

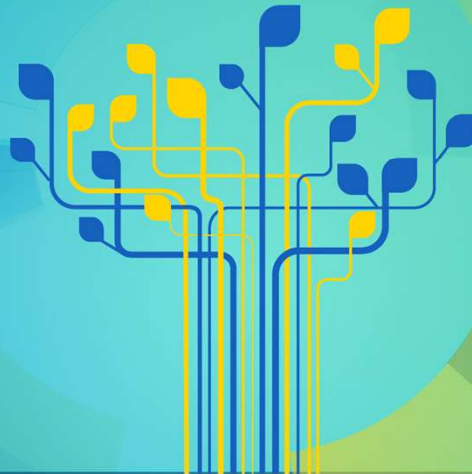


HSE  
Radiation Protection

# Caractérisation radiologique de câbles irradiés: une approche statistique.

**ATSR 2024**, 18-20 septembre, Tricastin – Saint-Paul-Trois-Châteaux (France).  
Session: Gestion des déchets et matériaux.

Andrea Gomes, A. Camerini, G. Dumont, M. Magistris, N. Mena, C. Theis.  
**CERN**, Organisation européenne pour la recherche nucléaire, Genève (Suisse).



# Table des matières

## 1. Introduction

1. Libération
2. Câbles irradiés
3. Mesures
4. Objectifs

## 2. Méthodologie

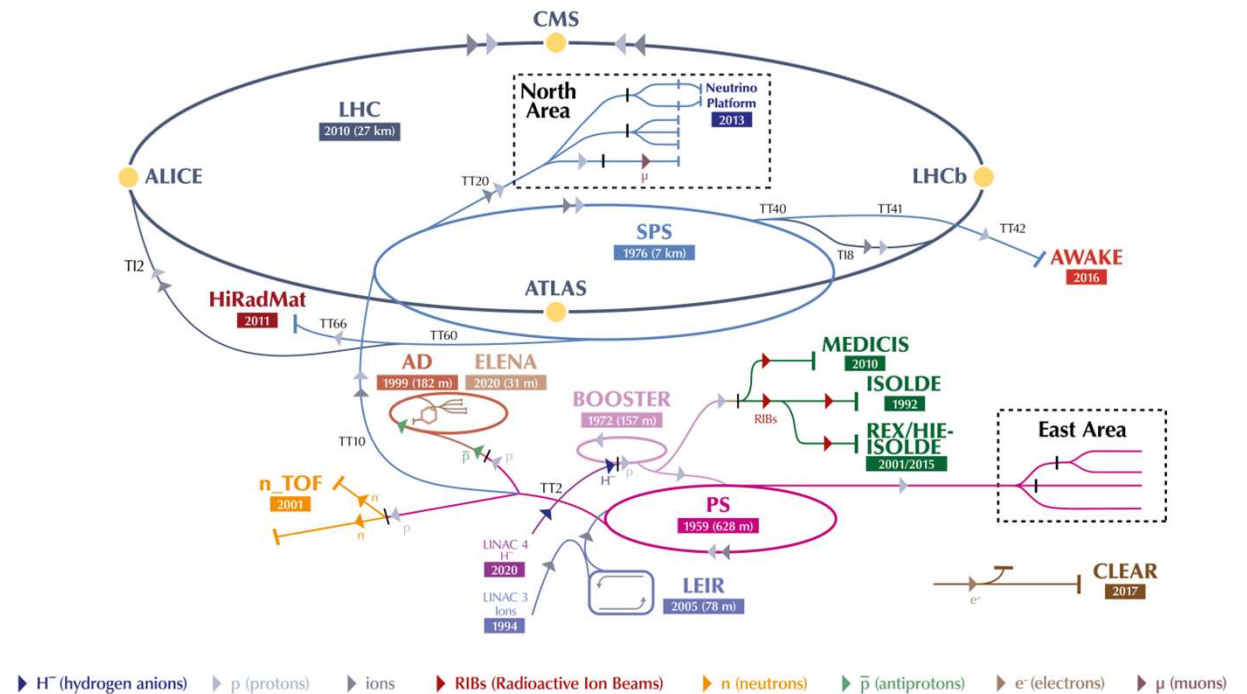
## 3. Résultats

1. Critères de classification
2. Validation expérimentale

## 4. Conclusions

## Sources

The CERN accelerator complex  
Complexe des accélérateurs du CERN



## 1.1 Introduction - Libération

### Déchets candidats à la libération inconditionnelle (clearance)

L'**OFSP** (Office fédéral de la santé publique) autorise la **libération inconditionnelle des déchets (clearance)** si ces trois critères sont respectés:

1. La **fraction de LL** (Limite de Libération) est **inférieure à 1**. Pour simplicité, la fraction de LL est appelée simplement LL:

$$LL = \sum_{i=0}^n \frac{A_i}{LL_i} < 1$$

ou les  $A_i$  et  $LL_i$  sont respectivement les activités spécifiques et les limites de libération (ORaP, annexe 3) des nucléides 1, 2, ..., n en Bq/g.

2. **DR < 0.1  $\mu$ Sv/h**, ou DR est l'équivalent de dose environnemental à 10 cm,  $H^*(10)$ .

3. La **contamination surfacique est inférieure à 1** :

$$\sum_{i=0}^n \frac{C_i}{CS_i} < 1$$

ou les  $C_i$  et  $CS_i$  sont respectivement les valeurs mesurées et les valeurs directrices (ORaP, annexe 3) de contamination surfacique des nucléides 1, 2, ..., n en Bq/g.



## 1.2 Introduction - Câbles irradiés

### Filière CLERIC

**CLERIC (CLEARance of iRradlated Cables)** est un projet pilote du CERN qui a ouvert une nouvelle filière pour la **libération de câbles irradiés** vers la Suisse, avec l'objectif de les recycler.

Pour libérer les câbles selon le règlement imposé par l'OFSP et pour éviter des alarmes et minimiser l'exposition des travailleurs en séparant le conducteur (cuivre et aluminium) et le matériau isolant, on classera les câbles comme clearance, si:

1. Les câbles (entiers) aient  $LL < 1$ .

2. La seule isolation ait  $LL < 1$ .

3. Le seul conducteur ait  $LL < 1$ .

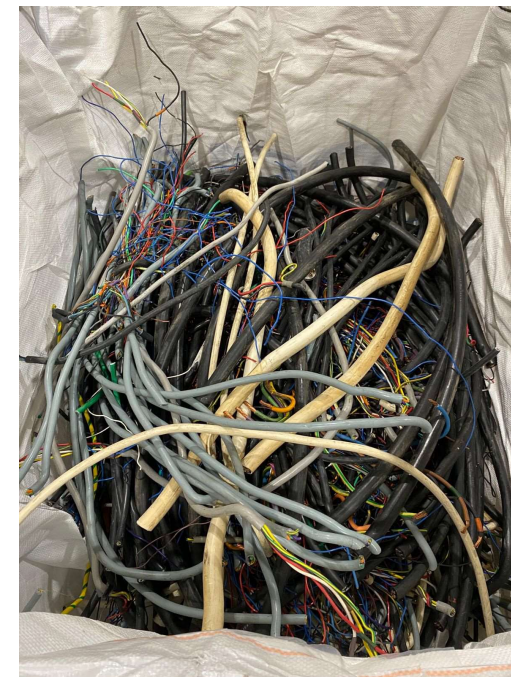
4. Les câbles aient  $DR < 0.1 \mu\text{Sv/h}$ .

5. Le seul conducteur ait  $DR < 0.03 \mu\text{Sv/h}$ .

} Requis

} Supplémentaire

L'évaluation de la contamination surfacique a lieu en utilisant des mesures expérimentales et ce n'est pas l'objectif de cette étude.



Câbles CLERIC de divers types et dimensions.

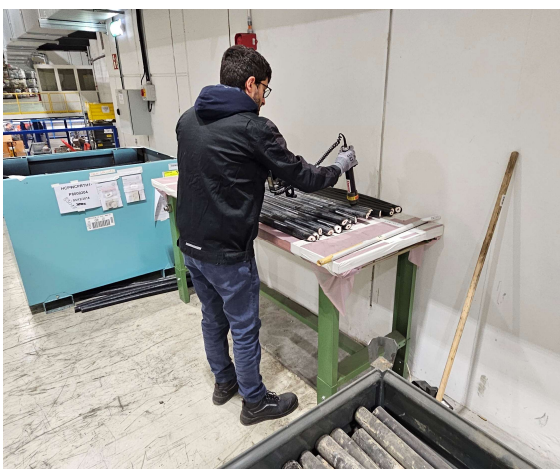
Volume	Masse
113 m <sup>3</sup>	104 t



## 1.3 Introduction - Mesures

### Processus de mesure

1. **Tous les câbles** sont soumis à un **contrôle manuel de débit de dose** effectué par un opérateur avec un détecteur à scintillation.
2. Les **câbles sont emballés dans des paniers grillagés**.
3. Le **débit de dose à contact avec les paniers grillagés** est mesuré.
4. Les **paniers grillagés sont mesurés par comptage gamma total** avec une chambre de libération (RADOS) qui fournit une **valeur d'activité en termes de Co-60 activité équivalente**.



Contrôle manuel de débit de dose.



Câbles de puissance dans une panier grillagé.



Une chambre de libération RADOS.

## 1.4 Introduction - Objectifs

### Critères de libération

Le but de cette étude est de **déterminer des valeurs limites supérieures en termes de quantités radiologiques telles que si les câbles:**

1. **Ne sont pas contaminés,**
2. **Sont au-dessus de ces valeurs,**

**On peut libérer:**

- Les câbles,
- Leur conducteur,
- Leur isolation.

D'après les mesures disponibles, les quantités radiologiques de référence sont:

1. **L'activité équivalente.** —→  $LL_{eq}$  (en Bq/g, et pas actuellement une fraction de LL)
2. **Le débit de dose.** —→  $DR_{ref}$



## 2. Méthodologie

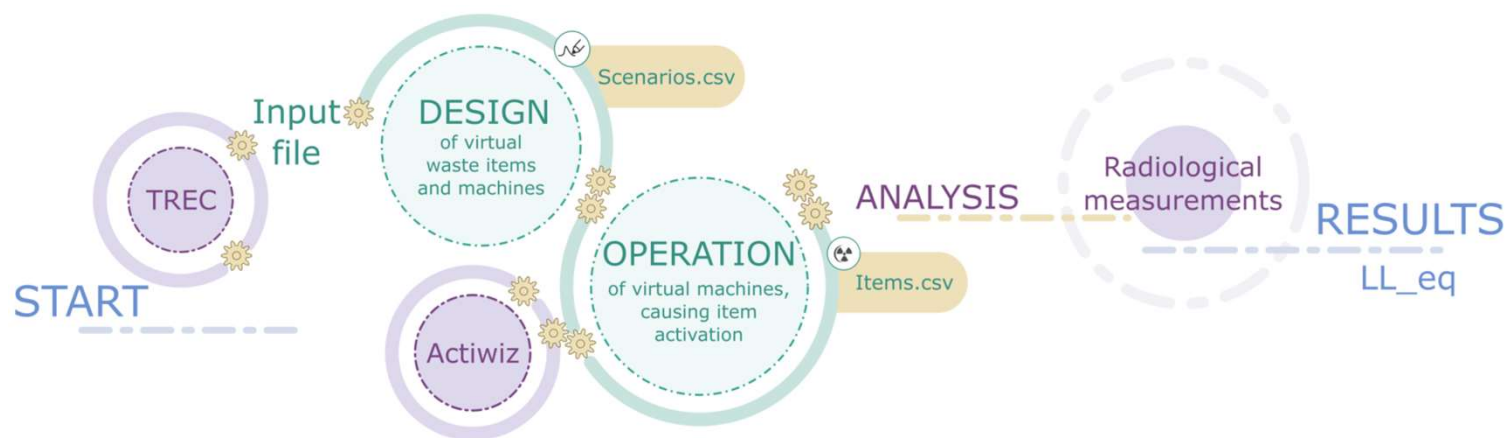
### Approche statistique

#### 1. Définition des scénarios d'activation:

- Définis par une série de paramètres d'entrée échantillonnés à partir de distributions de probabilité.
- Ces distributions décrivent les déchets et leur histoire radiologique.
- Elles sont établies à la suite d'un examen approfondi des informations disponibles sur les câbles stockés au CERN (TREC base de données).

#### 2. Évaluation des niveaux d'activité et du débit de dose:

- Pour chaque scénario, le logiciel **ActiWiz** (basé sur des simulations Monte Carlo FLUKA) fournit une évaluation des niveaux d'activité, de LL et du débit de dose du déchet correspondant. **Cette évaluation couvre le câble entier et également le conducteur et l'isolant en plastique séparément.**



## 2. Méthodologie

### Définition des scénarios d'activation

Cette méthodologie offre une **analyse statistique de dizaines de milliers de scénarios d'activation**, en ne se basant pas uniquement sur le scénario le plus pénalisant.

Les scénarios sont créés à partir de combinaisons de **paramètres d'entrée**, qui comprennent des informations sur l'objet irradié:

- Les dimensions (d'un lot de câbles/panière),
- Un ratio de remplissage pour justifier les espaces vides,
- La position dans l'accélérateur,
- La fraction de déchets récentes (par rapport à ceux stockés),
- Les temps d'irradiation et d'attente,
- L'énergie d'irradiation (accélérateur d'origine),
- Les proportions massiques des matériaux différentes.

Paramètre	Distribution	Moyenne	Min	Max	Écart-type	Probabilité
rayon [cm]	uniforme		10	60		
épaisseur [cm]	uniforme		10	60		
ratio de remplissage [-]	gaussienne tronquée	0.3	0.1	1	0.2	
InnerCyl						0
MidCyl						0
OuterCyl						0.1
BefShld						0.3
BehShld						0.3
TargLat						0
TargWall						0.3
fraction récente de déchets [-]						0.9
temps d'irradiation [y]	gaussienne tronquée	15	0.5		5	
temps d'attente (déchets récents) [y]	log-normale tronquée	2	0.5		5	
temps d'attente (déchets stockés) [y]	log-normale tronquée	10	0.5		5	
50MeV						0.02
160MeV						0.05
1400MeV						0.15
14GeVc						0.05
400GeVc						0.65
7000GeV						0.08
fraction d'aluminium [-]						0.044
fraction de cuivre [-]						0.454
fraction d'acier [-]						0.001
fraction de plastique [-]						0.491
fraction de béton [-]						0.01

Fichier d'entrée CLERIC.



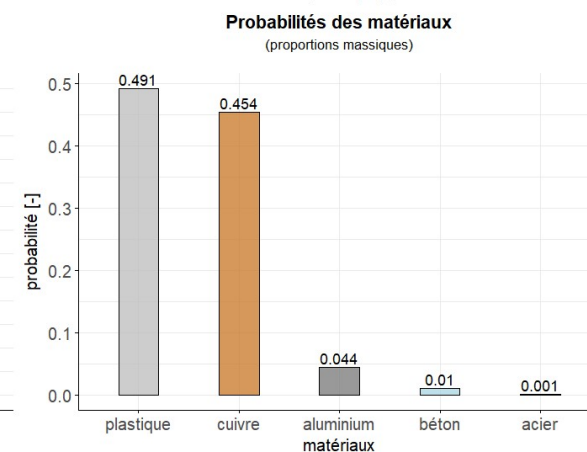
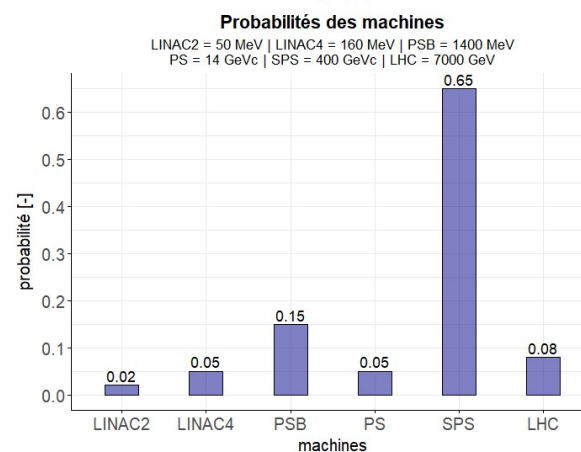
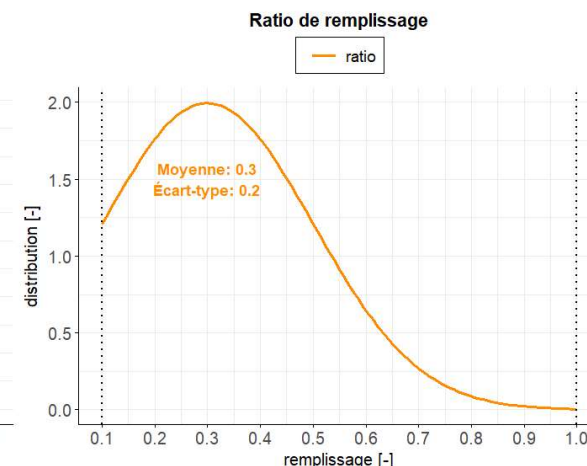
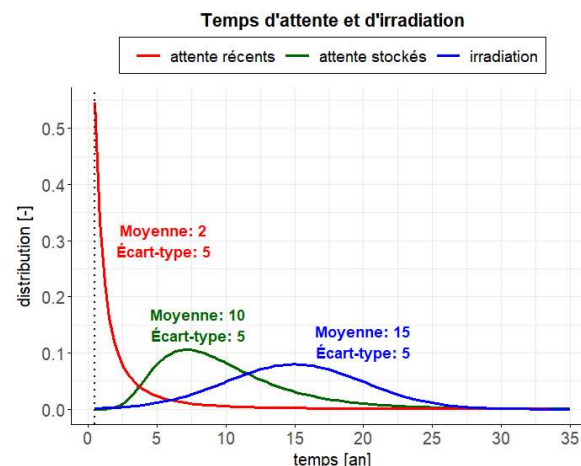


## 2. Méthodologie

### Avantages de cette approche

- On a étudié des **distributions de probabilité pour chaque paramètre** qui reflètent les caractéristiques des déchets du CERN.
- **Plus de poids est attribué aux scénarios les plus probables**, c'est-à-dire aux scénarios déterminés par des paramètres avec les valeurs les plus communes.

Cette approche permet d'obtenir des **résultats plus réalistes** que ceux qu'on pourrait obtenir **en utilisant le scénario le plus pénalisant**.



### 3.1 Résultats - Critères de classification

#### Effet de $DR_{ref}$

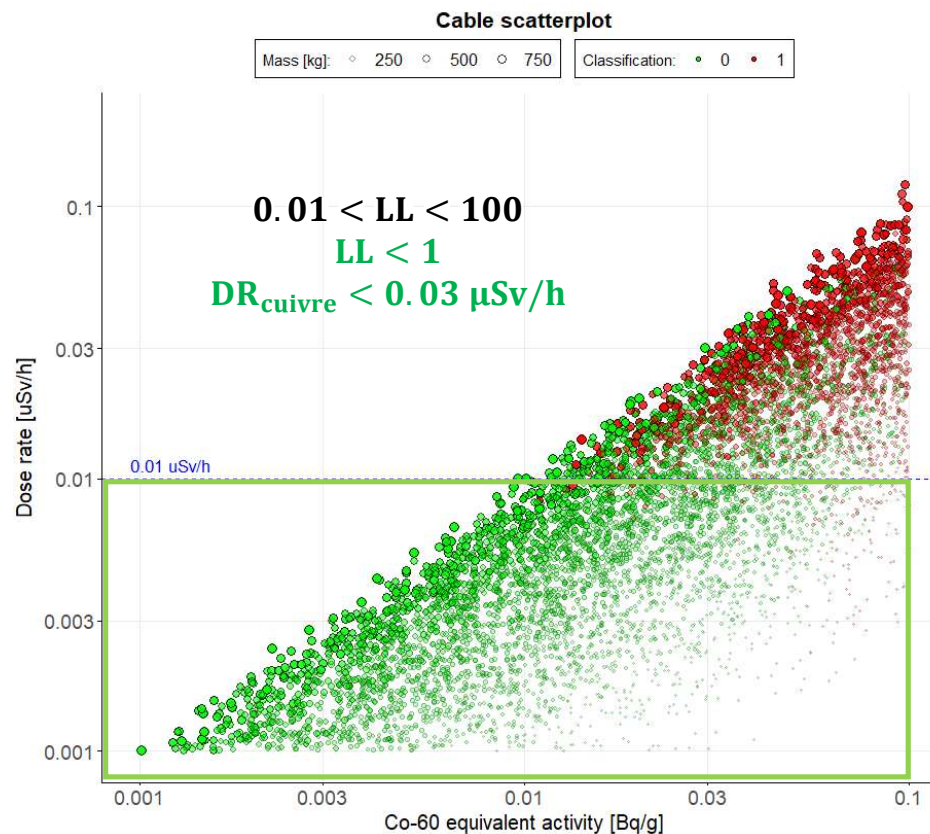
Le diagramme de dispersion montre les lots de câbles en cuivre simulés (plus de 13'000) avec  $0.01 < LL < 100$  et masse  $< 1$  t.

- **Corrélation positive** entre le débit de dose et l'activité équivalente.
- Pour une activité équivalente donnée, le **débit de dose augmente avec la masse**.
- Pour un débit de dose donné, **l'activité équivalente diminue avec la masse**.

**Seuil candidat:**  $DR_{ref} = 0.01 \mu\text{Sv/h}$ .

**Problème:** pour « éliminer » tous les points rouges il serait nécessaire de réduire considérablement  $DR_{ref}$  (pas réaliste).

**Solution:** introduction de  $LL_{eq}$ , en complément du seuil de débit de dose.



Débit de dose vs activité équivalente pour les lots de câbles en cuivre.

### 3.1 Résultats - Critères de classification

#### Classification basée sur l'activité équivalente

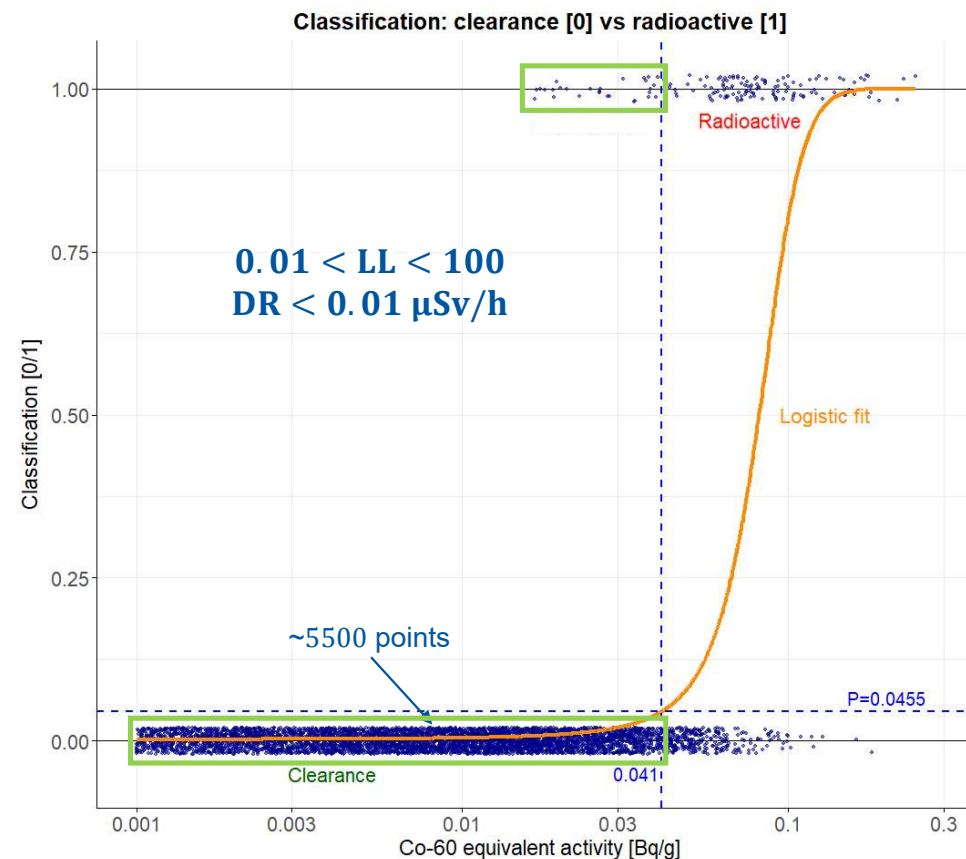
On a sélectionné les câbles avec  $DR < 0.01 \mu\text{Sv/h} = DR_{\text{ref}}$ .

On a utilisé un modèle logistique pour créer un ajustement de cette classification en fonction de l'activité équivalente.

On a défini le  $LL_{\text{eq}}$  comme l'activité équivalente pour laquelle la probabilité de classer correctement un objet clearance est de 95.45% (2 sigmas).

- $LL_{\text{eq, cuivre}} = 0.041 \text{ Bq/g}$ ,
  - $LL_{\text{eq, aluminum}} = 0.039 \text{ Bq/g}$ .
- }  $LL_{\text{eq}} = 0.04 \text{ Bq/g}$

Typiquement, la probabilité d'erreur est bien inférieure à 4.55%.



Modèle logistique pour la classification des câbles en cuivre.



## 3.1 Résultats - Critères de classification

### Fonction de densité de LL

- Le LL des câbles est inférieure à celui de leurs conducteurs: **le conducteur présente plus de radioactivité que l'isolation** (présence de Co-60 et aussi de Na-22 dans l'aluminium).
- Le **LL des conducteurs** des câbles clearance:
  - est toujours **< 1 pour le cuivre** (la pointe du diagramme qui dépasse 1 est un artefact graphique),
  - atteint une **valeur maximale de 1.03 pour l'aluminium** (3 objets parmi plus de 2600 dépassent 1).

Pour tous les conducteurs, **la probabilité d'avoir  $DR > 0.03 \mu\text{Sv/h}$  est environ 0.3%**.

Les câbles marqués comme radioactifs par l'approche statistique et ayant une activité équivalente inférieure à  $LL_{eq}$  n'ont pas  $LL > 1$  mais contiennent un conducteur avec  $DR_{cuivre} > 0.03 \mu\text{Sv/h}$ .

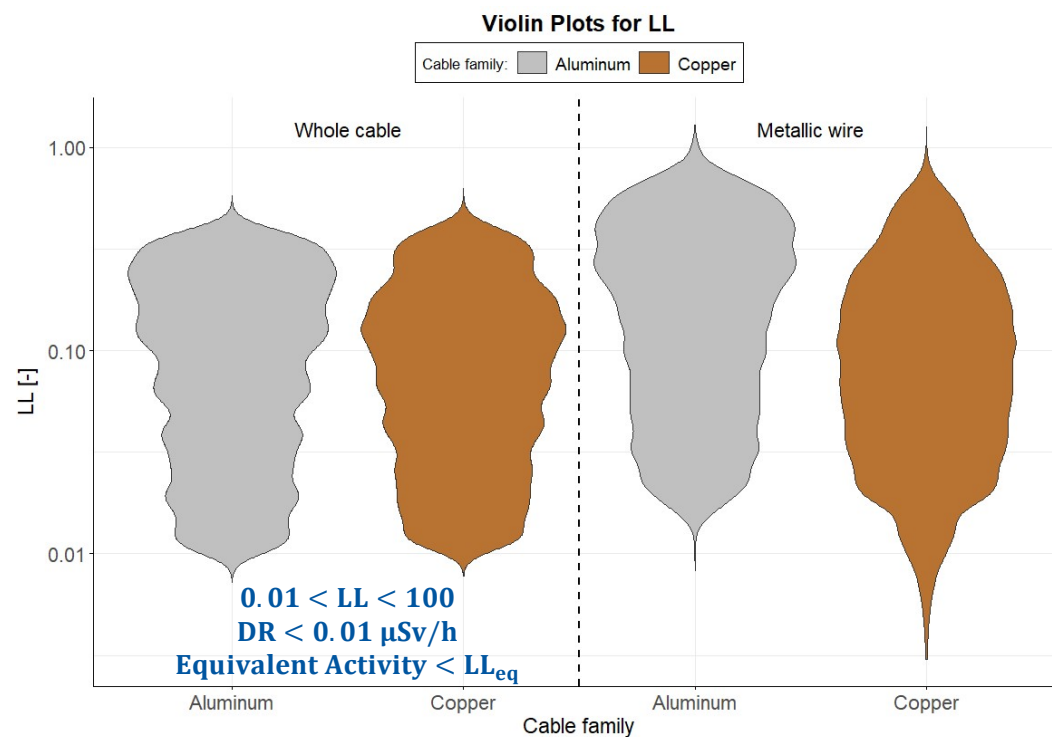


Diagramme en violone pour la fraction de LL des câbles entiers et des conducteurs pour les câbles clearance.

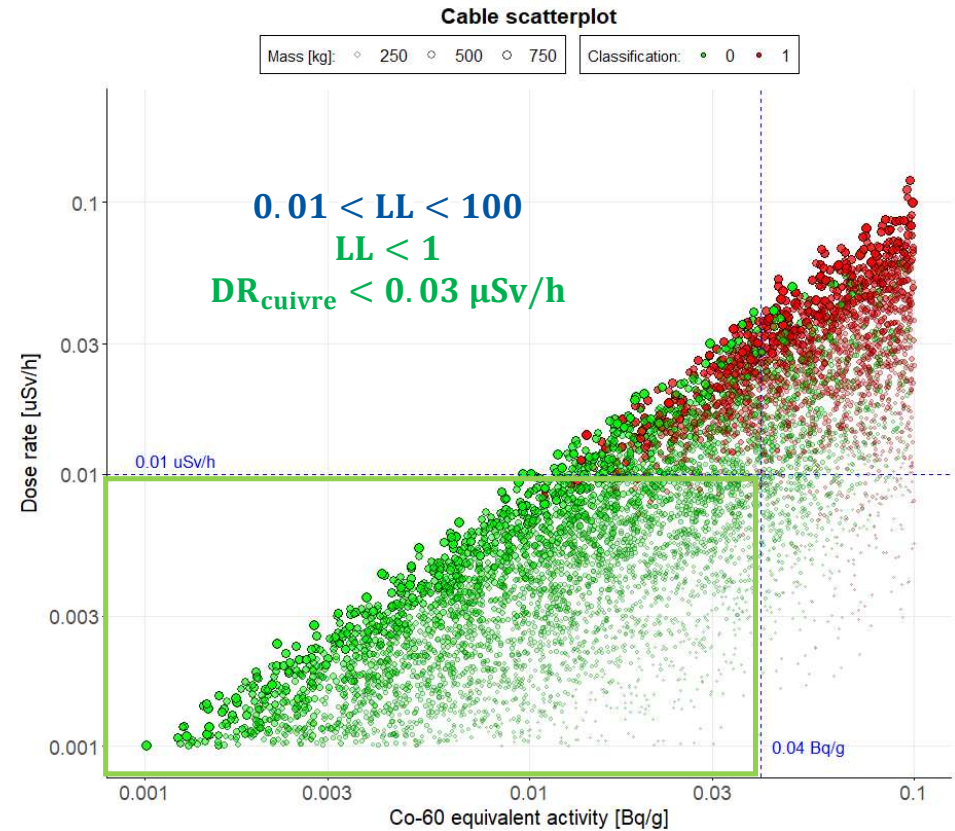
### 3.1 Résultats - Critères de classification

Effet combiné de  $LL_{eq}$  et  $DR_{ref}$

Il est recommandé de classer comme **clearance** uniquement les points qui montrent:

1. **Activité équivalente**  $< LL_{eq} = 0.04 \text{ Bq/g}$ ,  
↳ Efficace pour les petits lots
2. **Débit de dose**  $< DR_{ref} = 0.01 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ .  
↳ Efficace pour les lots massifs

Ceux deux critères, pris ensemble, améliorent la précision de la classification.



Débit de dose vs activité équivalente pour les **lots de câbles en cuivre**.

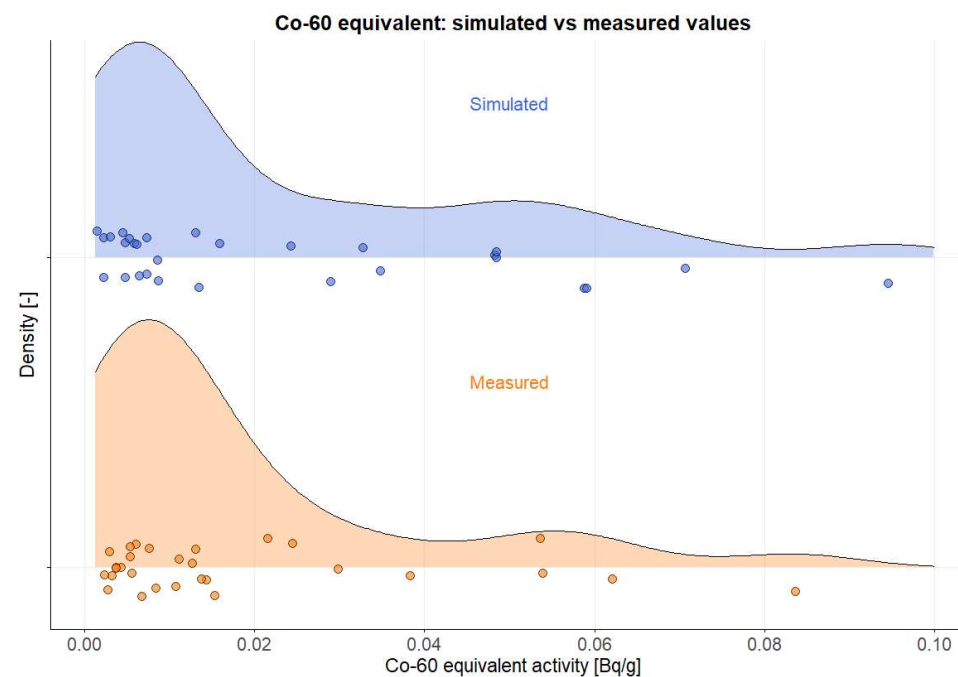
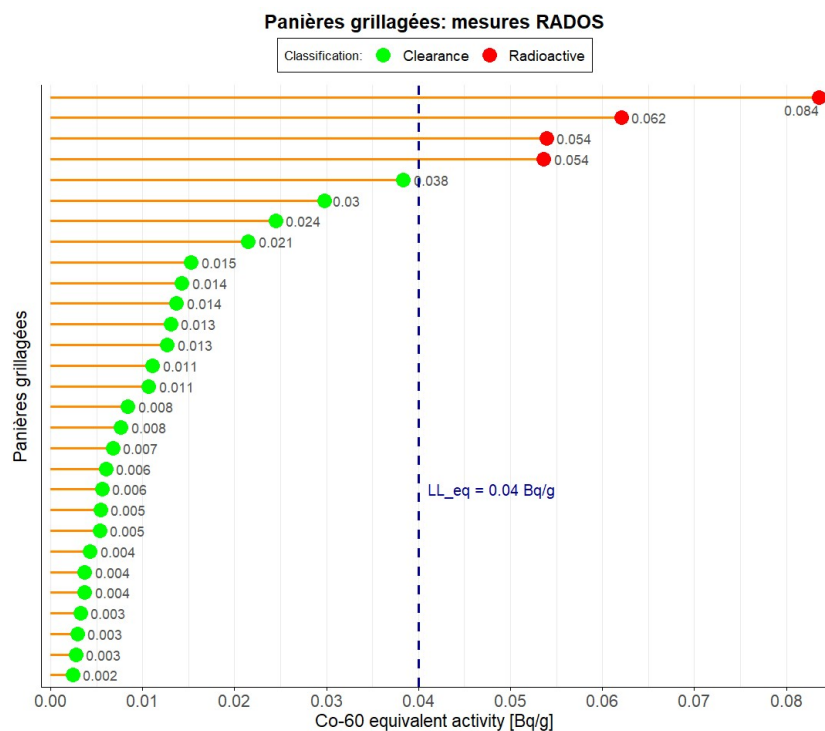




## 3.2 Résultats - Validation expérimentale

### Concordance avec les mesures expérimentales

Pour le projet pilote CLERIC, on a **mesuré 29 paniers grillagés de câbles en cuivre** avec une chambre de libération ( $DR < DR_{ref}$  et masse  $< 250$  kg). On a **sélectionné de manière aléatoire le même nombre de lots de câbles simulés** avec les mêmes caractéristiques et comparé leur activité équivalente avec celle mesurée (fournie avec une précision de 2 écarts-types).



Activité équivalente mesuré et simulé pour les lots de câbles en cuivre.

## 4. Conclusions

Afin de classer de manière fiable les câbles irradiés au CERN pour le recyclage, il convient de:

1. Vérifier que leur **débit de dose est**  $< DR_{ref} = 0.01 \mu\text{Sv/h}$ .
2. **Les emballer** dans des paniers avec un **débit de dose à contact**  $< DR_{ref} = 0.01 \mu\text{Sv/h}$ .
3. **Mesurer les paniers** par comptage gamma total et vérifier que **l'activité équivalente est**  $< LL_{eq} = 0.04 \text{ Bq/g}$ .

L'approche statistique:

- **Simule des dizaines des milliers de scénarios** en utilisant des distributions de probabilité pour **décrire les câbles et leur histoire radiologique**.
- Offre une **analyse statistique complète** des différents scénarios, fournissant des résultats plus réalistes par rapport à l'utilisation d'un seul scénario pénalisant.
- **Simule** l'activation des câbles, y compris **le conducteur et l'isolation séparément**.
- Classe les câbles avec précision, en **réduisant des faux négatifs**.
- Montre une **bonne correspondance entre simulations et mesures expérimentales, renforçant la fiabilité de l'approche**.



## Sources

- G. Dumont, *CERN Radioactive Waste Management*, leçon impartie aux étudiants de master en ingénierie nucléaire à Centrale Supélec Paris, 9 février 2024, CERN EDMS 3026072 v.1, 2024.
- Ordonnance sur la radioprotection (ORaP) du 26 avril 2017, [RS 814.501](#).
- A. Camerini, *CLERIC Executive Summary*, CERN EDMS 3027366 v.1, 2024.
- A. Gomes et M. Magistris, *Radiological characterization of electric cables in view of clearance (CLERIC)*, CERN EDMS 3095482 v.1, 2024.
- A. Gomes, M. Magistris, R. Neugebauer et E. Stamati, *A Monte Carlo approach to use ActiWiz for radiological characterization*, CERN EDMS 3093970 v.1, 2024.



 [andrea.gomes@cern.ch](mailto:andrea.gomes@cern.ch)

 [Andrea Gomes | LinkedIn](#)

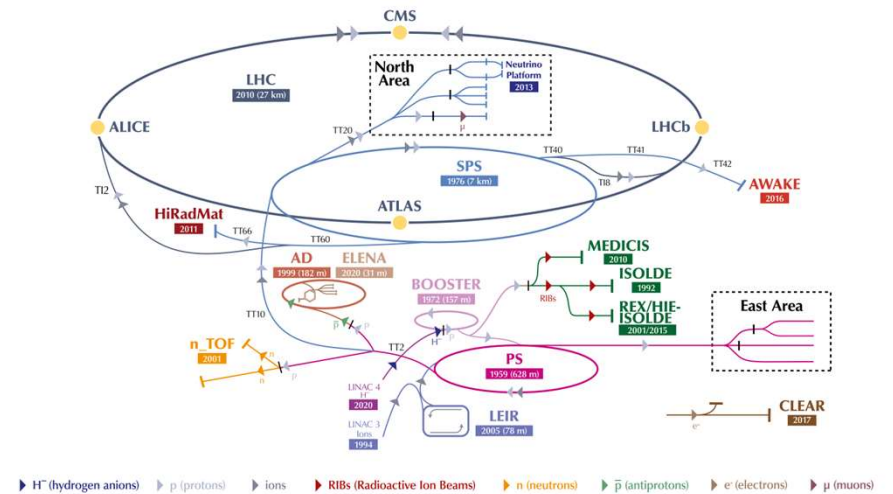


# 1. Introduction

## Irradiation de matériaux au CERN

- Centre de recherche en physique des particules le plus grand au monde.
- **~50 km de tunnels pour les accélérateurs**, dont ~27 pour le seul LHC (Grand collisionneur d'hadrons), où se produisent collisions de particules à une énergie totale de 13 TeV.
- **Tous les matériaux dans ces installations sont irradiés** par des radiations ionisantes.
- Typiquement, ces matériaux se présentent sous forme de **déchets faiblement activés et très peu contaminés**, avec des **émissions de  $\beta$  et de  $\gamma$** .
- Grande **variété de radionucléides** (principalement à vie courte ou moyenne).

The CERN accelerator complex  
Complexe des accélérateurs du CERN



Vue dans le tunnel du PS (Synchrotron à Protons).



# 1. Introduction

## Catégories des déchets

- Production annuelle de **400 à 1000 m<sup>3</sup>** de déchets potentiellement radioactifs, principalement répartis dans les catégories suivantes:
  1. **Métaux** (bobines, connecteurs, collimateurs, aimants, moteurs...).
  2. **Câbles** (de puissance, de signal, de refroidissement, fibre optique...).
  3. **Inertes** (blocs de blindage, gravats, verre, céramiques, sable, terre...).
  4. **Combustibles** (tenues jetables, plastique, bois, filtres de ventilation...).
  5. **Electriques** (piles, transformateurs, ampoules, circuits imprimés...).
  6. **Liquides** (eaux tritiées, liquides de scintillation/réfrigérants, huiles, eaux de drainage et de nettoyage...).
  7. **Sources** (scellées et non scellées) **et cibles** de faisceau.
  8. **Résines** échangeuses d'ions utilisées sur les circuits d'eau déminéralisée.
  9. **Mixtes** (déchets en mélange nécessitant un tri ou une séparation).
  10. **Autres** (poussières, scories...).
- Les **métaux** représentent **la catégorie la plus importante** (presque 50% en volume de tous le déchets), tandis que la quantité de liquides est très limitée.




Déchets entreposés dans un ancien accélérateur.



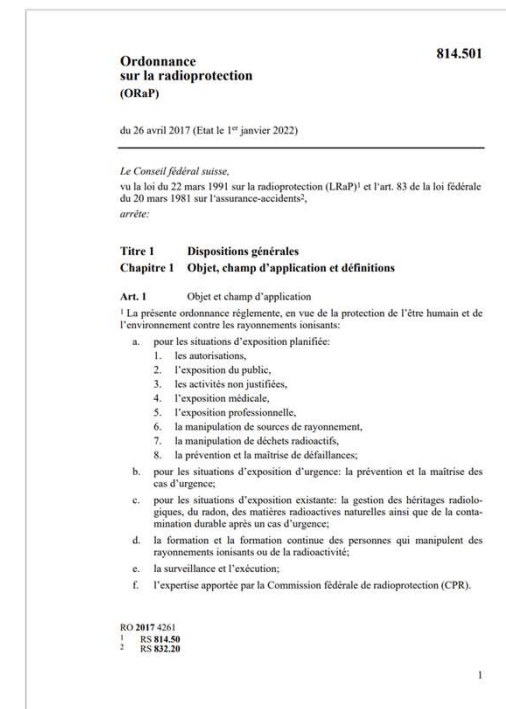
Blocs de blindage en béton et autres objets massifs.

# 1. Introduction

## Classification et destination des déchets

Catégorie	Destination
Candidats à la Libération inconditionnelle (CL). 	<b>Suisse:</b> libérés du contrôle réglementaire comme matériaux conventionnels (prêt pour le recyclage).
Très Faibles Activités (TFA). 	<b>France (ANDRA* CIRES**):</b> éliminés comme déchets radioactifs, selon les critères de l'ANDRA.
Faibles et Moyennes Activités à Vies Courte (FMA-VC). 	<b>France (ANDRA CSA***):</b> éliminés comme déchets radioactifs, selon les critères de l'ANDRA.
Faibles Activités et Moyennes Activités (FA-MA). 	<b>Suisse (Paul Scherrer Institute):</b> élimination des déchets qui ne répondent pas aux critères FMA-VC.

Libération inconditionnelle règlementée par l'Ordonnance sur la radioprotection (ORaP) du 26 avril 2017.



\* **ANDRA:** Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.

\*\* **CIRES:** Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage.

\*\*\* **CSA:** Centre de stockage de l'Aube.



## 2. Méthodologie - Approche statistique

### Base de données pour les compositions chimiques

Cette nouvelle approche statistique pose ses bases sur une **base de données inclusive pour les compositions chimiques** de tous les matériaux qui peuvent constituer des déchets candidats pour la libération ou radioactifs au CERN.

Pour chaque matériau, on a **étudié et documenté** pour des usages futurs les **densités et la fraction massique de chaque élément**.

In mowiz database?	Type	Group	Description	Density	Ag	Al	As	B
0	steel	ferritic	Stainless steel grade 430	7.8	0	0	0	0
0	steel	ferritic	Stainless steel grade 409	7.8	0	0	0	0
1	steel	ferritic	General composition for ferritic steels: 60% grade 430 + 40% grade 409 + traces	7.8	0	0	0	0.0005
0	steel	austenitic	Stainless steel grade 316	7.97	0	0	0	0
0	steel	austenitic	Stainless steel grade 304	7.97	0	0	0	0
1	steel	austenitic	General composition for austenitic steels: 60% grade 316 + 40% grade 304 + trac	7.97	0	0	0	0.0005
0	steel	carbon	Low carbon steel	7.85	0	0.044	0	0
0	steel	carbon	Medium carbon steel	7.85	0	0.0026	0	0
0	steel	carbon	High carbon steel	7.85	0	0	0	0
1	steel	carbon	General composition for carbon steels: 50% low carbon + 30% medium carbon +	7.85	0	0.022768	0.0005	0
1	steel	alloy	General composition for steel alloys	7.85	0	0.005979	0.005979	0
1	aluminum	Al_1000	Aluminum alloy 1350: Chemical composition limits specified in the reference wit	2.7	0	99.2518703	0	0
1	aluminum	Al_Cu_2000	Aluminum-copper alloy series	2.7	0	93.2530822	0	0
1	aluminum	Al_Mn_3000	Aluminum-manganese alloy series	2.7	0	96.8871985	0	0
1	aluminum	Al_Si_4000	Aluminum-silicon alloy series	2.7	0	89.4910509	0	0
1	aluminum	Al_Mg_5000	Aluminum-magnesium alloy series	2.7	0	93.6406359	0	0
1	aluminum	Al_Mg_Si_6000	Aluminum-magnesium-silicon alloy series	2.7	0	98.620138	0	0
1	copper	oxyde	Copper oxyde	6.4	0.0100042	0.03001261	0	0
1	copper	brass	Copper brass	8.6	0	0.03014409	0	0
1	copper	bronze	Copper bronze	8.75	0	0.0299991	0	0
1	lead	lead	Lead reference composition	11.3	0.00029999	0	0.00089998	0
1	plastic	polyvinylchloride	C2_H3_Cl + 50ppm of each fire retardant	1	0	0.005	0	0
1	plastic	polyethylene	C2_H4 + 50ppm of each fire retardant	0.95	0	0.005	0	0
1	plastic	epoxy_resins	Epoxy resins: C21_H24_O4 + C21_H22_O5 + C15_H26_O2 + C4_H10_N2_O + 50p	1.15	0	0.005	0	0
1	plastic	polyisoprene	C5_H8 + 50ppm of each fire retardant	0.92	0	0.005	0	0
1	plastic	cable_insulation	55% outer insulation + 45% inner insulation from ELICA	0.96	0	0.005	0.00391289	0
0	cables	aluminum	Aluminum cables	2.7	0	52.1399922	0.00199995	0
0	cables	copper	Copper cables	2.8	0.02480006	1.06230268	0.00200001	0
1	wood	wood	General composition	0.7	0	0	0	0
0	wood	pallets	97% general composition + 3% stainless steel grade 316	0.7	0	0	0	0
1	asbestos	asbestos	Asbestos/Fibre cement reference composition	2.5	0	1.47890744	0	0
1	concrete	standard	Concrete reference composition	2.35	0	1.85070618	0	0
1	concrete	barite	Barite concrete reference composition	3.35	0	0.41799443	0	0
0	power_cables	aluminum	Aluminum power cables	1.9	0	52.6227739	0.00193072	0
0	power_cables	copper	Copper power cables	2.8	0.03316645	0.005	0.00135363	0
0	signal_cables	copper	Copper signal cables	1.6	0.02458892	0.005	0.00202643	0
0	coaxial_cables	copper	Copper coaxial cables	1.7	0.02204165	0.005	0.00227335	0
0	coaxial_cables	copper_aluminum	Copper + aluminum coaxial cables	1.3	0.01622176	15.1474901	0.00216369	0
0	cable_insulation	shredded	Shredded cable insulation	0.5	0	0.005	0.00384492	0
23								
			Traces in steel			0	0	0.0005
			Fire retardants in plastic			0	0.005	0

Base de données pour les matériaux.





## 2. Méthodologie - Application supplémentaire Déchets radioactifs

Cette approche statistique peut être efficacement appliquée à la **caractérisation radiologique de déchets radioactifs** en vue de leur élimination vers les centres des stockage nationaux:

- **Création des «packages»** avec des critères de sélection des objets irradiés (selon l'activité, la classification TFA/FMA, le débit de dose...)
- **Calcul des niveaux d'activité et du débit de dose** de chaque package.
- Analyse d'un **grand ensemble de packages** pour déterminer, par exemple, les **ratios d'activité**.

