



Faire face aux enjeux  
d'une quantification  
précise du plutonium  
grâce à la calorimétrie



**setsafe**  
KEP TECHNOLOGIES

# Sommaire

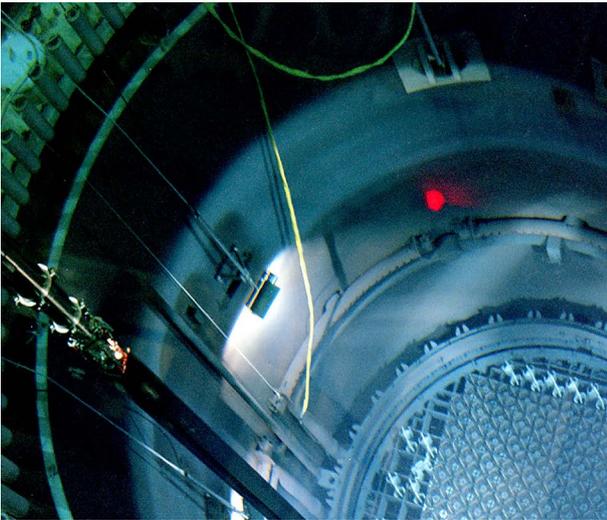
1- Pourquoi caractériser et quantifier la matière et les déchets nucléaires ?	04
2- Le plutonium, ses isotopes, leurs sources et utilisations	05
3- La quantification du plutonium: défis et opportunités	09
4- La calorimétrie comme technique de mesure et de quantification du plutonium	10
5- Le principe général de la calorimétrie pour caractériser la matière et les déchets nucléaires	11
6- Le principe spécifique de la mesure de plutonium par calorimétrie	14
7- Nos références	16
8- A propos de nous	17
9- Bibliographie	19



Réserveur de combustible usé - Crédit: Dean Calma / AIEA

Faire face aux enjeux d'une quantification précise du plutonium grâce à la calorimétrie

# 1. Pourquoi caractériser et quantifier la matière et les déchets nucléaires ?



Pour toute installation nucléaire, gérer des inventaires ou des quantités de matières et de déchets radioactifs est un enjeu majeur, aux multiples facettes : protection des travailleurs et de la population contre les dangers des rayonnements ionisants, valorisation de cet inventaire par des voies de développement économique y compris le recyclage par divers procédés de traitement de ces matières et déchets, mitigation des risques de perte, de vol, de détournement de ces matières et déchets à des fins hostiles, limitation des contraintes imposées aux générations futures.

Pour répondre à certains de ces enjeux, les réglementations nationales ou internationales imposent la réalisation d'inventaires, c'est-à-dire de bilans matières, à différentes échelles.

Par exemple, la circulaire 153 de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique indique que les accords entre l'AIEA et les États membres doivent « *prévoir que l'État établit et maintient un système de comptabilité et de contrôle de toutes les matières nucléaires soumises à des garanties [...] et que ces garanties sont appliquées [...] en s'assurant qu'il n'y a pas eu de détournement de matières nucléaires d'utilisations pacifiques vers des armes nucléaires ou d'autres dispositifs explosifs nucléaires* ». De plus, « *l'accord devrait prévoir que le système de comptabilité et de contrôle de l'État [...] est fondé sur une structure de bilan matières, et prévoit [...] la mise en place de dispositions telles que (a) Un système de mesure permettant de déterminer les quantités de matières nucléaires reçues, produites, expédiées, perdues ou retirées de toute autre manière du stock, ainsi que les quantités en stock (b) L'évaluation de la précision et de l'exactitude des mesures et l'estimation de l'incertitude des mesures.* » (Traduit de l'anglais depuis [1]).

Comme le présente ce livre blanc, le plutonium et ses isotopes sont particulièrement concernés par ces problématiques. En effet, sa gestion est rendue particulièrement complexe car il s'agit d'un sous-produit des réacteurs nucléaires qui se retrouve dans les combustibles irradiés et que certains de ses isotopes ont par ailleurs une radioactivité élevée et une longue durée de vie [2].

En outre le plutonium est utilisé dans certaines applications militaires, ce qui soulève des préoccupations en matière de détournement et de prolifération. La sécurité des stocks de plutonium est donc cruciale pour éviter qu'il ne tombe entre de mauvaises mains [3].

Ainsi les installations concernées par la gestion de plutonium doivent appliquer des solutions simples et sûres pour contrôler rigoureusement la quantité de plutonium sur leurs sites à l'aide de moyens de caractérisation fiables.

## 2. Le plutonium, ses isotopes, leurs sources et utilisations

Le plutonium est un métal dense et radioactif. C'est un élément chimique synthétique, produit artificiellement par l'homme, quoique l'observation de traces de plutonium naturel dans des minerais d'uranium ont été rapportées.

Tous les isotopes du plutonium sont radioactifs, les plus courants étant les isotopes 238, 239, 240 et 241, avec des périodes radioactives couvrant une gamme de 14,1 à 24 000 ans.

Le plutonium-241 se désintègre en émettant un électron bêta de faible énergie, se transformant ainsi

en américium-241. L'américium-241, émetteur alpha avec une période radioactive de 430 ans, est beaucoup plus radiotoxique que le plutonium-241.

Hormis le plutonium-241, les isotopes du plutonium émettent principalement des particules alpha. Les périodes de 14 et 88 ans des isotopes 238 et 241 sont relativement courtes, tandis que celles des autres isotopes peuvent atteindre plusieurs milliers d'années.

Les désintégrations alpha du plutonium-238 génèrent une chaleur considérable.

## Les principales sources de plutonium

Le plutonium est essentiellement produit à partir de l'uranium dans les réacteurs nucléaires civils. Lorsque l'uranium-238 absorbe un neutron, il se transforme en uranium-239, qui se désintègre ensuite en neptunium-239, puis en plutonium-239. Ce processus se produit continuellement pendant le fonctionnement du réacteur.

La production mondiale de plutonium dans le combustible usé est d'environ 70 tonnes par an et les stocks mondiaux de plutonium civil sont estimés à environ 260 tonnes [4].

Historiquement, la part du plutonium produite spécifiquement pour des applications militaires l'a été à partir de réacteurs dédiés.

## Les principales utilisations du plutonium

- **Défense**

Le plutonium-239 est un isotope spécifique, utilisable comme combustible nucléaire. Sa nature fissile et la possibilité de le produire en grandes quantités presque pures ont conduit à son emploi dans l'arsenal et la dissuasion nucléaires. Plus facilement fissile que l'uranium-235, le plutonium-239 est notamment préféré pour la fabrication d'armes nucléaires ainsi que pour la propulsion de porte-avions et de sous-marins.

- **Nucléaire Civil**

Le plutonium issu du fonctionnement des réacteurs civils peut être recyclé en combustible MOX (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium) pour être réutilisé dans certains types de réacteurs.

Par exemple, le combustible nucléaire usagé provenant de réacteurs à eau légère conventionnels contient un mélange d'isotopes  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  et  $^{242}\text{Pu}$ . Ce mélange n'est pas suffisamment enrichi en plutonium 239 pour permettre la réalisation d'armes nucléaires mais peut être recyclé en combustible MOX.

Ce combustible recyclé est ainsi utilisé dans certains réacteurs pour produire de l'énergie, réduisant temporairement la quantité de plutonium à stocker. Trois réacteurs américains peuvent fonctionner entièrement avec du combustible MOX, tout comme les réacteurs canadiens à eau lourde (CANDU).

Tous les réacteurs occidentaux et les derniers réacteurs russes à eau légère peuvent intégrer jusqu'à 30% de MOX dans leur combustible. En Europe, environ quarante réacteurs sont autorisés à utiliser du combustible MOX, et plusieurs réacteurs en France en utilisent jusqu'à 30 % de leur combustible. La conception de l'EPR d'Arava permet d'utiliser une charge complète de MOX dans le cœur du réacteur.

Un recyclage supplémentaire n'est pas considéré comme économiquement viable. L'utilisation de plutonium multi-recyclé, dont la qualité se détériore, pourrait perturber le fonctionnement des réacteurs actuels et poser des problèmes de sûreté. Par conséquent, la récupération de ce plutonium par le retraitement des assemblages de MOX irradiés n'est pas prévue dans l'immédiat et ils sont entreposés en piscine.



IAEA Safeguards Inspectors - Photo Credit: Dean Calma / IAEA - licence CC BY-SA 2.0

Les réacteurs de troisième génération comme l'EPR seraient plus adaptés à ce type de recyclage, mais ce sont surtout les réacteurs surgénérateurs de quatrième génération qui pourraient réduire les stocks de plutonium.

Certaines technologies de réacteurs de quatrième génération pourraient, pour démarrer, avoir besoin de l'équivalent du plutonium généré pendant environ quarante ans par un réacteur classique.

La récupération du plutonium, précieux pour ces usages, peut être réalisée par divers procédés de traitement, comme les procédés hydrométallurgiques et pyrométallurgiques.

Le traitement pyrochimique des matériaux nucléaires, également appelé pyrométallurgie, est une méthode avancée de retraitement des combustibles nucléaires usés. La pyrométallurgie utilise des sels fondus, tels que les chlorures ou les fluorures, pour dissoudre les combustibles irradiés. Ces sels permettent de séparer les différents éléments présents dans le combustible, y compris l'uranium, le plutonium et les actinides mineurs. Ces méthodes permettent en outre de réduire la quantité de déchets nucléaires à longue durée de vie en séparant et en recyclant les éléments valorisables.

- **Espace**

Le plutonium-238, du fait de l'énergie considérable libérée lors de ses désintégrations alpha, est utilisé comme source d'énergie dans l'aérospatial. La chaleur importante dégagée est transformée en électricité dans des systèmes dits RTG (Radio-isotopic Thermal Generator en anglais) et fournit la puissance électrique de certains engins spatiaux.

Ces systèmes permettent des missions spatiales de longue durée, des atterrissages diversifiés, et sont préférés lorsque l'éloignement du soleil ne permet plus aux panneaux solaires de fournir la puissance ou la chaleur requise.

Outre sa production de chaleur continue et de longue durée par rapport à celle d'une mission spatiale, le plutonium est également très dense.

L'énergie fournie par kilogramme est donc élevée. Enfin, ce radioélément nécessite peu ou pas de blindage, les désintégrations alpha du plutonium-238 n'étant pas accompagnées de rayons gamma pénétrants.

Manipulation d'un RTG - Crédit : NASA



# 3.

## La quantification du plutonium: défis et opportunités

Contrôler les quantités de plutonium entrant et sortant d'une installation permet d'adresser les enjeux présentés en introduction (Chapitre 1. Pourquoi caractériser et quantifier la matière et les déchets nucléaires?) et donc de se prémunir des risques de perte, vol et détournement. Dans ce contexte, les analyses chimiques en laboratoire de ces radionucléides et les mesures nucléaires non destructives ou la calorimétrie jouent un rôle prépondérant pour réaliser les bilans matière, différence entre la quantité de matière entrant dans l'installation (exemple : un magasin de matières nucléaires) ou un équipement (comme une boîte à gants) et celle qui en sort [5].

La gestion des flux de matières sensibles, telles que l'uranium et le plutonium, est essentielle pour le contrôle de la non-prolifération. Elle doit également permettre de détecter toute dérive du procédé, notamment celles entraînant des accumulations de plutonium dans les équipements, afin de prévenir les incidents de criticité.

De plus, le pilotage des procédés de traitement du combustible usé, comme l'hydrométallurgie ou la pyrométallurgie, nécessite un suivi précis des principaux constituants fissiles, à savoir l'uranium et le plutonium. Cela permet de garantir leur bon acheminement dans le procédé tout en respectant les spécifications du schéma de fonctionnement, notamment en ce qui concerne la concentration et les impuretés des produits purifiés [6].



# 4.

## La calorimétrie comme technique de mesure et de quantification du plutonium

La calorimétrie est une technique basée sur la mesure de chaleur émise par un colis de matière ou de déchet radioactif. Elle est réputée être très fiable, entre autres pour caractériser le plutonium, le tritium ou l'americium-241.

Elle dispose en effet d'avantages intéressants pour ces mesures :

1. La mesure est non-destructive et réalisée sur le colis entier, elle est donc représentative.
2. La calorimétrie permet des exactitudes de mesure de quantités de plutonium jusque 0,1% lorsqu'elle est appliquée à des matériaux homogènes concentrés [7]. Elle est notamment considérée comme étant la plus fiable parmi les techniques d'analyses non destructives du plutonium.
3. La calorimétrie peut être utilisée sur tout type de matrice ou de matériaux car ses résultats de mesure ne sont pas influencés par ces derniers [5].
4. La mesure calorimétrique ne dépend pas de la géométrie de l'objet ni de la forme chimique du radioélément [8].

La principale source d'incertitude pour la quantification du plutonium par calorimétrie est la détermination de la composition isotopique des émetteurs alpha ou bêta, qui sont les principaux contributeurs à la puissance thermique mesurée.

En revanche, le conditionnement de la matière n'affecte pas le dégagement de chaleur, ce qui rend cette méthode insensible aux effets de matrice, contrairement aux mesures nucléaires non destructives [5].

Le principe de la mesure calorimétrique et son exploitation pour la quantification du plutonium sont détaillés dans les chapitres suivants.





En plaçant un conteneur de matière radioactive au sein d'un calorimètre, on mesure l'échauffement du conteneur lié à la désintégration nucléaire de cette matière.

## 5. Le principe général de la calorimétrie pour caractériser la matière et les déchets nucléaires

La désintégration nucléaire des éléments radioactifs génère des particules chargées. Celles-ci sont ralenties puis arrêtées en traversant les matériaux environnants. Ce faisant, elles déposent une partie de leur énergie, provoquant l'échauffement des matériaux.

La calorimétrie est une méthode permettant de détecter et de mesurer la chaleur échangée entre un objet et son environnement. Ainsi, en plaçant un conteneur de matière radioactive au sein d'un calorimètre, on mesure l'échauffement du conteneur lié à la désintégration nucléaire de cette matière.

Pour un isotope donné, si le conteneur est conçu avec un matériau suffisamment dense et épais pour arrêter la totalité des particules chargées, et en l'absence de toute autre source de chaleur, il existe une relation linéaire entre la puissance thermique mesurée par le calorimètre et l'activité de la matière radioactive.

La puissance thermique dégagée par le conteneur est ainsi directement proportionnelle à la quantité de matière qu'il contient, et une mesure calorimétrique devient une mesure de la quantité de matière radioactive. Le coefficient de proportionnalité pour un isotope donné est appelé puissance spécifique.

En cas de présence d'un mélange d'isotopes dans la matière caractérisée, ce qui est toujours le cas avec le plutonium, alors une mesure complémentaire de la composition isotopique est également nécessaire.

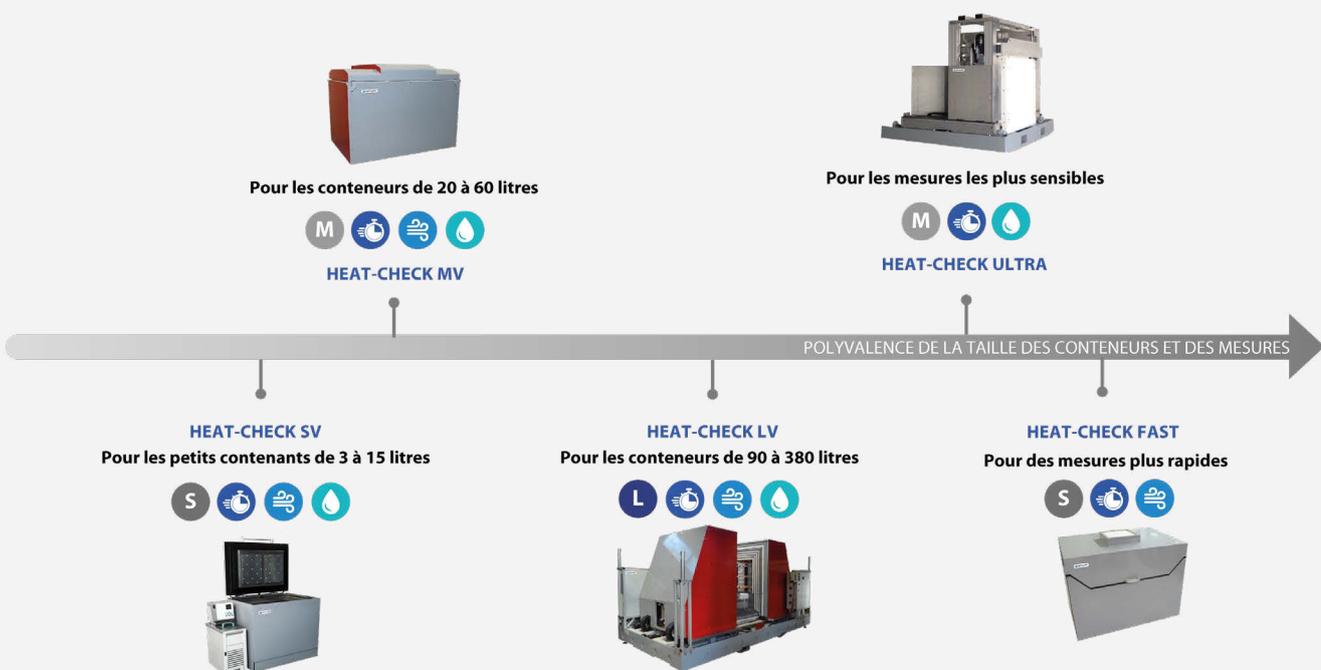
Les calorimètres dédiés à la caractérisation de colis de matières ou de déchets radioactifs sont qualifiés d'« isothermes », car ils régulent la température de l'environnement du colis pour qu'elle soit suffisamment stable pour ne pas perturber la mesure de flux de chaleur. La valeur de consigne de régulation est fixée par l'utilisateur dans la limite de la gamme de fonctionnement du calorimètre.

Les calorimètres utilisent pour la plupart le principe de la mesure différentielle de flux de chaleur selon une

conception spécifique utilisant deux cellules jumelles parfaitement identiques. L'une est appelée cellule de mesure et contient le colis à caractériser, l'autre est appelée cellule de référence et contient généralement un colis vide, inerte thermiquement.

Ce concept permet ainsi une meilleure stabilisation des signaux calorimétriques et améliore les performances de la mesure.

Il existe des exceptions, dans lesquelles la cellule de référence est remplacée par une version beaucoup moins volumineuse, mais ayant la même fonction de stabilisation du signal calorimétrique. Cette approche est utilisée dans les calorimètres de très grand volume afin de limiter l'encombrement de l'appareillage.

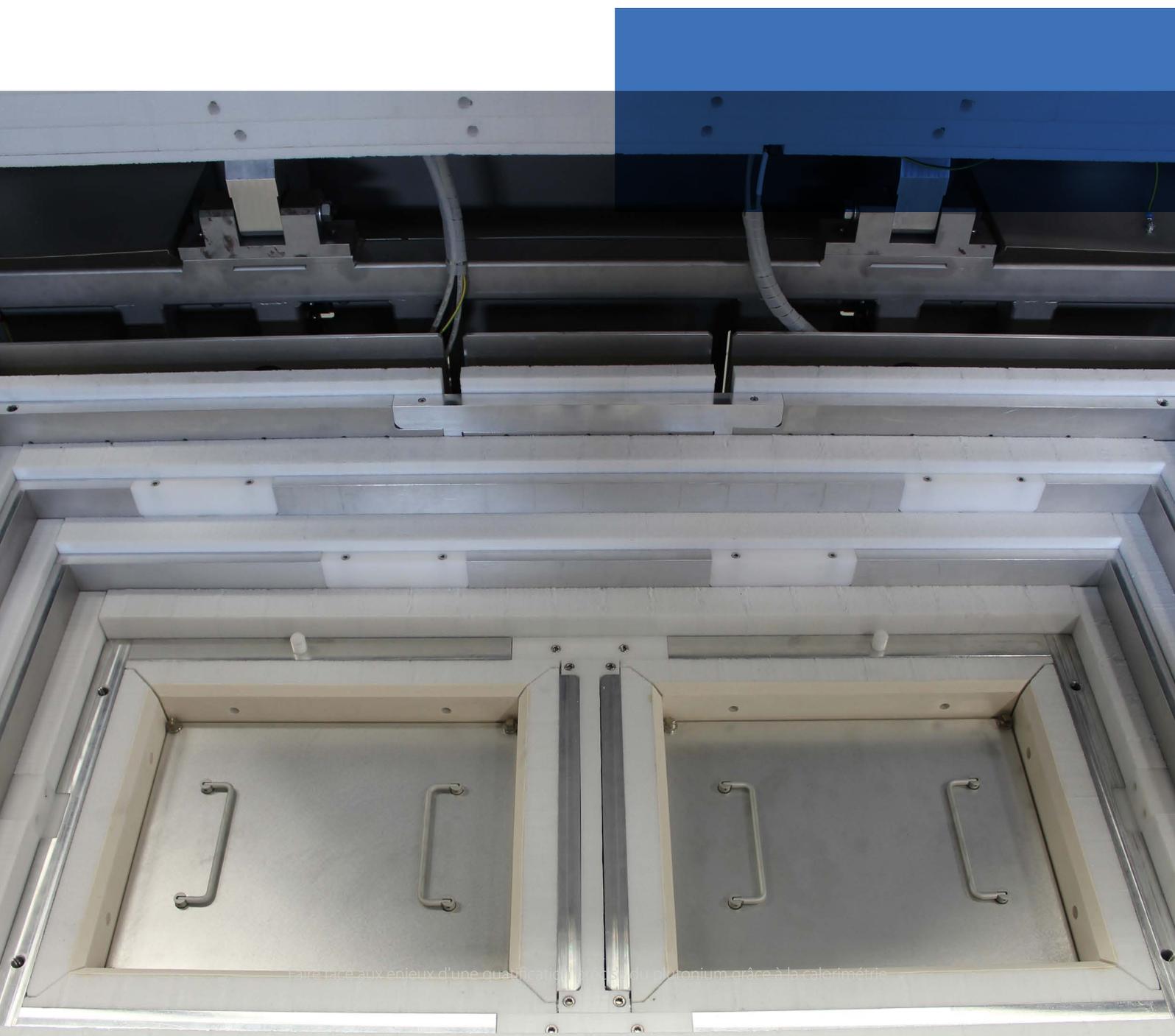


*Illustration - Représentation de la gamme de calorimètres Setsafe. Les modèles diffèrent en termes de capacité, de volume des récipients mesurables, de limites de détection et de temps de mesure.*

La dimension des cellules de chaque calorimètre est optimisée pour les volumes des colis à caractériser, de quelques litres à quelques centaines de litres.

Les capteurs de flux thermique qui équipent ces cellules emploient des éléments thermoélectriques, qui génèrent un signal électrique lorsqu'ils détectent un échauffement. Ainsi, pour afficher un signal thermique et non plus électrique, une opération d'étalonnage est nécessaire. Ce dernier est réalisé à l'aide de dispositifs dits « à effet Joule ».

Il s'agit en substance de résistances chauffantes très précises, qui émettent une puissance thermique fixée par l'opérateur. La réaction du signal du calorimètre à cet effet Joule est analysée et permet l'étalonnage de sa mesure de flux thermique, avant la réalisation de séries de mesures sur des colis.



# 6.

## Le principe spécifique de la mesure d'américium par calorimétrie

Les isotopes du plutonium, à l'exception du plutonium-241, émettent un rayonnement alpha qui peut être arrêté par une très faible quantité de matériau, par exemple par un feuillet métallique de quelques microns d'épaisseur.

Le plutonium-241 émet quant à lui un rayonnement bêta de faible énergie qui peut être plus problématique mais est tout de même considéré comme capable de déposer son énergie sous forme de chaleur dans les conteneurs couramment utilisés dans le secteur nucléaire.

Enfin l'américium-241, qui est issu de la désintégration du plutonium-241 et qui finit donc toujours par être présent dans un colis de plutonium, émet lui aussi un rayonnement alpha qui est arrêté par une faible épaisseur de matériau [7].

Ainsi, en l'absence de toute autre source de chaleur, la puissance thermique dégagée par un colis de plutonium est directement liée à la quantité de chacun des isotopes en présence.

La grandeur physique qui relie le dégagement de chaleur d'un isotope à une quantité de matière est appelée la puissance spécifique (ou PS). Par exemple, la puissance spécifique du plutonium-238 est égale à 567,57 milliwatts par gramme de plutonium-238 [9].

Le calorimètre, après étalonnage, mesure un flux thermique généré par le colis mesuré en milliwatts. Si l'isotope considéré est le seul à produire de la chaleur, alors la quantité de cet isotope dans le colis est donc simplement calculée à partir de la relation de proportionnalité suivante :

$$Masse_{isotope} = \frac{Flux\ de\ chaleur_{colis}}{Puissance\ Spécifique_{isotope}}$$

Cette relation est appliquée couramment pour la mesure de colis de tritium par exemple.

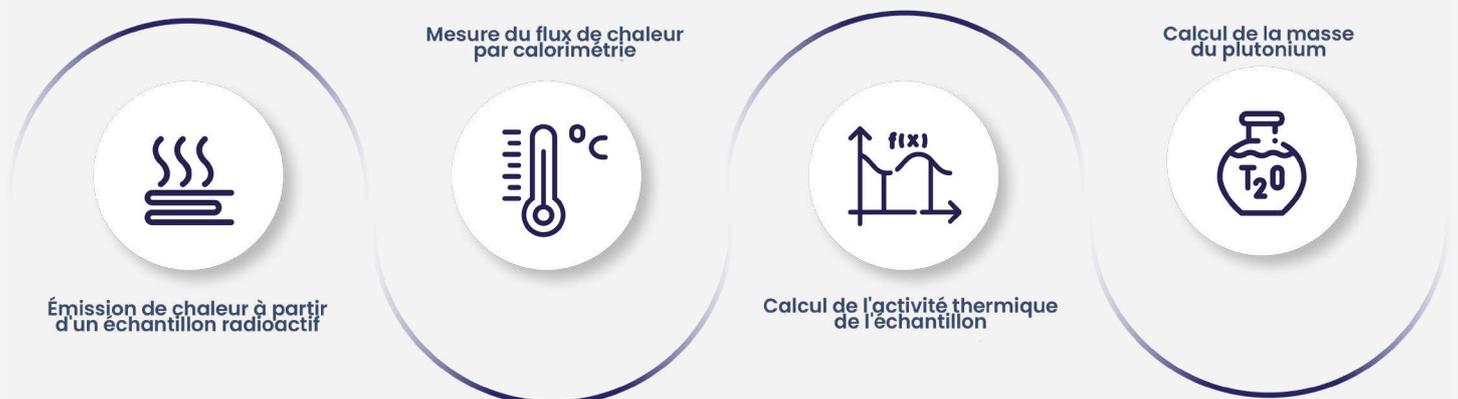


Illustration - Principe de la mesure par calorimétrie

Mais lorsqu'il s'agit de caractériser un mélange d'isotopes, la puissance thermique totale dégagée est la résultante des puissances thermiques de chacun des isotopes en présence.

Donc dans le cas du plutonium :

$$Masse_{Pu+Am} = \frac{\text{Flux de chaleur}_{colis}}{PS_{238Pu} \times R_{238Pu} + PS_{239Pu} \times R_{239Pu} + PS_{240Pu} \times R_{240Pu} + PS_{241Pu} \times R_{241Pu} + PS_{242Pu} \times R_{242Pu} + PS_{241Am} \times R_{241Am}}$$

$R$  étant la quantité relative de chaque isotope. Les valeurs de quantités relatives sont la plupart du temps obtenues par une mesure complémentaire de spectrométrie gamma si une technique non destructive est souhaitée, ou par des mesures destructives par spectrométrie de masse [7].

Par ailleurs, les quantités d'américium-241 et de plutonium sont obtenues à partir de la masse totale d'isotopes  $Masse_{Pu+Am}$  et des relations suivantes :

$$Masse_{241Am} = Masse_{Pu+Am} \times R_{241Am}$$

$$Masse_{Pu} = Masse_{Pu+Am} - Masse_{241Am}$$

Outre la détermination de composition isotopique, la mesure calorimétrique se déroule en quatre étapes simples :

1. Le colis est introduit dans le calorimètre et ce dernier est fermé pour éviter le maximum de fuites thermiques vers l'extérieur,
2. La température et les échanges thermiques sont stabilisés pendant une durée dépendante des caractéristiques du colis et du calorimètre,
3. La puissance thermique générée est notée à partir du signal du calorimètre,
4. Cette valeur de puissance thermique est convertie en quantité de plutonium à l'aide des relations vue plus haut.

Parmi de nombreux exemples concrets d'utilisations de cette méthode à travers le monde, on peut par exemple citer :

- La mesure de la quantité de plutonium dans des mélanges d'oxydes  $PuO_2-UO_2$ . La référence [10] fait état de la caractérisation de six colis contenant de 26 à 258 grammes de plutonium (17% de  $^{240}Pu$ ) dans un mélange de  $PuO_2$  et  $UO_2$  à 26% de plutonium.
- Au Los Alamos National Laboratory aux Etats Unis, la calorimétrie est utilisée pour quantifier le plutonium dans les résidus de sels fondus issus de procédés pyrométallurgiques d'extraction [11].

Plus généralement, La calorimétrie est considérée comme étant complémentaire des techniques conventionnelles de contrôle non destructif en mesure nucléaire. Son utilisation dans la mesure du plutonium n'est pas limitative : elle est par ailleurs largement utilisée pour la quantification de radioéléments tels que l'américium, le strontium ou le tritium [8].

Par exemple la calorimétrie est employée pour mesurer l'eau tritiée adsorbée sur une zéolite à l'intérieur de pièges à tamis moléculaires [12] ou pour contrôler les quantités de tritium issues d'installations d'extraction [13]. Elle est aussi utilisée pour vérifier la pureté d'échantillons d'américium-241 obtenus à partir de procédés de séparation [14].

La caractérisation par calorimétrie d'éléments radioactifs tels que l'américium 241, le tritium et le plutonium fait l'objet d'une norme.



# 7.

## Nos références

### Utilisateurs et témoignages

« L'analyse calorimétrique est surtout utilisée pour les matières à forte concentration de plutonium, où elle constitue une technique particulièrement importante pour la comptabilité des matières nucléaires et les mesures de vérification entre expéditeur et destinataire ». Traduit de l'anglais à partir de [7].

« La calorimétrie est la technique NDA la plus précise disponible pour les mesures de masse du plutonium, et elle est devenue une norme aux États-Unis ». Traduit de l'anglais à partir de [15].

« La calorimétrie est la technique la plus fiable parmi les techniques d'analyses non destructives de quantification des teneurs en plutonium ou tritium dans une matrice ». [5]

### Normes

La caractérisation par calorimétrie d'éléments radioactifs tels que le tritium, le plutonium, et l'américium-241 fait l'objet depuis 2000 d'une norme de l'American Society for Testing and Materials. Cette norme a été révisée à plusieurs reprises et sa dernière version en date a été publiée en décembre 2024.

ASTM C1458-24, Standard Test Method for Non-destructive Assay of Plutonium, Tritium and 241Am by Calorimetric Assay [Report]. - West Conshohocken, United States : ASTM International, 2024.

# 8. A propos de nous

## KEP Technologies

KEP Technologies est un groupe industriel familial créé en 1996. KEP Technologies est une entreprise de taille moyenne avec plus de 400 employés et un chiffre d'affaires de plus de 50 millions d'euros.

Tourné vers l'international grâce à sa présence industrielle et commerciale sur les 5 continents, il propose à ses clients des solutions industrielles et technologiques sur des marchés très variés : aéronautique, espace, santé, recherche, défense, sécurité, énergie, environnement, transport, luxe...

Le groupe KEP Technologies, à travers ses différentes marques, compétences et activités, accompagne ses clients du secteur nucléaire pour relever leurs défis.

Ceux-ci nécessitent la mise en œuvre de solutions spécifiques qui font appel à des expertises, des capacités d'innovation, des compétences diversifiées, des certifications (CEFRI) et la maîtrise des méthodes de gestion de projet.

## Setsafe

Par le biais de sa marque Setsafe, KEP Technologies propose des solutions pour la mesure de la radioactivité et sa mise en œuvre dans le secteur nucléaire.

Nous travaillons avec nos clients à la fourniture de solutions standards ou sur mesure à leurs enjeux liés à la mesure de la radioactivité.

# Notre expertise

Notre équipe d'experts peut mener le projet de la conception jusqu'à l'installation, la formation et la maintenance, ou tout autre besoin. Nos expertises en ingénierie, contrôle industriel et systèmes métalliques nous permettent d'intervenir sur des projets plus vastes et variés, tout en respectant l'ensemble des contraintes du secteur nucléaire.

KEP Technologies dispose de deux brevets concernant la calorimétrie pour la caractérisation de matière et déchets radioactifs :

☑ EP2946184 CALORIMETRE DIFFERENTIEL A MESURE DE FLUX DE CHALEUR en copropriété avec le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives

☑ FR3028948 CALORIMETRE POUR LA MESURE D'UNE QUANTITE DE MATIERE ACTIVE



# 9.

## Bibliographie

[1]

<https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/1972/infcir153.pdf>

[2]

<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/plutonium>

[3]

<https://www.iaea.org/sites/default/files/35304983843.pdf>

[4]

<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/plutonium#plutonium-238>

[5]

Monographie CEA numéro 8, l'instrumentation et la mesure en milieu nucléaire, le contrôle des matières nucléaires, Bertrand PÉROT, Fanny JALLU, Christophe ROURE, Sébastien EVRARD, Laurent LOUBET, Pierre-Guy ALLINEI, Danièle ROUDIL, et Nicolas SAUREL, pages 164-168.

[6]

Monographie CEA numéro 8, l'instrumentation et la mesure en milieu nucléaire, Le contrôle des procédés pour le retraitement/recyclage, Binh DINH, Danièle ROUDIL, Marielle CROZET, Yves CHICOUËNE, Cédric RIVIER, Éric ESBELIN, Fabrice CANTO, Laurent COUSTON, Jean-Luc DAUTHERIBES, Sébastien PICART, Fabrice LAMADIE, Carole BRESSON, Clarisse MARIET, Christian LADIRAT, Alain LEDOUX et Cyrille ELEON, pages 147-161.

[7]

Croce, M.P., Bracken, D.S., Likes, R.N., Rudy, C.R., Santi, P.A. (2024). Principles of Calorimetric Assay. In: Geist, W.H., Santi, P.A., Swinhoe, M.T. (eds) Nondestructive Assay of Nuclear Materials for Safeguards and Security. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-58277-6\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-031-58277-6_23)

[8]

Daniel Clery, Out of Gas, Science, Vol 376, Issue 6600, doi:10.1126/science.add5489.

[9]

ASTM C1458-24, Standard Test Method for Non-destructive Assay of Plutonium, Tritium and <sup>241</sup>Am by Calorimetric Assay [Report]. - West Conshohocken, United States : ASTM International, 2024.

[10]

J. Briden, M. F. Duff, R. L. Fultz, W. E. Kesling, J. R. Wetzel, A. R. Campbell, C. Fellers, J. F. Lemming, and C. R. Rudy, "Automated Plutonium Assay System (APAS) Redux," Proceedings of the Institute of Nuclear Material Management 41st Annual Meeting, New Orleans, LA, July 16–20, 2000.

[11]

V. L. Longmire, T. L. Cremers, W. A. Sedlacek, S. M. Long, A. M. Scarborough, and J. R. Hurd, "Isotopic Ratios and Effective Power Determined by Gamma-Ray Spectroscopy vs. Mass Spectroscopy for Molten Salt Extraction Residues," Nuclear Materials Management, Vol XXXI Proceedings Issue, 1990.

[12]

F. Bachelet, S. Clouard, A. Lis, R. André, C. Mathonat, «Calorimetry: An NDA method for tritium measurement and accountancy», Fusion Science and Technology, 76, p. 699-702 (2020). <https://doi.org/10.1080/15361055.2020.1766273>

[13]

K. M. Song, B. W. Ko, K. W. Lee and S. H. Sohn, "Test of a large volume calorimeter in KEPRI tritium laboratory," 2009 23rd IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering, San Diego, CA, USA, 2009, pp. 1-4.

[14]

Pearson, THE TRITIUM WINDOW: AN OPPORTUNITY FOR ACCELERATED FUSION DEVELOPMENT, Tritium 2022, Book of Abstracts.

[15]

M. Bolzonella, Benefits and Drawbacks of Non-Destructive Assay (NDA) for Nuclear Safeguards – An Overview, ESARDA Bulletin, Volume 65, December 2023.



Suisse - France - Chine - États-Unis - Inde - Hong Kong  
Contactez-nous: [www.setsafesolutions.fr](http://www.setsafesolutions.fr) ou [setsafe@kep-technologies.com](mailto:setsafe@kep-technologies.com)