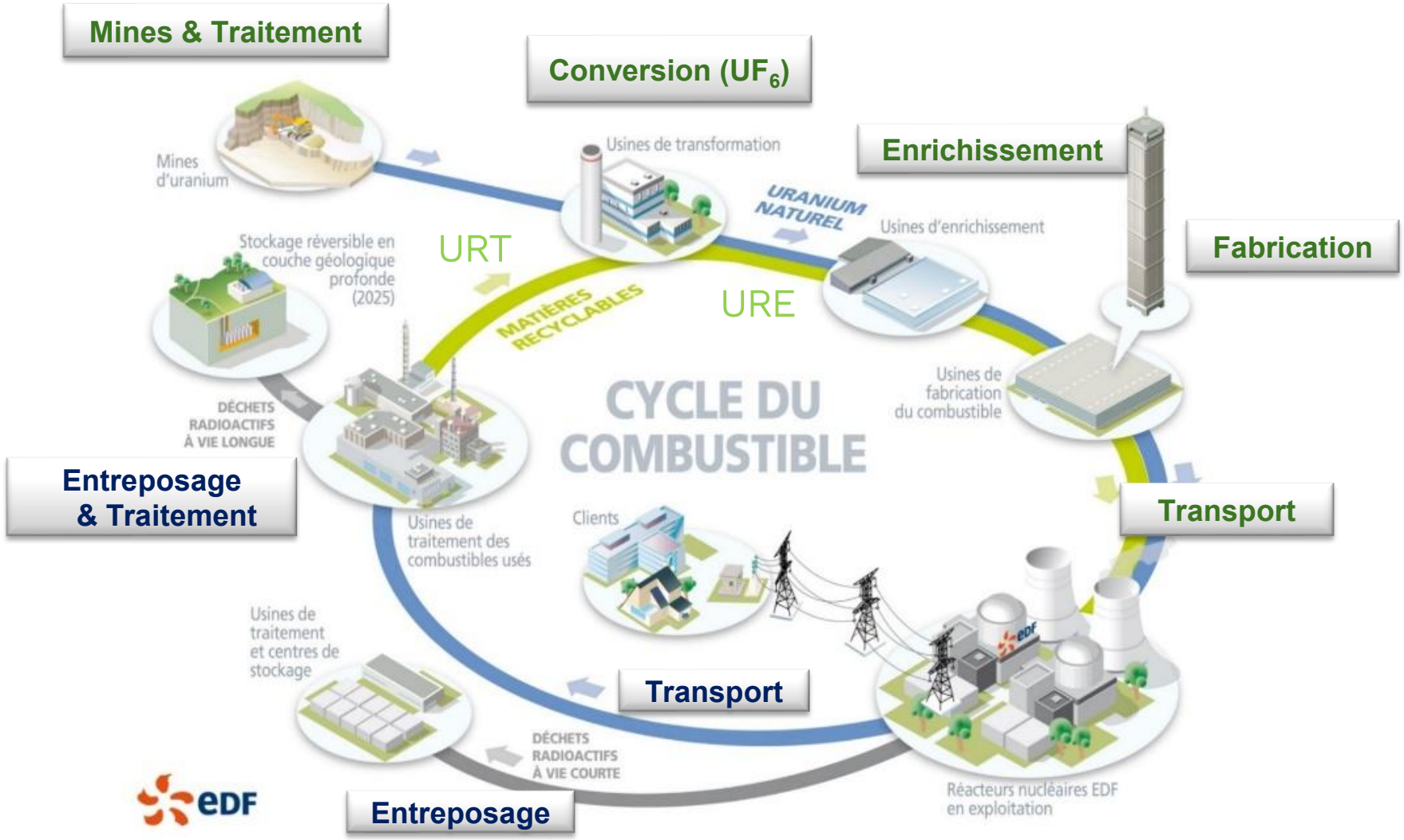
•1

Contexte

Cycle du combustible et cylindres 30B URE

1. Contexte : cycle du combustible

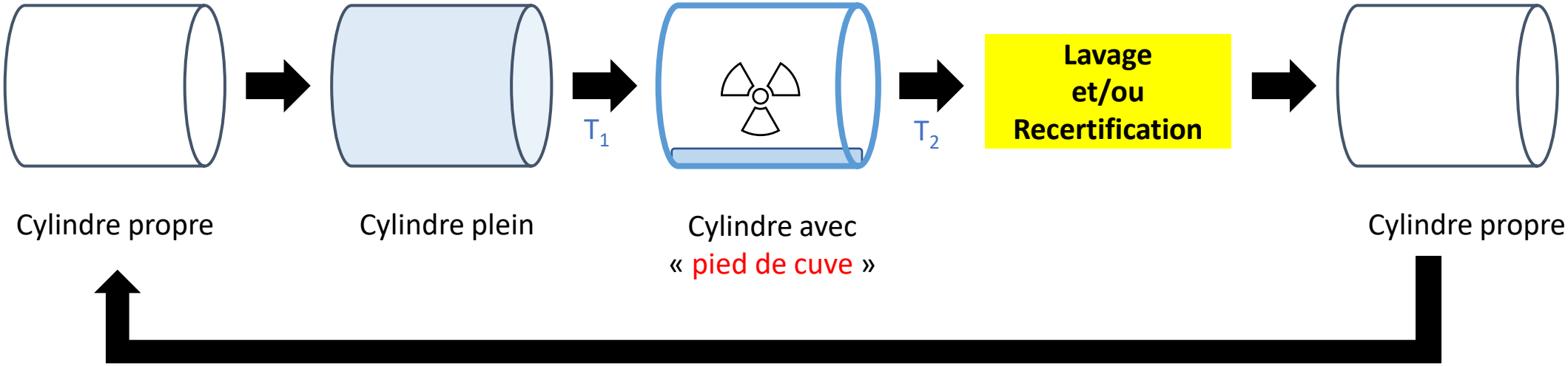
UNE = Uranium Naturel Enrichi
URT = Uranium de retraitement
URE = Uranium de retraitement enrichi



1. Contexte : cycle de vie des cylindres 30B URE

Remplissage UF_6

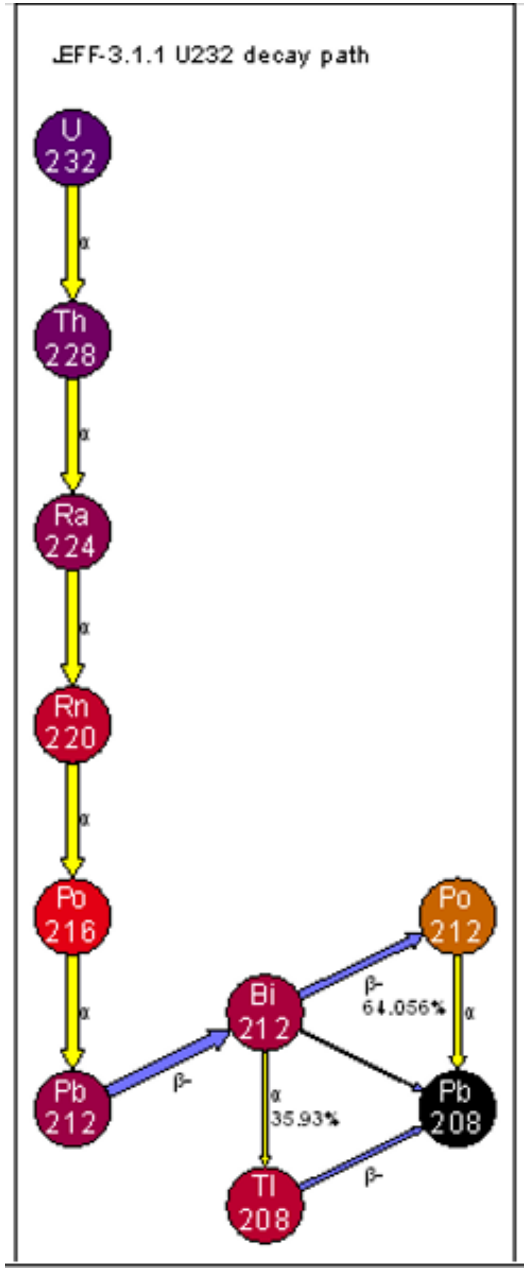
Vidange UF_6



T_1 : Durée d'entreposage cylindre plein, entre le remplissage et la vidange

T_2 : Durée d'entreposage cylindre vide, entre la vidange et l'expédition

1. Contexte : un DeD* plus élevé après vidange



Durées de vie :

U232 : 70 ans,

Th228 : 1,9 ans,

Ra224 : 3,6 jours,

Rn220 : 55 sec,

Po216 : 0.15 sec,

Pb 212 : 10,6 heures,

Bi 212 : 61 mn,

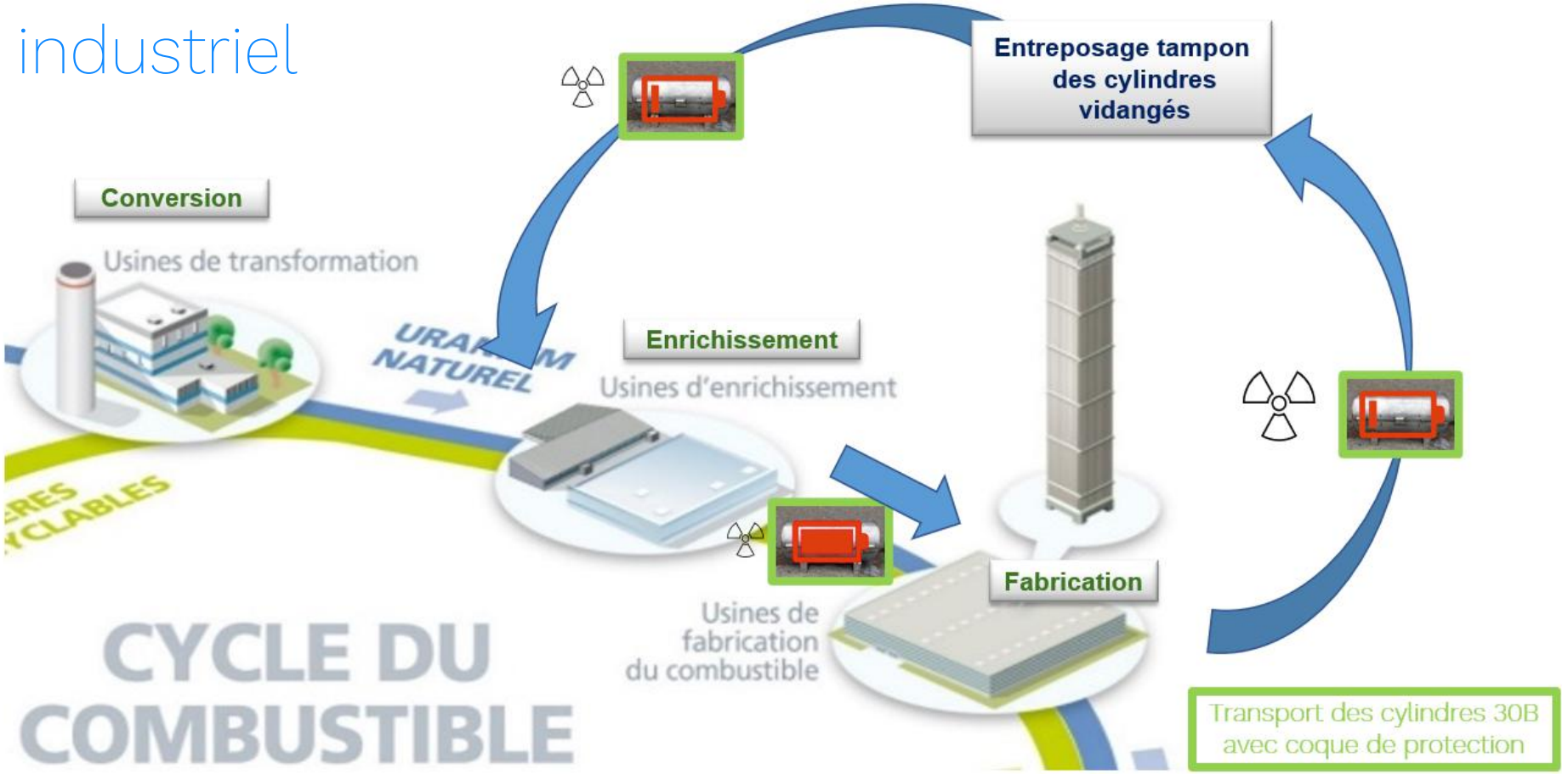
Tl 208 : 3mn,

Pb 208 : stable

- Une composition isotopique différente de l'UNE :
  - → ^{236}U : capture neutronique
  - → ^{234}U et ^{232}U : réactions (n,2n) successives
- U232 décroit sur :
  - → ^{228}Th : non-extrait lors de la vidange car pas de fluorure volatile
  - → ^{228}Th décroit et donne rapidement des émetteurs gamma
  - → ^{208}Tl issu de cette décroissance émet des raies jusqu'à 2,6MeV
- Après la vidange :
  - → Le contenu du cylindre ne fait plus écran
  - → Le DED à l'extérieur du cylindre est plus important

*On ne mentionnera que le DeD (Débit équivalent de Dose) gamma

1. Objectif industriel



Au bout de combien de temps après la vidange les critères pour un envoi sous utilisation non exclusive sont-ils respectés ?

DeD inférieur à 2mSv/h au contact et 100µSv/h à 1m

•2

EDAC
(Evaluation de la Dosimétrie Autour des Cylindres)

Des calculs de référence à un modèle simplifié pour aider à la logistique du flux de cylindres

2. Calcul du DeD

SOURCE

PROPAGATION

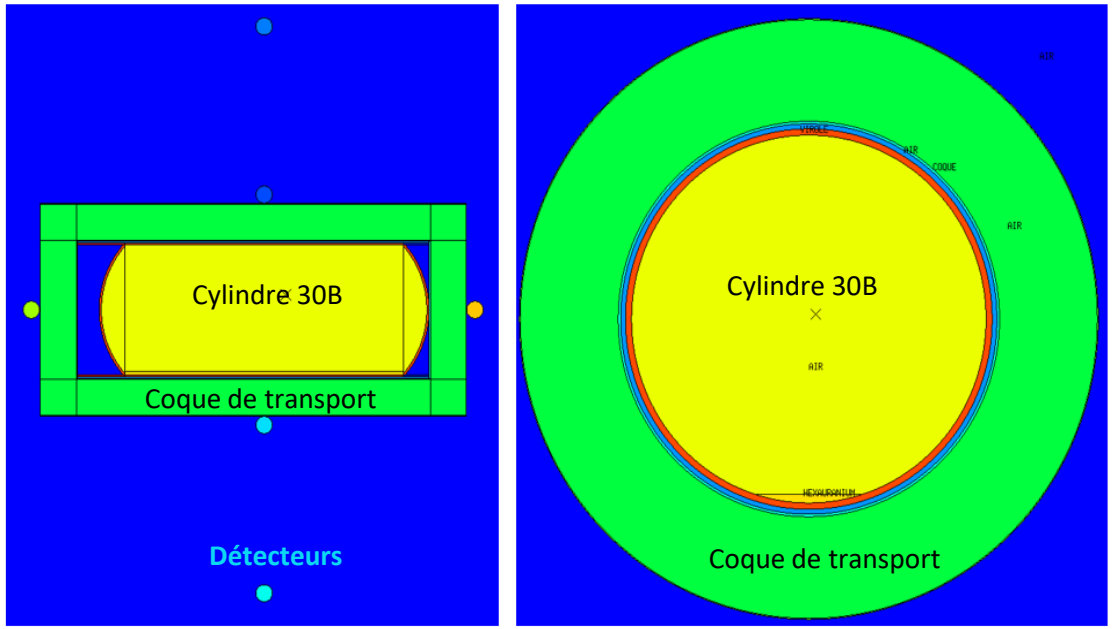
Calculs de référence (~1h)

Composition initiale → Phase 1 : Vieillissement cylindre plein DARWIN (T1) → Phase 2 : Vieillissement cylindre vidangé DARWIN (T2) → Calcul du DeD TRIPOLI4

Calculs simplifiés (~s)

Composition initiale → Evolution massique (T1 et T2) Ajustement polynomial → Contribution aux sources Ajustement polynomial → Calcul du DeD Matrice d'importance

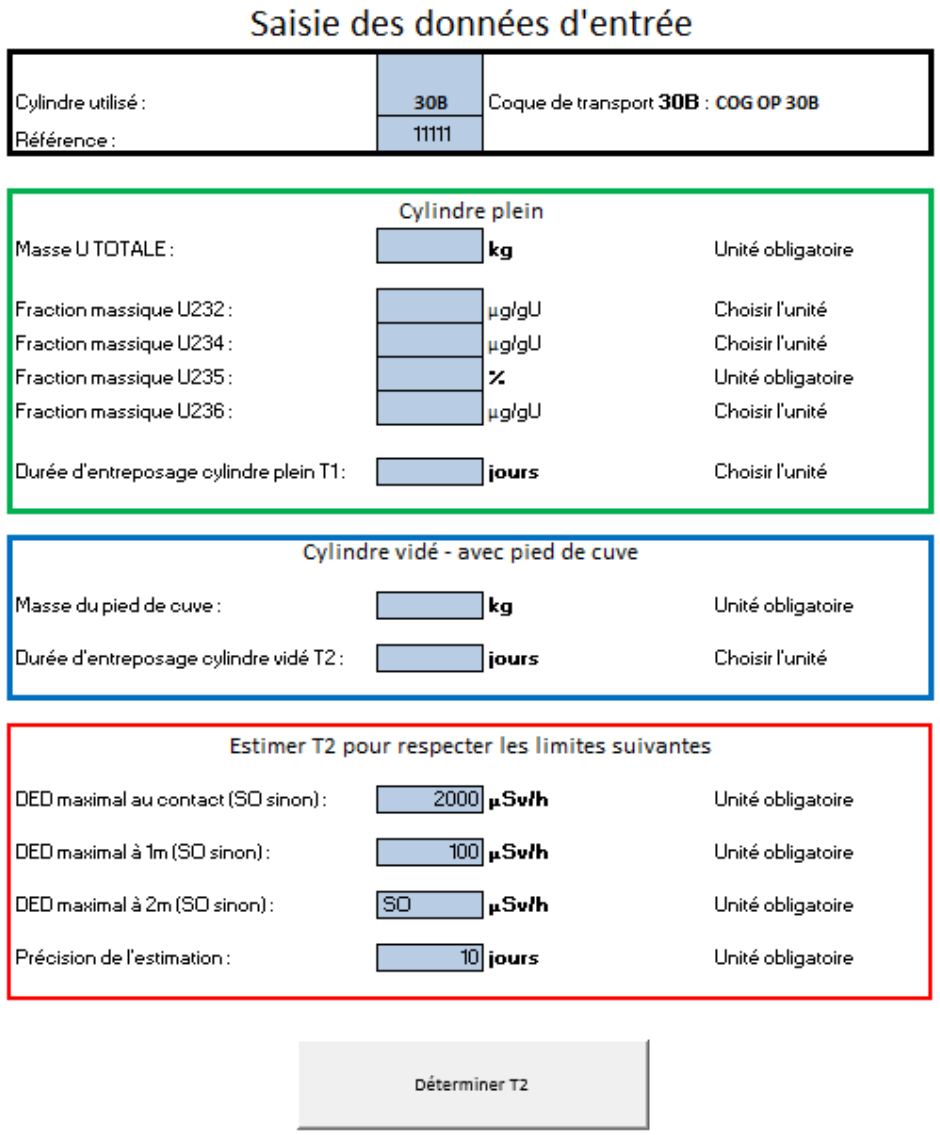
- Evolutions isotopiques :
  - → DARWIN-PEPIN2 Vs Ajustements polynomiaux
- Propagation :
  - → TRIPOLI4 Vs Matrice d'importances
- Sorties :
  - → DeD Vs DeD et recherche de la date à partir de laquelle le cylindre peut être expédié



Modélisation TRIPOLI4 d'un cylindre avec sa coque de transport

Codes CEA

2. Calcul du DeD : EDAC



Saisie des données d'entrée

Cylindre utilisé :	30B	Coque de transport **30B** : **COG OP 30B**
Référence :	11111	

Cylindre plein

Masse U TOTALE :		**kg**	Unité obligatoire
Fraction massique U232 :		µg/gU	Choisir l'unité
Fraction massique U234 :		µg/gU	Choisir l'unité
Fraction massique U235 :		%	Unité obligatoire
Fraction massique U236 :		µg/gU	Choisir l'unité
Durée d'entreposage cylindre plein T1 :		**jours**	Choisir l'unité

Cylindre vidé - avec pied de cuve

Masse du pied de cuve :		**kg**	Unité obligatoire
Durée d'entreposage cylindre vidé T2 :		**jours**	Choisir l'unité

Estimer T2 pour respecter les limites suivantes

DED maximal au contact (SO sinon) :	2000	**µSv/h**	Unité obligatoire
DED maximal à 1m (SO sinon) :	100	**µSv/h**	Unité obligatoire
DED maximal à 2m (SO sinon) :	SO	**µSv/h**	Unité obligatoire
Précision de l'estimation :	10	**jours**	Unité obligatoire

Déterminer T2

- EDAC est un outil d'aide à la logistique des flux de cylindres
  - → Permet de calculer le DeD max pour un couple (T_1 , T_2)
  - → Estime également le temps T_2 à partir duquel le cylindre peut être expédié avec coque

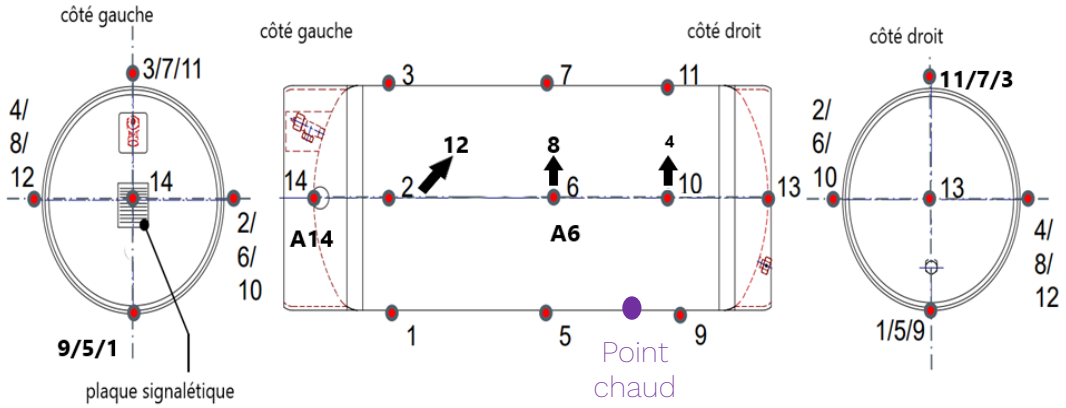
- 7 paramètres importants :
  - → Masse d'uranium
  - → Fraction massique des différents isotopes de l'uranium
  - → La durée d'entreposage cylindre plein T_1
    - Corrélation positive avec le DeD (décroissance de ^{232}U)
  - → La durée d'entreposage cylindre vide T_2
    - Corrélation négative avec le DeD (refroidissement)

3

Campagnes de mesures

4 séries de mesures sur le site de FRAMATOME (Romans-sur-Isère)

3. Mesures sur le site de FRAMATOME Romans-sur-Isère



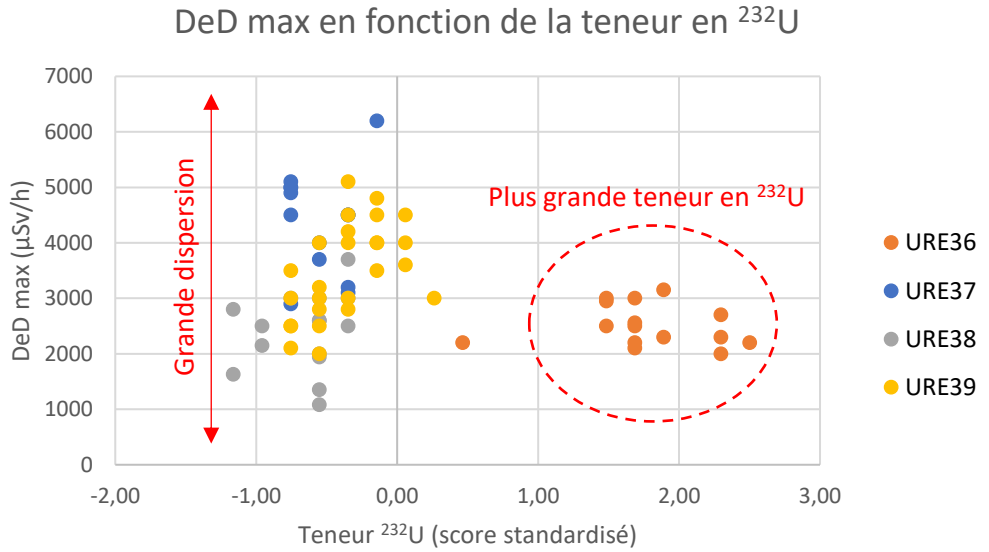
- Objectifs :
  - → Effectuer une cartographie des DeD gamma sur des cylindres plein et vidangés, avec coque et sans coque
  - → Effectuer des mesures de spectres gamma
- 4 campagnes de mesures
  - → Nom des campagnes : URE 36 – 37 – 38 – 39
  - → Environ 70 cylindres
- Dispositif expérimental :
  - → Chambre ionisation de 1L
  - → Spectromètre gamma FALCON5000
  - → Radiamètre gamma FH40GL-10
  - → Caméra gamma Compton DAMAVAN et H3D
- Mesures industrielles effectuées par Framatome
  - → Cartographie DeD gamma + Mesure au point chaud
  - → Mesure du DeD au point chaud (sonde sur perche)

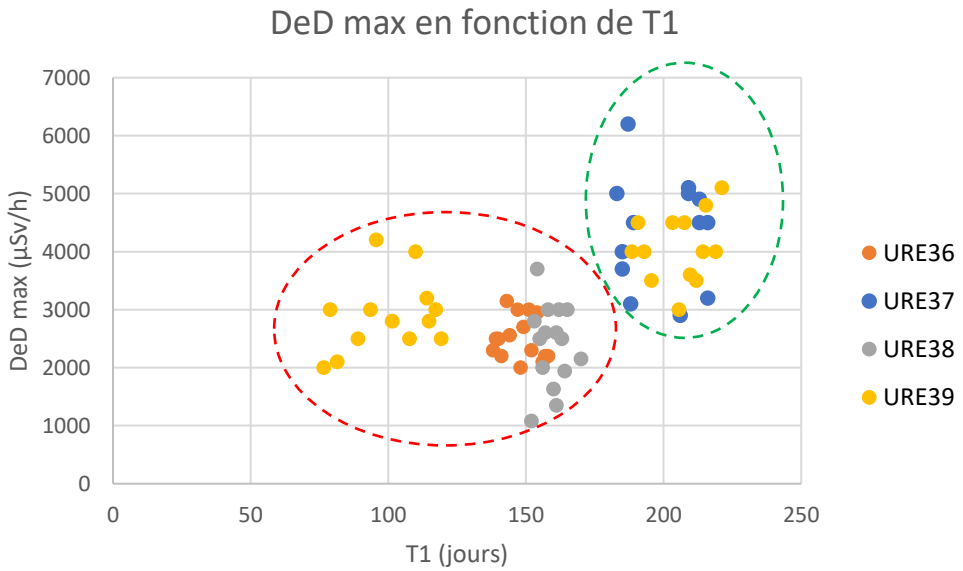
•4

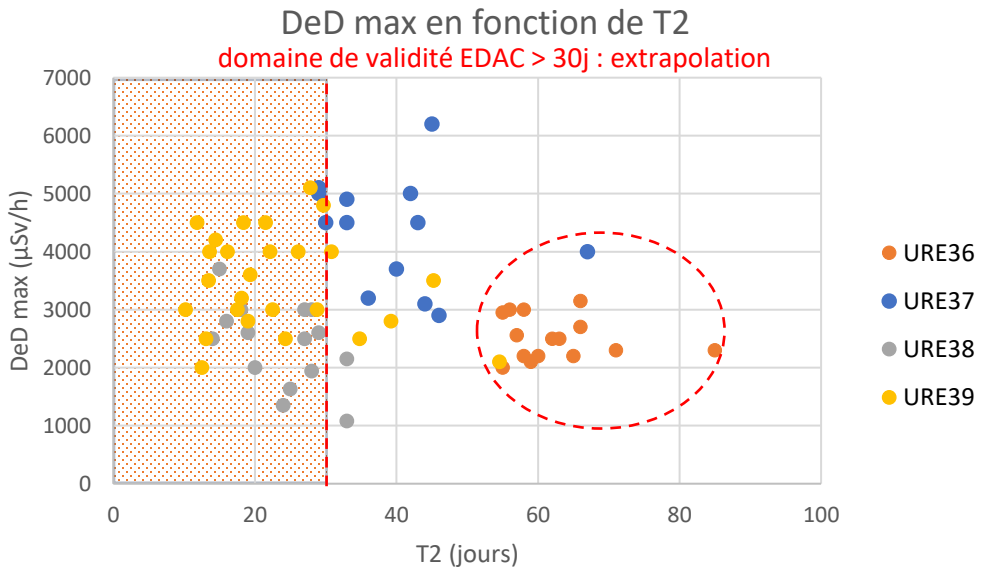
Résultats

Comparaison des écarts calculs-mesures pour les différentes campagnes

4. Mesures de DeD max sur les différents lots de cylindres nus



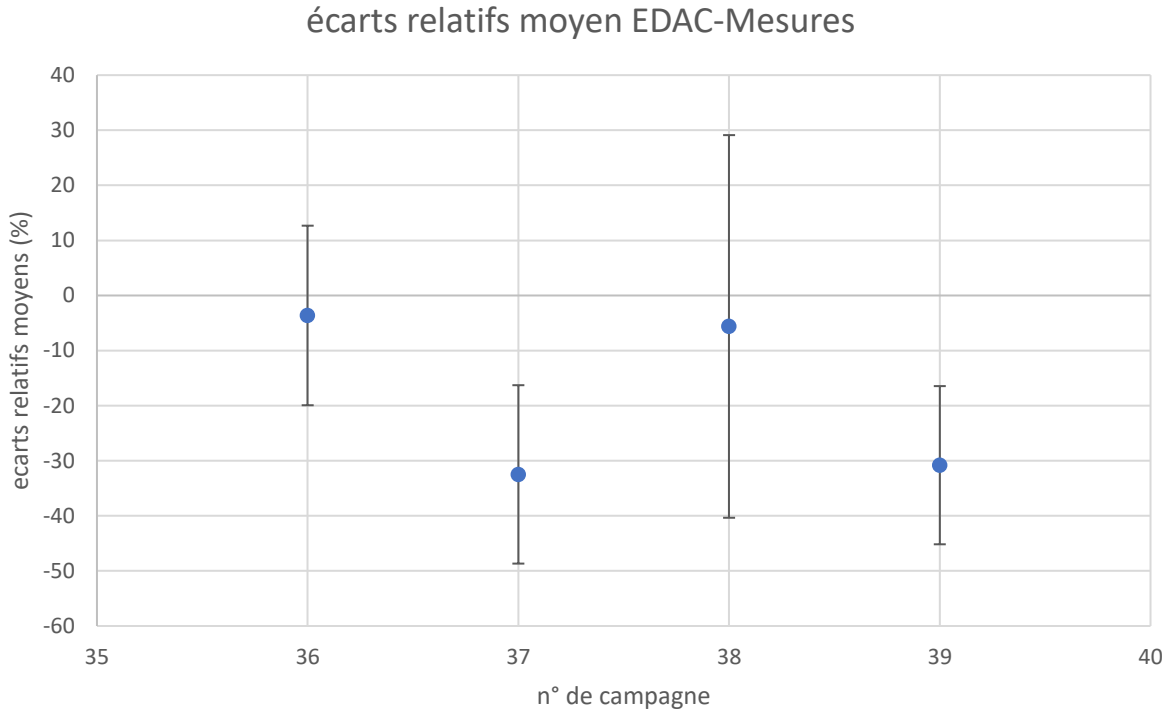




Une variation de DeD plus grande que les modèles d'évolution isotopique

Un temps de refroidissement plus grand qui n'explique qu'en partie les différences de DeD

4. Comparaison calculs-mesures

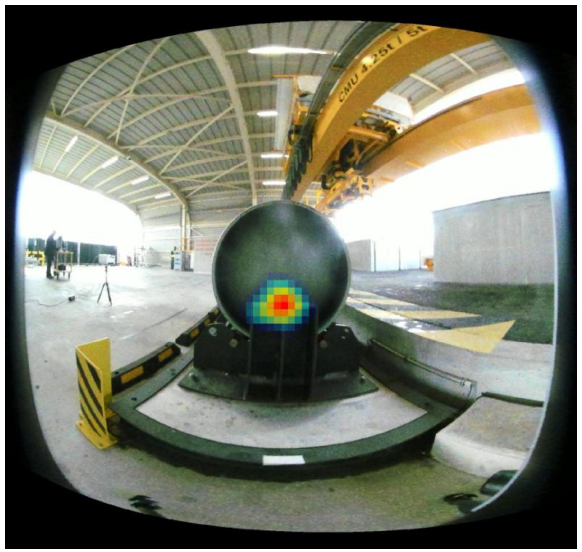


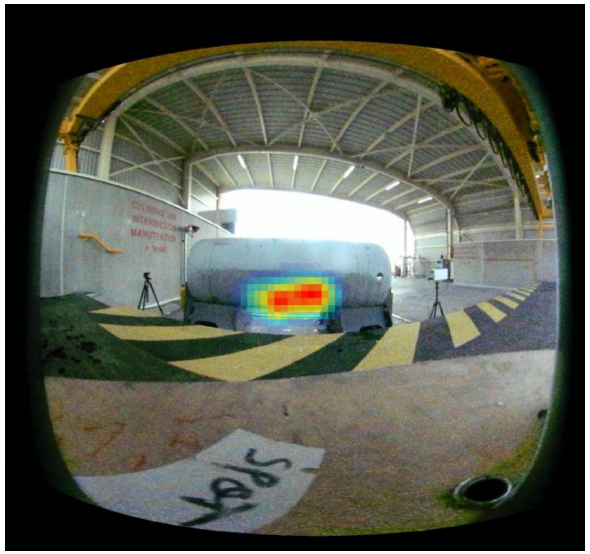
En moyenne, EDAC sous-estime les valeurs de DeD max (entre 5 et 40% selon les campagnes) :

- Ecarts relatifs absolus compris entre 15% et 30%
- Résultats affichés sans prise en compte du Bremsstrahlung (~ +11% sur le DeD)
- Mauvaise modélisation du terme source → hypothèse de dépôt uniforme qui s'avère non réaliste
- Difficulté à pouvoir prédire la manière dont la matière va se déposer dans le cylindre et former des points chauds → calculs réalisés au milieu de la génératrice inférieure

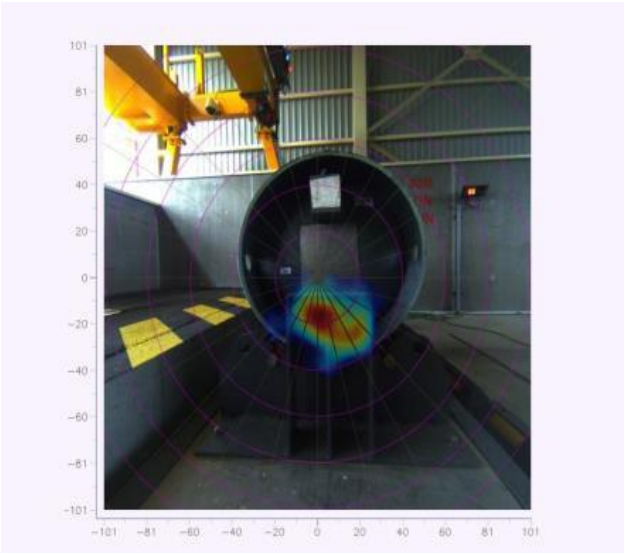
4. Imagerie du terme source non uniforme : caméra gamma Compton

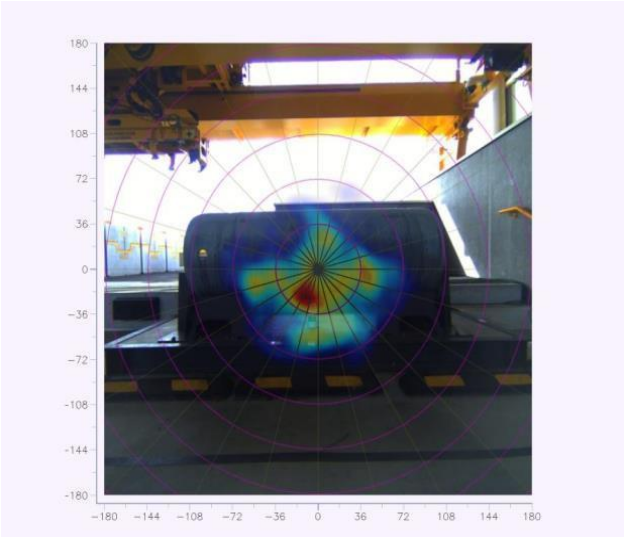
Polaris (H3D) / CZT / **Δθ ~ 30°** / algorithme EM-ML



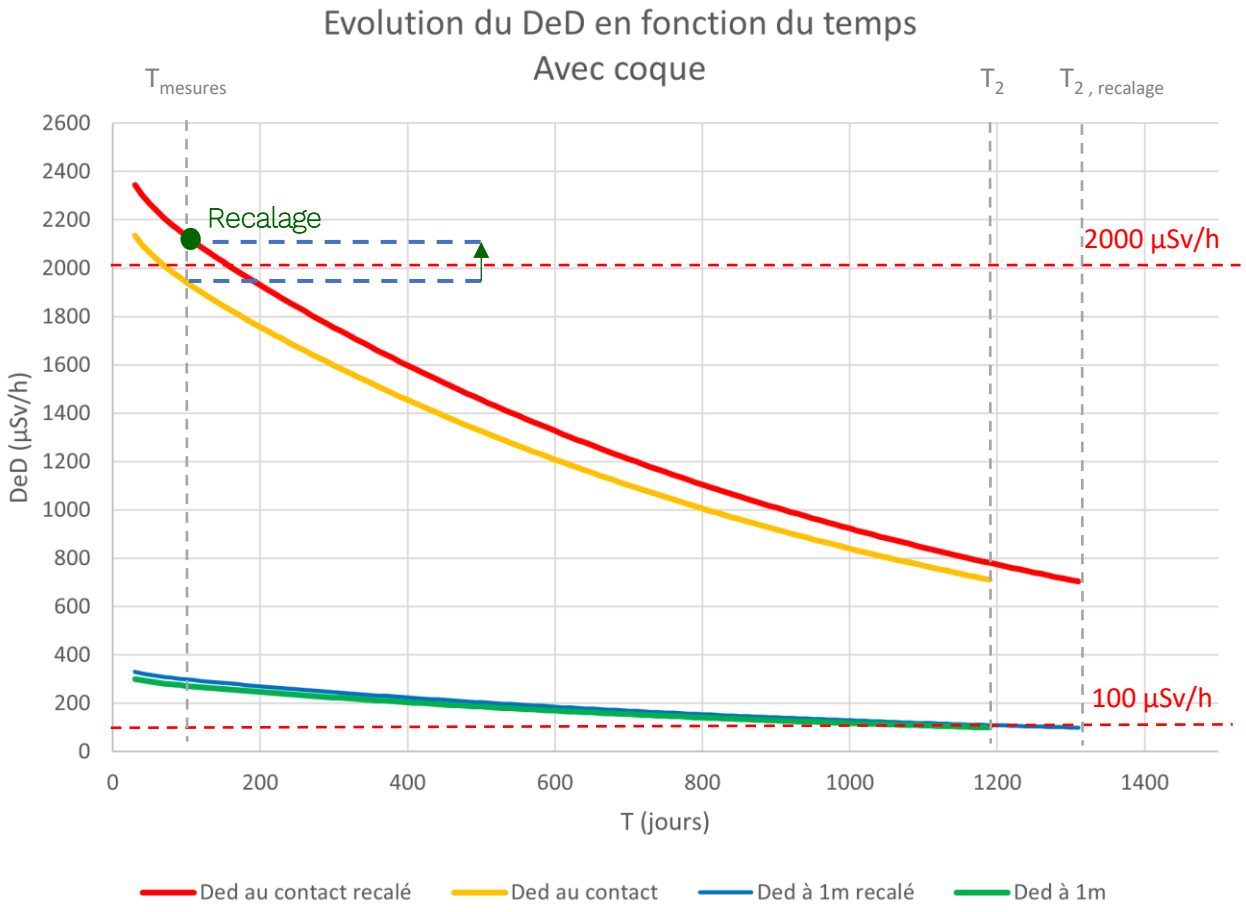


Temporal V3 (DAMAVAN) / $CeBr_3$, CZT / **Δθ ~ 8°**





4. Ajustement du modèle EDAC



- Ajustement sur données réelles lors de l'expédition depuis Framatome vers Pierrelatte
  - → PV d'expédition fourni par Framatome sur cylindre nu
  - → On applique l'écart calculs-mesures sur les calculs avec coque
  - → Si mesures < calculs : pas d'ajustement
  - → Si calculs < mesures : ajustement nécessaire
  - → Permet de garantir une meilleure estimation de T_2 et une approche conservative
- Permet de s'affranchir de la non-connaissance de la distribution spatiale du terme source

•5

Conclusion et perspectives

Conclusion

- Travail R&D afin de développer un outil le plus performant possible pour la gestion des cylindres 30B URE

  → Amélioration des modèles géométriques
  → Hypothèses plus réalistes et moins conservatives

- Pour la première fois, des campagnes de mesures ont été réalisées sur des cylindres 30B pour recaler le modèle EDAC

  → Cartographie DeD gamma + spectres
  → Sous-estimation moyenne (entre 5 et 40% selon les campagnes)

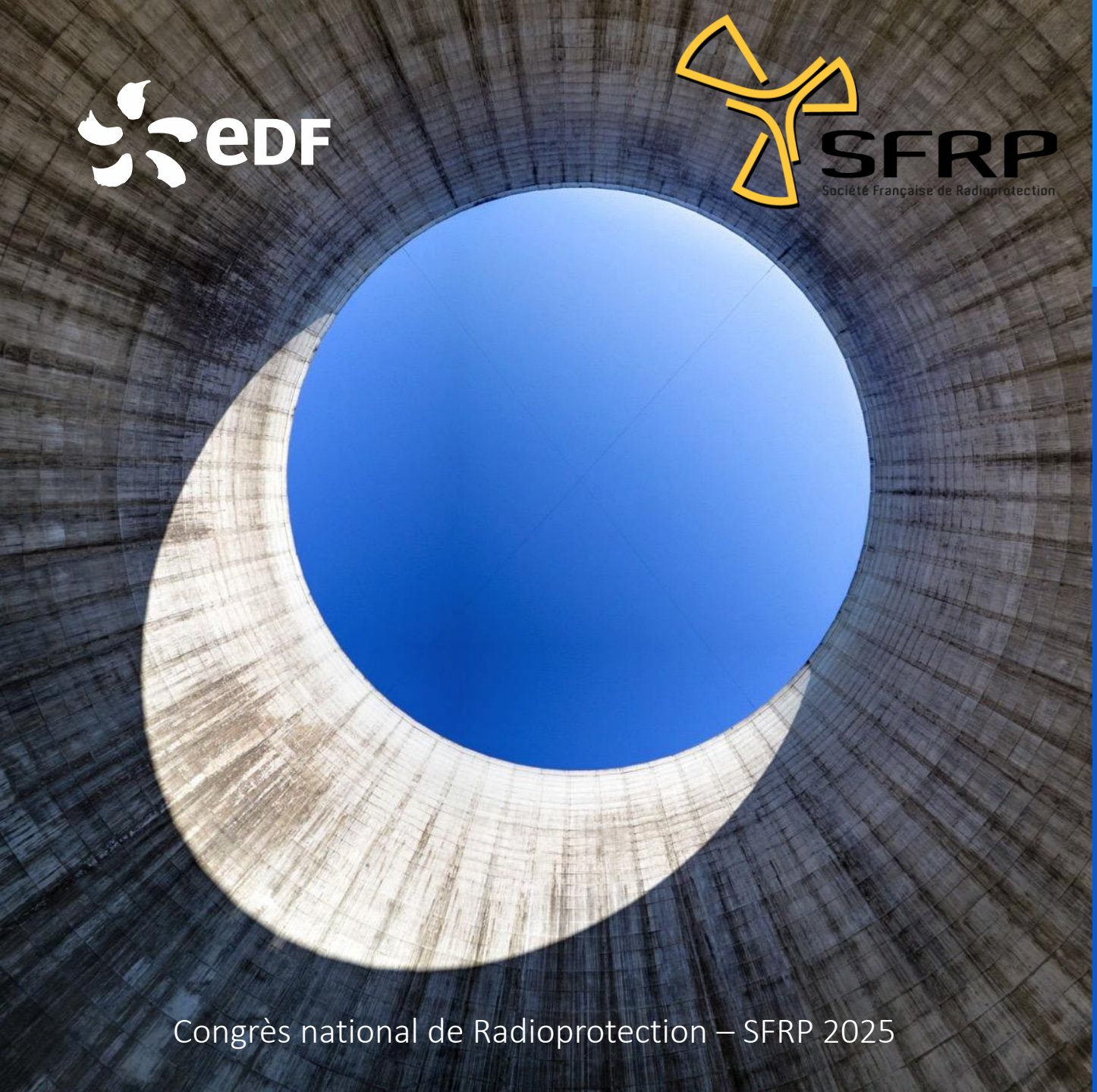
    – Ecarts explicables au vue des hypothèses de modélisation du terme source
    – Difficulté de réaliser des mesures reproductibles : variabilité du DeD spatialement et incertitudes de mesures
    – Amélioration potentielle en prenant en compte l'effet Bremsstrahlung

- Ajustement sur données réelles pour s'affranchir de la distribution spatiale du terme source
- Développement R&D et utilisation par l'ingénierie

Perspectives

- Pérennisation de l'outil grâce à une version sous Python
- Continuer à analyser les spectres et modifications des hypothèses EDAC vis-à-vis des isotopes choisis
- Comparer les résultats du nouvel outil avec les futures campagnes

Merci



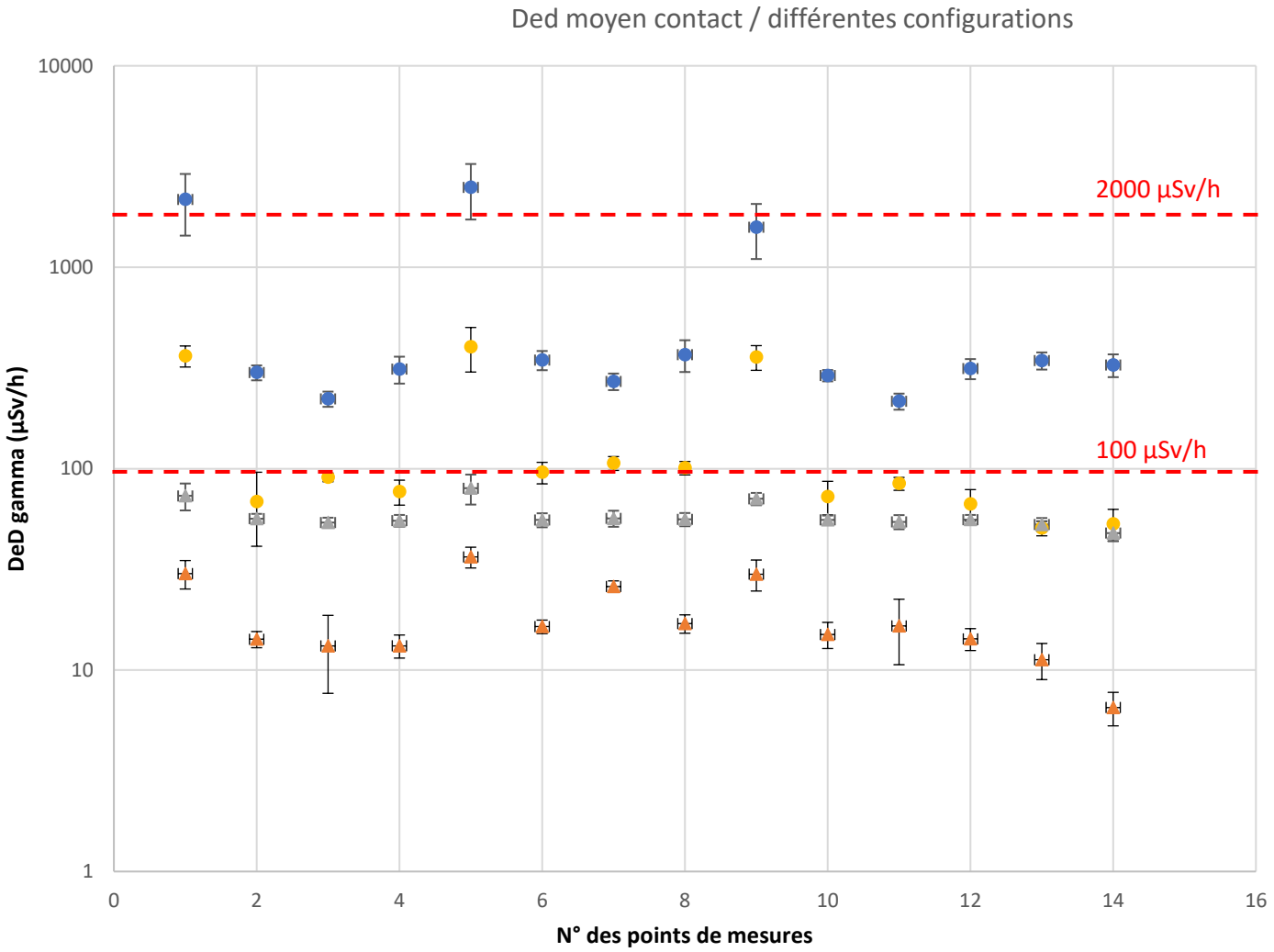
Christopher FILOSA (EDF R&D)

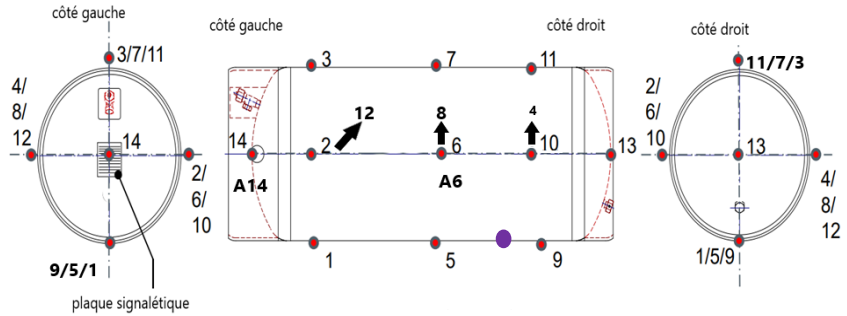
Renaud Crinon, Fabrice Hoareau, Elisa Farkas, Ludovic Idoux, Eric Jarlegan, Marianne Delfaud

17/06/2025

Annexes

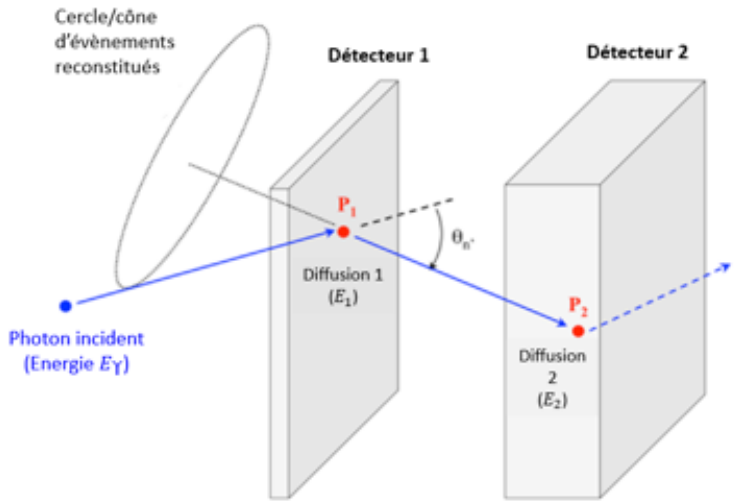
Cartographie DeD autour d'un cylindre - campagne URE36

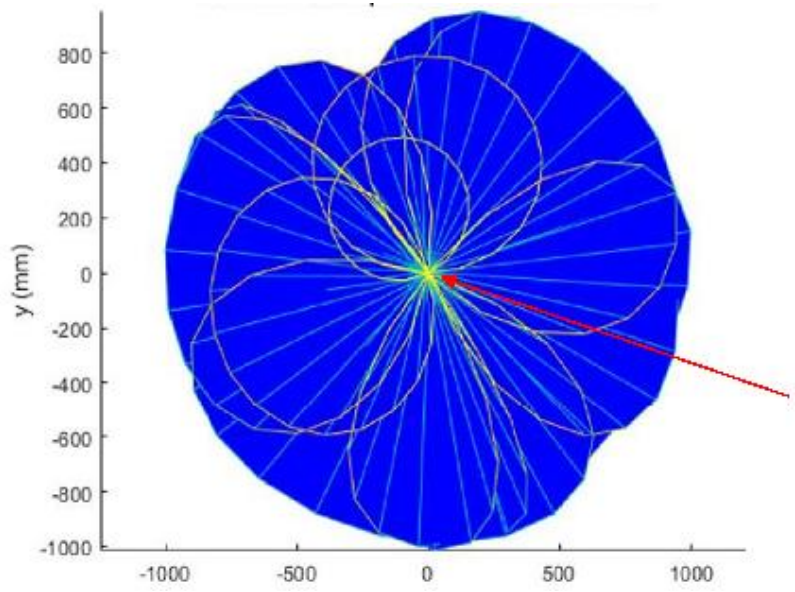




- CYLINDRE VIDE AVEC COQUE
- CYLINDRE VIDE SANS COQUE
- CYLINDRE PLEIN AVEC COQUE
- CYLINDRE PLEIN SANS COQUE

Imagerie Compton des cylindres : comparaison Damavan/H3D



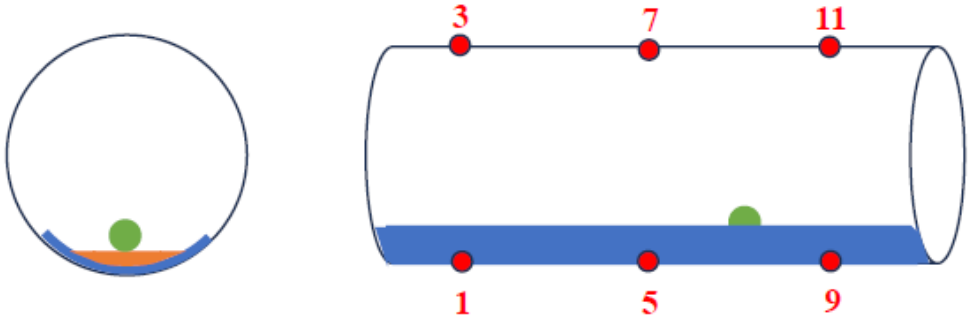


	Polaris (H3D)	Temporal V3 (DAMAVAN)
Détecteurs	CZT (semi-conducteur)	CeBr3 (lu par SiPM) CZT
Résolution en énergie	1,1%	-
Pouvoir de séparation	30°	8°
Rapport S/B	3/1	8/1 (Δt = 500ps)
Refroidissement	Non	Oui < 0°C

Images : @DAMAVAN

Quelle modélisation TRIPOLI4 ?

Modèle cherry cake :



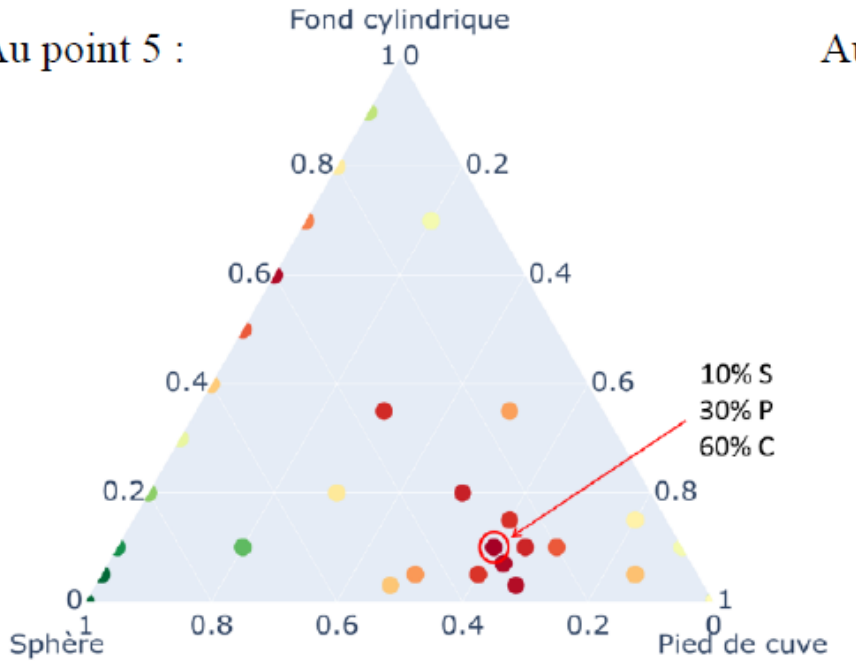
S : Sphère
P : Pied de cuve
C : Fond cylindrique

Ecart relatif au point 9 en % (TRIPOLI4 - Mesure) :

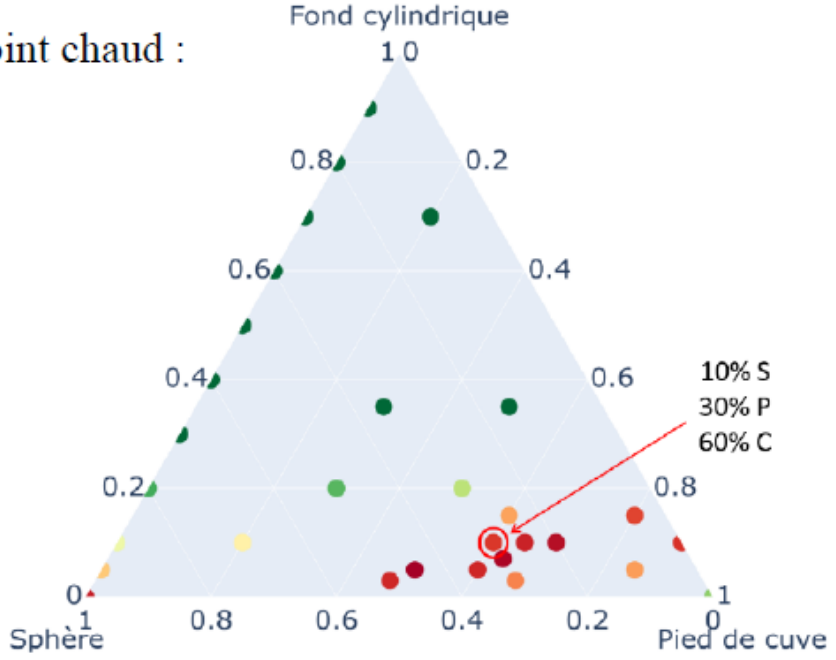
Modèle TRIPOLI4	Ecart relatif (%)
Cherry cake initial	11,7
Cherry cake avec point chaud décalé de 5cm	4,6

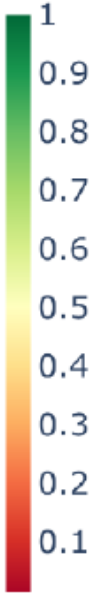
Diagrammes ternaires représentant l'écart relatif absolu entre les mesures et le calcul TRIPOLI4

Au point 5 :



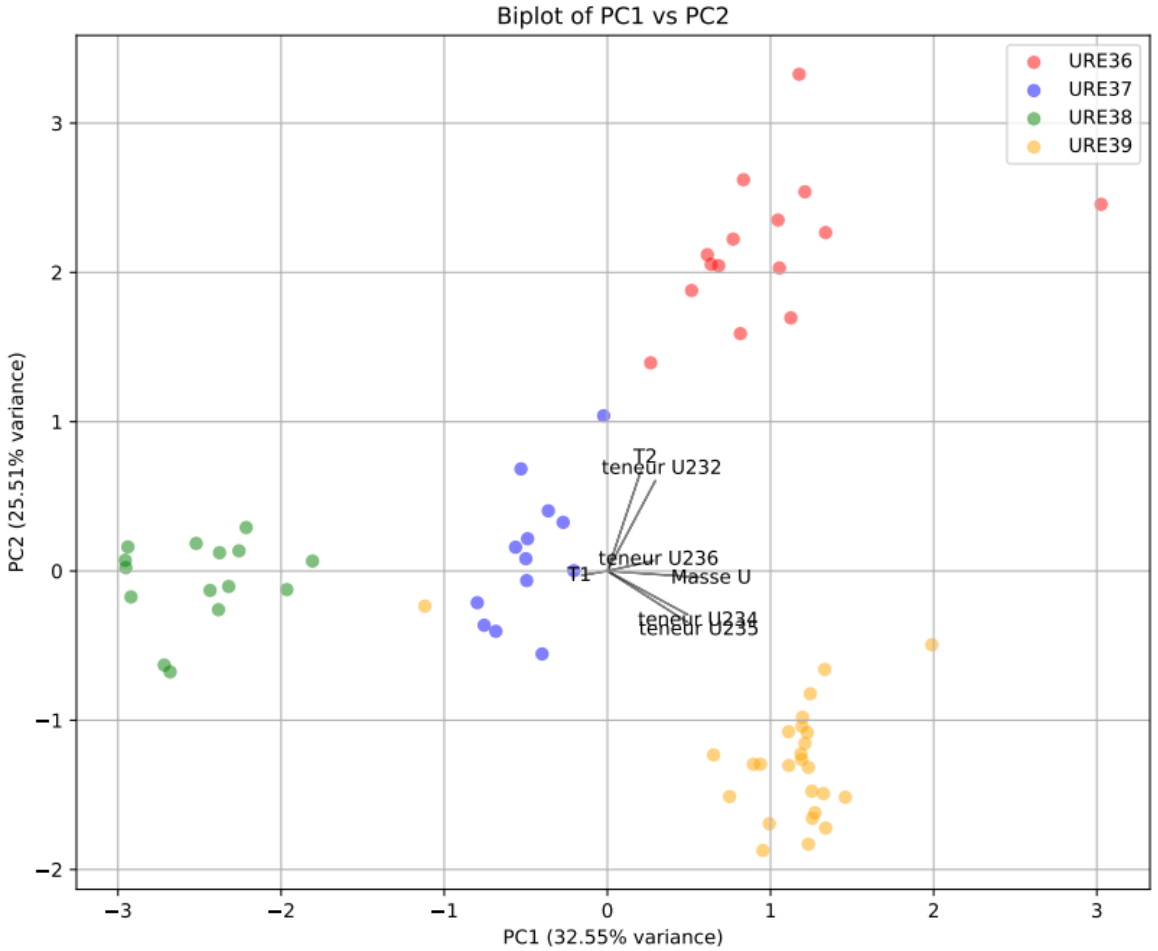
Au point chaud :

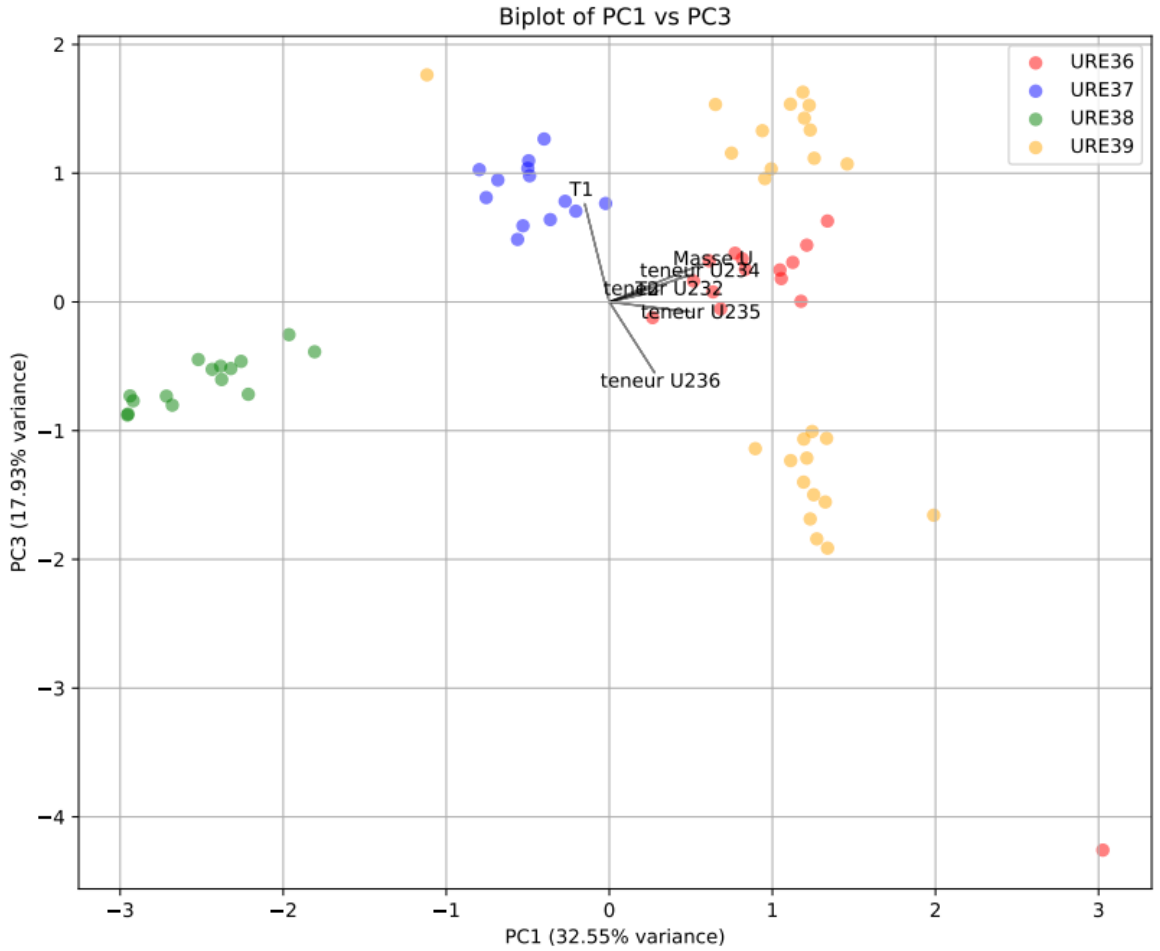




Caractérisation des lots de cylindres (ACP)

7 variables importantes : masse totale U, teneur en ^{232}U / ^{234}U / ^{235}U / ^{236}U, T_1, T_2





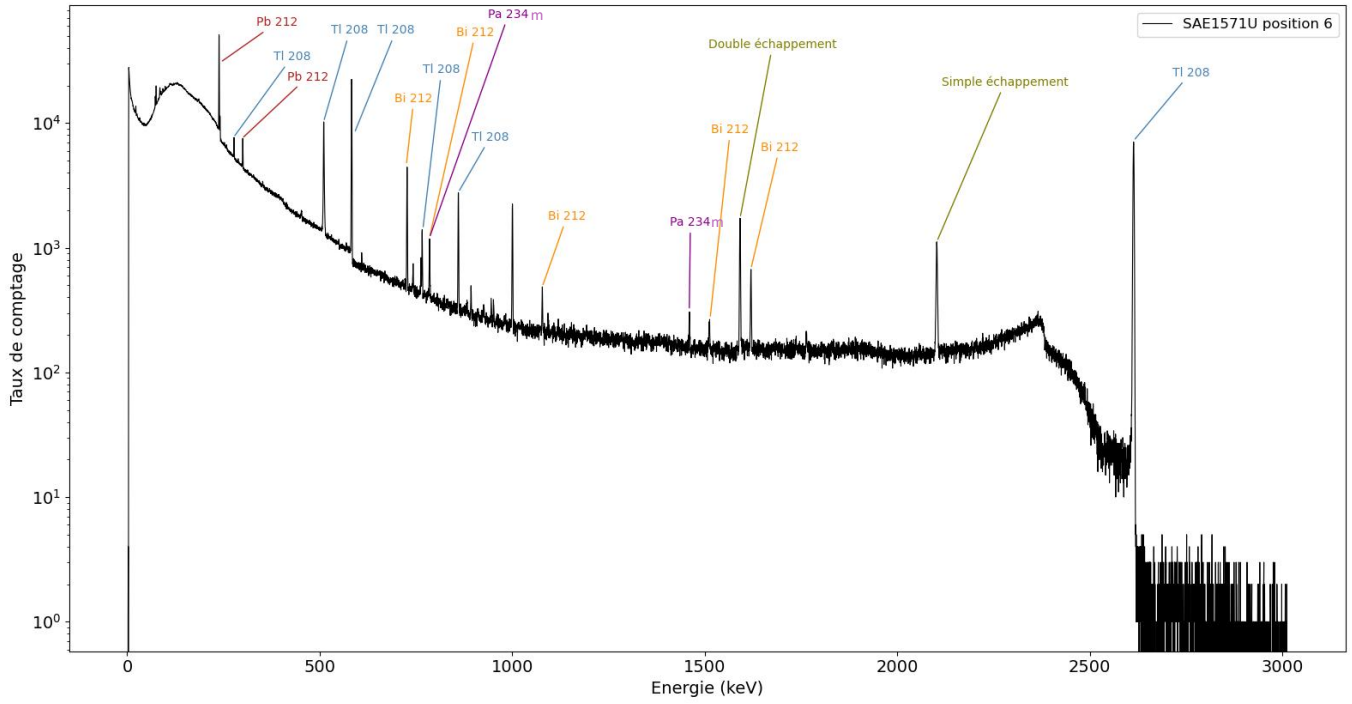
Des variables fortement corrélées qui n'expliquent que 76% de la variance

Lien entre mesures et chaîne de calculs

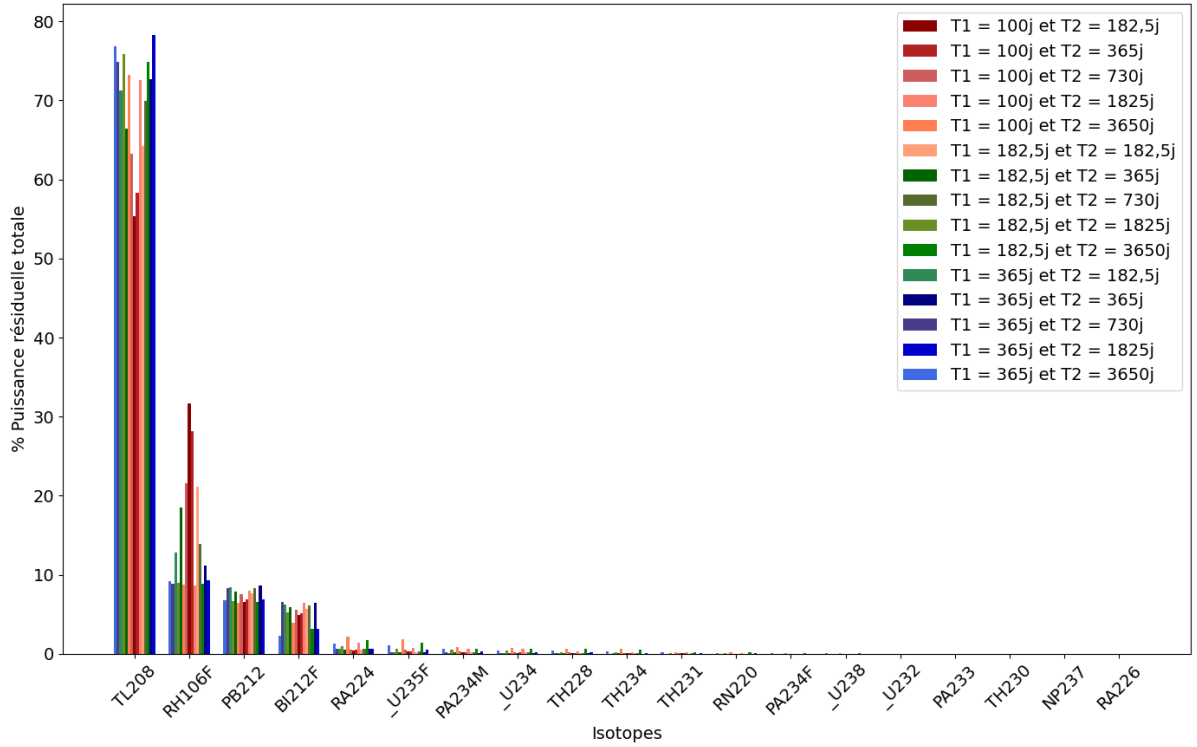
- 11 isotopes caractéristiques sont choisis dans EDAC :

→ ^{232}U, ^{234}U, ^{235}U, ^{238}U, ^{237}Np, ^{106}Ru, ^{234}Th, ^{230}Th, ^{228}Th, ^{226}Ra, ^{233}Pa

- Besoin de confronter ces choix aux mesures expérimentales



Spectre gamma mesuré / Identification isotopiques



Contributions de chaque isotope à la puissance résiduelle calculées par DARWIN-PEPIN2