

LA PROBLEMATIQUE DE LA RADIOACTIVITE DANS LES OBJETS PATRIMONIAUX : IDENTIFICATION, EVALUATION ET GESTION

MEMOIRE PRESENTE PAR :

DAVAL MARION

POUR L'OBTENTION DU

MASTER OF ARTS HES-SO EN CONSERVATION-RESTAURATION

ORIENTATION OBJETS SCIENTIFIQUES, TECHNIQUES ET HORLOGERS

ANNEE ACADEMIQUE 2011-2012

LE 27 JUILLET 2012

ENGAGEMENT

J'atteste que ce travail est le résultat de ma propre création et qu'il n'a été présenté à aucun autre jury que ce soit en partie ou entièrement. J'atteste également que dans ce texte toute affirmation qui n'est pas le fruit de ma réflexion personnelle est attribuée à sa source et que tout passage recopié d'une autre source est en outre placé entre guillemets.

Neuchâtel, le 27 juillet

Marion Daval

REMERCIEMENTS

Pour leur aide tout au long de ce travail, je souhaite remercier sincèrement les personnes suivantes :

Mes collègues de la Fondation du matériel historique de l'armée suisse à Thoune et plus particulièrement

- M. ANTONIN TARCHINI, conservateur restaurateur, mon mentor, pour ses critiques constructives, son aide et son soutien tout au long de ce stage.
- M. STEFAN SCHAEERER, directeur et chef de la Fondation HAM depuis juin 2012 en qualité de responsable de stage.
- M. MARTIN DUDLE-AMMANN, ancien directeur et chef de la Fondation HAM jusqu'en avril 2012 en qualité de responsable de stage.
- M. ULRICH STOLLER, Leiter Inventar und Objektdokumentation, pour m'avoir procuré un radiamètre.

A l'Office fédérale de la santé publique à Berne

- M. NICOLAS STRITT, chef de la section Installation de recherche et médecine nucléaire, pour le temps qu'il m'a offert et pour avoir répondu à mes questions sur la législation.
- M. FABIEN DEVYNCK, collaborateur scientifique de la section Installation de recherche et médecine nucléaire, pour avoir répondu à quelques questions et communiqué des contacts.
- M. ANDRE GURTNER, collaborateur technique de la section Radioactivité de l'environnement, pour m'avoir fait visiter son laboratoire et réaliser des analyses d'identification des radionucléides.
- MME LISA PEDRAZZI, membre de l'équipe radioprotection, secteur physique de la division protection de la santé au poste de travail à la Caisse National Suisse d'Assurance à Lucerne, pour son temps qu'elle m'a généreusement offert, sa précieuse collaboration et ses réponses à mes nombreuses questions sur la législation, le stockage et le transport des objets radioactifs.

A l'Institut de radiophysique à Lausanne

- M. FRANÇOIS BOCHUD, directeur, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser des tests de contamination.
- M. CLAUDE WASTIEL, chef du groupe de chimie radiopharmaceutique, pour m'avoir permis d'assister à son cours d'information sur la radioprotection et pour les précieux contacts qu'il m'a communiqués.
- M. SEBASTIEN BAECHLER, chef du groupe de radioprotection, pour avoir réalisé les analyses de contamination.
- MME NICOLE MEYER, laborantine du groupe de radioprotection, pour avoir réalisé les analyses de contamination.
- M. THIERRY BUCHILLIER, collaborateur scientifique du groupe de radiométrie, pour avoir réalisé les analyses d'identification.
- M. NICK RYCKX, collaborateur scientifique du groupe de physique de l'imagerie médicale, pour ses précieuses explications sur la radiophysique, sa disponibilité, son soutien et son aide pour les traductions des textes.

Au Centre de Compétence Radioprotection du Laboratoire de Spiez

- MME DR. BEATRICE BALSIGER, direction du groupe Radioactivité au Laboratoire de Spiez, pour m'avoir fait visiter les laboratoires de Spiez et pour le temps qu'elle m'a consacré pour répondre à mes questions sur la radiophysique et la radioprotection.
- M. MARKUS ZÜRCHER, responsable, pour avoir répondu à nos questions.
- MME CHRISTINE TRENTESAUX, chef du service Collecte à l'agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs à Paris, pour avoir répondu aimablement à mes questions sur l'identification des objets radioactifs.

Au Musée International d'Horlogerie à la Chaux-de-Fonds

- MME NICOLE BOSSHART, directrice adjointe, pour le temps qu'elle m'a consacré et son amabilité à répondre à mes questions sur la situation du MIH.
- MME BARBARA GALIMBERTI, documentaliste, pour son enthousiasme pour mon projet et ses trouvailles publicitaires dans les anciennes revues horlogères.

Au Musée Curie à Paris

- M. RENAUD HUYNH, directeur de l'Institut Curie et Musée Curie, pour sa disponibilité et son amabilité à répondre à mes questions sur la gestion des collections dont il a la charge.
- M. ADRIEN KLAPISZ, chargé des collections d'instruments et d'objets, pour ses explications détaillées de la situation au Musée Curie.
- M. JEAN-PIERRE DEGRANGE, expert en radioprotection RP-Consult, pour le temps qu'il a consacré à répondre à mes questions sur les traitements possibles pour fixer la contamination.
- M. JEAN-LUC MONNIER, directeur de l'entreprise MONYCO SA à la Chaux-de-Fonds, pour m'avoir offert des ouvrages *Les Heures de la Nuit* et pour ses explications détaillées sur son entreprise et la nature des peintures luminescentes d'aujourd'hui.
- M. ALBERT ZELLER, directeur général de l'entreprise RC TRITEC à Teufen, pour son enthousiasme à me faire visiter son entreprise malgré son emploi du temps très chargé et à répondre à mes questions sur les peintures luminescentes et leur décontamination ainsi que pour la documentation qu'il m'a prêtée.
- Mes professeurs de la Haute Ecole Arc de Neuchâtel de m'avoir soutenu et répondu à mes questions pendant ce projet et pendant ces cinq années d'études, et plus particulièrement M. FRANÇOIS GOETZ pour m'avoir procuré des instruments de mesures.
- Mes camarades de classe, MMES EMILIE CORNET, VALERIE GAPANY, ALINE MICHEL et CECILE SCHLAEPPI, pour leur soutien, leur aide et leur présence durant ces cinq années.

SOMMAIRE

Résumé	7
Abstract.....	10
Zusammenfassung	13
Introduction	17
1 Histoire et applications.....	18
1.1 La découverte de la radioactivité	18
1.2 Les objets radioactifs	21
1.2.1 Les objets des années folles	21
1.2.2 La peinture luminescente.....	26
1.2.3 Les outils et appareils médicaux.....	27
1.2.4 Les céramiques et verres.....	29
1.2.5 Les manchons des lampes à gaz	31
1.2.6 Les détecteurs de fumée et paratonnerres.....	31
2 Le phénomène radioactif.....	33
2.1 Sources radioactives	33
2.1.1 Sources naturelles.....	33
2.1.2 Sources artificielles.....	34
2.1.3 L'exposition humaine globale	35
2.2 La radiophysique	36
2.2.1 Le noyau	36
2.2.2 Les rayonnements.....	37
2.2.3 La décroissance radioactive	38
2.2.4 Les chaînes de désintégration	39
2.3 La radioprotection.....	39
2.3.1 Mesures du rayonnement	40
2.3.2 Effets sur la matière vivante	40
2.3.3 Les moyens de protection.....	44
3 La radioactivité et les musées.....	46
3.1 Les musées de Suisse	46

3.1.1	Collections ciblées en Suisse	46
3.2	Juridiction	49
3.2.1	Textes de réglementation	49
3.2.2	Institutions de radioprotection	49
3.2.3	Définition légale de la radioactivité et autorisation.....	50
3.3	Protocoles de comportement	52
3.3.1	Identification visuelle	52
3.3.2	Identification analytique	57
3.3.3	Evaluation du danger	58
3.3.4	Gestion du danger.....	61
4	Cas pratiques : les peintures luminescentes.....	68
4.1	Situation	68
4.2	Démarche	68
4.3	Les objets	69
4.3.1	Les boussoles	69
4.3.2	L'anémomètre.....	70
4.4	Evaluation du danger	71
4.4.1	Mesure du débit de dose et des coups par seconde.....	71
4.4.2	Détermination du radionucléide	72
4.4.3	Mesures de contamination	73
4.5	Traitements curatifs.....	73
4.5.1	Décontamination.....	73
4.5.2	Fixation de la contamination	75
5	Synthèse.....	76
	Conclusion	77
	Abréviations et sigles.....	79
	Glossaire.....	79
5.1	Vocabulaire	79
5.2	Unités de mesure	82
	Bibliographie	83
	Liste des figures	88

Liste des tableaux	90
Annexes.....	91
Annexe 1 - Contacts	91
Annexe 2 - Fiches techniques des radionucléides.....	93
Annexe 3 - Marques déposées.....	98
Annexe 4 - Précisions en radiophysique	101
Le noyau	101
Rappel	101
Précisions.....	101
Les rayonnements.....	101
Alpha	101
Bêta.....	102
Gamma.....	102
Annexe 5 - Chaines de désintégration.....	104
Annexe 6 - Définitions des différentes doses	105
Dose absorbée.....	105
Dose équivalente	105
Dose efficace	106
Annexe 7 - Formules	107
Age d'une source selon son activité.....	107
Evaluation du débit de dose.....	107
Loi du carré de la distance.....	107
Irradiation Interne	107
Annexe 8 - Extraits de la réglementation.....	108
LRaP / ORaP.....	108
Bases légales de la définition.....	108
Bases légales sur les autorisations	109
Bases légales sur le stockage	110
Bases légales sur les déchets radioactifs	111
Base légales pour l'expédition de matières radioactives.....	112
Bases légales pour une intervention.....	112

Annexe 2 de l'ORaP	113
SDR / ADR.....	115
Droit international.....	115
Classification	115
Colis exceptés	115
Emballage	116
Annexe 9 - Directives DDP	118
Annexe 10 - Résumé des doses.....	120
Annexe 11 - Protocole de prise de mesures.....	121
Protocole de mesures du radiamètre	121
Protocole de prise d'échantillons pour une analyse de contamination	122
Annexe 12 - Fiche technique du radiamètre	123
Annexe 13 - Valeurs indicatives.....	125
Annexe 14 - Compléments pour le transport	126
Limites d'activité pour le transport	126
Documents de transport	126
Annexe 15 - Mesures des objets.....	129
Annexe 16 - Spectrométrie gamma.....	131
Annexe 17 - Résultats des analyses de contamination	132
Annexe 18 - Galeries d'images	133
Publicité des objets radioactifs	133
Fontaines à radium	134
Verrerie.....	135
Peintures Radioluminescentes.....	136
Paratonnerres radioactifs.....	137

RESUME

En ce début du XXI^{ème} siècle, le terme radioactivité ne laisse pas indifférent. Avec son trèfle jaune reconnaissable, elle fait souvent peur car c'est un danger qui ne se voit pas ni ne s'entend ou ne se sent, caractéristique propre à très peu de substances toxiques. Associée à d'autres mots comme nucléaire et atomique, elle peut être synonyme de destruction avec les bombes atomiques de Hiroshima et Nagasaki au Japon, aux cancers ou aux malformations suite à de grandes irradiations et aux accidents des centrales nucléaires. Un an et demi après celui de la centrale de Fukushima au Japon, la radioactivité reste un sujet brûlant de l'actualité. Pourtant, cette découverte de la fin du XIX^{ème} siècle a changé notre quotidien. Elle a permis bien sûr la production d'électricité pour une population toujours plus grande. 38% de l'électricité suisse provient de ses cinq centrales nucléaires et cette énergie se place de ce fait comme étant la deuxième source d'électricité dans ce pays. La recherche sur la radioactivité a permis également le développement de nouvelles technologies médicales, notamment l'amélioration des diagnostics et le traitement des cancers. L'industrie, la science et la recherche ont bénéficié eux aussi de cette découverte. Même en conservation-restauration, le phénomène de la radioactivité est utilisé dans plusieurs méthodes d'analyses, la plus célèbre étant sans doute la datation au carbone 14.

L'uranium était connu dès 1789 et donc bien avant la découverte de la radioactivité en elle-même qui date de 1896. Les premiers utilisateurs de ce minerai luminescent étaient les céramistes qui l'employaient pour teinter les glaçures* de jaune, de rouge et d'orange. Rapidement, il fut utilisé comme colorant dans les verres à boire ou de décoration. Les reflets jaune-vert caractéristiques de ces verres sont bien connus des brocanteurs et antiquaires de nos jours. Ce ne sont pas les seules pièces de collection qu'il est possible de trouver. En plus d'ancien matériel médical, la vague du radium dans les années 20-30 a produit un grand nombre de produits de consommation vantant leurs prouesses grâce à l'incorporation du précieux élément dans leur composition. Heureusement pour les consommateurs, le radium était très cher à cette époque et peu de ces produits en contenaient. Il y avait pourtant bien une époque où ingérer des préparations au radium étaient considérés comme bénéfiques et conseillés pour une meilleure santé. Les fontaines au radium devaient par exemple purifier l'eau avant de la consommer. Cependant l'application peut-être la plus connue de la radioactivité est la peinture luminescente. Lire l'heure pendant la nuit était enfin possible mais la peinture ne s'appliqua pas qu'aux montres mais aussi aux aiguilles et cadrans de nombreux instruments de mesure et tout particulièrement les instruments de bord dans le domaine de l'aviation et de l'automobile.

La radioactivité est caractéristique de chaque époque. A sa découverte, la population avait une très grande confiance en la science. On s'imaginait qu'elle saurait un jour régler tous les problèmes de notre planète. Mais aujourd'hui, la radioactivité est crainte et le service à verres aux reflets jaune-vert de la grand-mère à de quoi décourager certains intéressés, conscients de la matière première dont il est constitué. Quel danger représente finalement ce patrimoine dans les musées ? On trouve dans les objets patrimoniaux un certain nombre de substances toxiques dont la présence peut soit être directement liée à la composition de

l'objet, soit être le résultat d'un traitement spécifique (insecticide, fongicide, etc.) ou encore dû à l'altération d'un de ces composants. Parmi ces substances toxiques, la radioactivité n'est pas la première dont on se douterait et son identification pose certaines difficultés. Comment se douter de quelque chose qui ne donne aucun signe de dangerosité au premier regard ?

Le présent travail traite de cette problématique délicate et bien souvent ignorée. Ce travail a été réalisé dans le but de fournir aux musées des protocoles de comportement afin de réagir au mieux à la présence de substances radioactives et d'éviter tout incident. Les quatre questions suivantes sont traitées :

- Quels sont les objets radioactifs susceptibles d'être trouvés dans un musée et comment les identifier ?
- Que dit la loi sur la possession et la gestion de ces objets ? Comment se situe le musée par rapport aux textes de réglementation ?
- Comment évaluer la dangerosité de ces objets et comment les gérer ?
- Y a-t-il des traitements possibles pour réduire le danger ?

Même si un objet radioactif ne représente pas forcément un danger imminent pour le personnel d'un musée, la prise de conscience de l'existence de tels objets est primordiale. Elle permet l'identification, l'évaluation et la gestion du risque liée à la présence de radioactivité. Un stage à la fondation du matériel historique de l'armée suisse (Fondation HAM), à Thoune, m'a permis d'avoir accès à une collection type concernée par cette problématique. En effet, une quantité importante de matériel militaire est sujette aux peintures radioactives luminescentes (boussoles, instruments de bord, etc.).

Du fait que la radioactivité est invisible, l'utilisation d'appareils de mesures adéquats est nécessaire pour déterminer sa présence. Cependant, le personnel de musée ne dispose pas forcément de tels instruments. La radioactivité peut toutefois être soupçonnée par une observation visuelle des objets. Certains d'entre eux ont une plus grande probabilité d'abriter des substances radioactives du fait de leur date de création et de leur fonction. Certains indices matériels peuvent ainsi alerter le responsable de collection qui peut par la suite faire appel à un expert en radioprotection pour certifier la présence de radioactivité dans l'institution.

L'évaluation du danger lié à la présence de radioactivité nécessite l'application des règles de radioprotection en vigueur. Les rayonnements gamma posent un problème lorsqu'ils sont en grand nombre comme c'est le cas dans le milieu médical. Dans un milieu muséal, le nombre d'objets et leur faible quantité de substances radioactives (en général) n'est pas suffisant pour générer une telle concentration de rayonnement gamma. Dans un musée, les personnes les plus concernées par le problème de la radioactivité sont les conservateurs-restaurateurs ou toute personne responsable de la manipulation de ces objets. En effet, les deux autres rayonnements, alpha et bêta, composés de particules atomiques chargés présentent un plus grand risque lors de démontage ou de transport car ils sont susceptibles d'être ingérés si les règles de radioprotection ne sont pas respectées.

Il est aisé dès lors de comprendre la nécessité de textes de réglementation rigoureux sur les substances radioactives. La loi sur la radioprotection et l'ordonnance sur la radioprotection sont les deux textes de référence en Suisse. L'Office fédéral de la santé publique (OFSP) et la caisse nationale Suisse d'accident (SUVA) sont les deux institutions qui sont mandatées d'appliquer ces textes et de contrôler les entreprises du bon fonctionnement. Au vu du danger que peut représenter la manipulation, même minime, de substances radioactives, des limites ont été posées. Certaines actions ne peuvent être réalisées sans autorisation délivrée après une formation adéquate. Cependant, cela n'empêche pas la planification d'un certain nombre de mesures de prévention pour réduire le risque et gérer une collection contenant des objets radioactifs.

La contamination d'un objet est sans doute le problème qui concerne le plus les conservateurs-restaurateurs. Deux contaminations sont distinguées ; la fixe et la non-fixe. Dans le premier cas, l'objet est radioactif mais ne dissémine pas des particules actives. En revanche dans le deuxième, l'objet est un contaminant et peut rendre radioactif un autre objet par transfert souvent de poussière. En plus de sceller l'objet dans un compartiment hermétique, deux actions sont possibles : la décontamination et la fixation de la contamination non-fixe. La première option donne les moyens de retirer la source totalement. Dans le cas des peintures, cela signifie un retrait par méthode mécanique puis chimique avant de remplacer la peinture luminescente par une autre non-radioactive. La deuxième option propose d'appliquer un vernis sur la contamination non-fixe pour éviter qu'elle pollue d'autres objets.

ABSTRACT

In the beginning of the 21st century, the term "radioactivity" does not leave indifferent. With its recognizable clover, it scares one off, because it is a danger that can not be seen, nor be heard nor felt, a characteristic held by only few toxic substances. Associated with other words such as nuclear and atomic, it can be a synonym of destruction by the Hiroshima and Nagasaki bombs, of cancer or deformities after a sustained exposure or of accidents in nuclear power plants. And year and a half after the Fukushima accident in Japan, radioactivity stays in the news as a hot topic. However, its discovery at the end of the 12th century changed our everyday lives. It of course allows the production of electricity for an ever growing population. 38% of the Swiss electricity comes from its five nuclear reactors, thus placing this energy at the second rank for current production in this country. Research in radioactivity also allowed the development of new medical technologies, especially better diagnostic and cancer treatment tools. The industry, science and research have also benefited from its discovery. Even in conservation-restoration, the phenomenon of radioactivity is used in several analysis methods, the most known being without a doubt carbon dating.

Uranium was known starting 1789, thus long before radioactivity itself was discovered in 1896. The first users of this luminescent mineral were the ceramists, who used it to tint glaze in yellow, red and orange. Quickly, it was used as a dye in drinking and decorative glasses. The characteristic yellow-green reflections of those glasses are nowadays well known to bric-à-brac traders and antiquarians. But those are not the only pieces of collection it is possible to find. On top of ancient medical material, the 20's and 30's radium wave produced a great deal of consumption products promoting their benefits thanks to the incorporation of that precious element in their compositions. Luckily for the consumers, radium was very expensive at that time and only few of those products contained it. But there was indeed a time when ingesting radium preparations was considered as a benefit and advised for a better health. Radium fountains, for example, were supposed to purify water before its consumption. However, probably the most well-known application of radioactivity is luminescent paint. Reading the time at night was finally possible, but the paint not only applied to watches but also to the hands and dials of numerous measuring instruments, most particularly dashboard instruments in the domains of aviation and car industry.

Radioactivity is characteristic of each time. When it was discovered, the population hugely trusted science. One would imagine that it would one day solve every problem on our planet. But nowadays, radioactivity is feared and even granny's yellow-green reflecting dish set discourages some interested people, knowing of what material they are made of. What danger does this heritage finally represent in a museum? In the heritage objects, one may find a certain number of toxic substances whose presence could be linked directly to the very composition of the object, or be the result of a specific treatment (insecticide, fungicide, etc.) or even be due to the alteration of one of its components. Among those toxic substances, radioactivity is not the first one would think of and its identification brings certain difficulties. How can one suspect something that does not give any sign of danger at first sight?

The present work deals with this delicate and often ignored problem. This work has been realized with the purpose of giving museums protocols of behaviour allowing for an ideal reaction in the presence of radioactive substances and to avoid any incident. The four following questions are treated:

- What radioactive objects are potentially found in a museum and how can one identify them?
- What does the law say about the possession and handling of those objects? What is the museum's position with respect to the law texts?
- How can one evaluate the danger of these objects and how can one handle it?
- Are there any treatments allowing for a reduction of the danger?

Even if a radioactive object does not necessarily represent an imminent danger for the museum staff, the knowledge of the existence of such objects is of prime importance. It allows for identification, evaluation and risk management linked to the presence of radioactivity. Work experience at The Historical Swiss Army Material Foundation (Stiftung HAM), in Thun, allowed me to gain access to a collection typically concerned by this problem. Indeed, a large quantity of military material is subject to radioactive luminescent paint (compasses, dashboard instruments, etc.).

Because radioactivity is invisible, the use of adequate measuring instruments is necessary in order to assess its presence. However, the museum staff does not necessarily dispose of such instruments. Radioactivity can still be suspected by a visual inspection of the objects. Some of them have a higher probability of containing radioactive substances due to their time of construction and their function. Some material clues can thus alert the collection responsible, who can then call an expert in radiation protection to certify the presence of radioactivity in the institution.

The evaluation of the danger of radioactivity calls for the application of the laws in place. Gamma radiation is a problem when it shows up in large numbers, such as in the medical world. In a museum collection, the number of objects and the low quantity of radioactive substances (in general) is not sufficient to generate such a concentration of gamma radiation. In a museum, the people who are most concerned by the problem of radioactivity are the conservators-restorers or any other person in charge of manipulating these objects. Indeed, the two other radiations, alpha and beta, made of atomic charged particles, present a higher level of risk during the dismounting or the transport because they are more likely to be ingested if the rules of radiation protection are not respected.

It is thus easy to understand the necessity of rigorous regulation texts on radioactive substances. The law on radiation protection and the ordinance on radiation protection are the two reference texts in Switzerland. The Federal Office of Public Health (FOPH) and the Swiss National Accident Insurance Fund (SUVA) are the two institutions whose mandate it is to apply those texts and to control the good functioning of the firms. Knowing the danger that the manipulation, even minimally, of radioactive substances represents, limits have been drawn. Some actions can not be undertaken without an appropriate authorization delivered after proper training. However, that does not prevent the realization of

a certain number of preventive conservation actions in order to reduce the risk and to handle a collection containing radioactive objects.

The contamination of an object is without a doubt the problem that most concerns the conservators-restorers. Two types of contamination are distinguished: fixed and non-fixed. In the first case, the object is radioactive but does not disseminate active particles. However, in the second case, the object is a contaminant and can render an other object radioactive, often by the transfer of dust. In addition to sealing the object in an airtight tank, two actions are possible: decontamination and fixation of the non-fixed contamination. The first option allows for a complete removal of the source. In the case of paint, it implies a withdrawal using mechanical and chemical means before replacing it with another non-radioactive luminescent paint. The second option proposes to apply glaze on the non-fixed contamination to keep it from polluting other objects.

ZUSAMMENFASSUNG

Am Anfang des 21. Jahrhunderts, lässt der Begriff Radioaktivität niemand gleichgültig. Mit ihrer leicht erkennbaren gelben Klee ist sie oft erschreckend, weil sie eine Gefahr ist, die nicht gesehen, gehört oder gefühlt werden kann, eine Charakteristik die nur selten mit toxischen Substanzen verbunden ist. Mit anderen Worten, wie Atom- und Kernkraft, assoziiert, kann es die Zerstörung von Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki in Japan, Krebs oder Missbildung nach einer großen Bestrahlung oder AKW-Unfälle bedeuten. Eineinhalb Jahre nach dem Unfall im Japanischen Fukushima bleibt die Radioaktivität ein heißes Thema in den Nachrichten. Die Entdeckung am Ende des 19. Jahrhunderts hat aber unseren Alltag verändert. Es erlaubt die Produktion von Elektrizität für eine ständig wachsende Bevölkerung. 38% der Schweizer Stromproduktion stammt aus ihren fünf Kernreaktoren und diese Energie ist deswegen die zweite Energiequelle für Stromerzeugung in diesem Land geworden. Die Kernforschung ermöglichte auch die Entwicklung neuer Technologien in der Medizin, insbesondere für verbesserte Diagnose und Behandlung von Krebserkrankungen. Die Industrie, die Wissenschaft und die Forschung haben auch von dieser Entdeckung profitieren. Selbst die Konservierung-Restauration benutzt das Phänomen der Radioaktivität in verschiedenen analytischen Methoden, wovon die berühmteste wahrscheinlich die Radiokarbondatierung ist.

Uran war seit 1789 bekannt, lange vor der Entdeckung der Radioaktivität im Jahre 1896. Die ersten Anwender von diesem lumineszierenden Mineral waren die Keramiker, die es benutzten, um Farbglasuren mit Gelb, Rot und Orange zu tönen. Bald wurde es als Farbstoff in Trink- oder Dekorationsgläsern verwendet. Der charakteristische gelb-grüne Schimmer diesen Gläsern sind heute von den Althändlern und Antiquitätenhändlern gut bekannt. Dies sind nicht die einzigen Sammlerstücke, die man finden kann. Neben den alten medizinischen Geräten hat die Welle der Radium in den 20er und 30er Jahren eine große Zahl von Konsumprodukten, wessen Qualitäten durch Einfügung dieses edlen Material in ihren Zusammensetzungen promoviert wurden, hervorgebracht. Zum Glück für die Benutzer war Radium zu jener Zeit sehr teuer, und nur wenige dieser Produkte enthielten es. Doch gab es eine Zeit, wenn die Einnahme Radiumpräparaten vorteilhaft betrachtet und für eine bessere Gesundheit empfohlen wurde. Die Radiumbrunnen mussten z. B. das Wasser vor dem Trinken reinigen. Wahrscheinlich ist die Leuchtfarbe die bekannteste Anwendung der Radioaktivität. Endlich war es möglich, die Zeit in der Nacht zu lesen, doch die Anwendung beschränkte sich nicht nur auf Uhren, sondern auch auf Nadeln und Zifferblätter vielen Messgeräten und insbesondere auf die Instrumententafel im Bereich der Luftfahrt und Automotive.

Radioaktivität ist charakteristisch für die jeweilige Periode. Bei ihrer Entdeckung hatte die Bevölkerung ein sehr großes Vertrauen in die Wissenschaft. Man glaubte, sie werde eines Tages alle Probleme unseres Planeten lösen. Aber heute wird die Radioaktivität gefürchtet, und sogar die gelb-grüne Servicegläsern von Oma genügt, um einen Interessent, der sich vom Rohstoff bewusst ist, zu entmutigen. Aber wie gefährlich ist dieses Erbe der Museen? In solchen Objekten findet man eine Reihe von giftigen Substanzen, deren Anwesenheit entweder direkt zu der Zusammensetzung des Gegenstandes, zu einer spezifischen

Behandlung (bzw. mit Insektiziden oder Fungizid) oder durch Veränderung eines dieser Komponenten verbunden ist. Unter diesen toxischen Substanzen ist Radioaktivität nicht die erste Verdächtige und ihre Identifizierung ist nicht unproblematisch. Wie könnte man etwas ahnen, wessen Gefahr auf dem ersten Blick kein Zeichen zeigt?

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit diesem sensiblen und oft ignorierten Thema. Diese Arbeit wurde durchgeführt, um den Museen Verhaltensprotokolle zu bieten, um im Vorhandensein von radioaktiven Stoffen am besten zu reagieren und um jene Zwischenfälle zu vermeiden. Die folgenden vier Fragen werden behandelt:

- Welche sind die radioaktiven Elemente, die in einem Museum gefunden werden könnten und wie kann man sie identifizieren?
- Wie lautet das Recht auf Eigentum und Management dieser Objekte? Wie funktioniert das Museum gegenüber der Gesetzestexten?
- Wie kann man die Gefährlichkeit dieser Objekte abschätzen und wie soll man mit ihnen umgehen?
- Gibt es Behandlungen zur Verfügung, um die Gefahr zu verringern?

Selbst wenn solch ein radioaktives Objekt nicht notwendigerweise eine unmittelbare Gefahr für das Museumspersonal darstellt, ist das Bewusstsein für die Existenz solcher Objekte äußerst wichtig. Es ermöglicht die Identifizierung, Risikobewertung und Risikomanagement im Vorhandensein von Radioaktivität. Ein Praktikum bei der Stiftung Historisches Material der Schweizer Armee (Stiftung HAM), in Thun, erlaubte mir den Zugriff auf eine typische von dieser Problematik betroffene Sammlung. In der Tat, eine signifikante Menge an militärischem Material enthält radioaktive Leuchtfarben (Kompass, Bordinstrumente, usw.).

Da die Radioaktivität unsichtbar ist, ist der Einsatz von geeigneten Messgeräten um ihre Präsenz zu bestimmen notwendig. Allerdings verfügen die Mitarbeiter des Museums nicht unbedingt über solche Instrumente. Radioaktivität kann jedoch durch visuelle Beobachtung von Objekten vermutet werden. Einige von ihnen haben eine höhere Wahrscheinlichkeit, radioaktive Stoffe zu beherbergen, je nach Erstellungsdatum und Funktion. Einige physische Beweise können so den Verantwortlichen der Sammlung alarmieren; der soll sich dann zu einem Experten im Bereich des Strahlenschutzes richten, damit das Vorhandensein von Radioaktivität in der Institution bestätigt werden kann.

Die Beurteilung der Gefährlichkeit der Radioaktivität erfordert die Anwendung des Strahlenschutzgesetzes. Gammastrahlen sind ein Problem, wenn es eine große Menge gibt, wie es der Fall in der Medizin ist. In einer musealen Umgebung ist die Anzahl der Objekte und deren kleine Menge radioaktiven Stoffen (im Allgemeinen) nicht ausreichend, um eine solche Konzentration von Gamma-Strahlung zu erzeugen. In einem Museum sind die Leute, die am stärksten von diesem Problem betroffen sind, die Restauratoren oder jede andere Person, die für die Behandlung dieser Objekte verantwortlich ist. In der Tat, die anderen zwei Strahlungen, alpha und beta, bestehend aus geladenen Teilchen, bieten ein höheres Risiko bei der

Entnahme oder dem Transport, weil sie es ermöglichen, eingenommen zu werden wenn die Strahlenschutzregeln nicht befolgt werden.

Es ist daher einfach die Notwendigkeit von Texten, dessen Inhalt eine starke Regulation von radioaktiven Stoffen bietet, zu verstehen. Das Strahlenschutzgesetz und die Strahlenschutzverordnung sind die zwei Referenz-Texte in der Schweiz. Das Bundesamt für Gesundheit (BAG) und die Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA) sind die beiden Einrichtungen, die beauftragt sind, diese Gesetze durchzusetzen und die Betriebe zu kontrollieren. In Hinblick auf die Gefahr, die die Manipulation darstellt, egal wie gering die Anzahl radioaktiven Stoffen, wurden Grenze gestellt. Einige Manipulationen dürfen nicht ohne Genehmigung nach entsprechender Schulung vorgenommen werden. Jedoch verhindert das nicht, die Realisierung einer bestimmten Anzahl von präventiven Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos und zur Verwaltung einer radioaktive Gegenstände enthaltende Sammlung zu unternehmen.

Die Kontamination von einem Objekt ist wahrscheinlich das Problem, das die meisten Konservator-Restauratoren betrifft. Zwei Kontaminationen werden unterschiedet: die feste und nicht-feste. Im ersten Fall ist das Objekt radioaktiv, verbreitet aber keine aktive Partikel. Jedoch, im zweiten Fall ist das Objekt kontaminationsfähig und kann ihre Radioaktivität zu einem anderen Objekt oft via Staubteilchen übertragen. Im Zusatz vom Verriegeln des Objektes in einem luftdichten Kammer, sind zwei Aktionen möglich: Dekontamination und Fixierung der nicht-festen Kontamination. Die erste Option bietet die Möglichkeit, die Quelle vollständig zu entfernen. Im Falle von Farben, bedeutet dies einen Rückzug durch zuerst mechanische dann chemische Verfahren, nachdem man die Leuchtfarbe durch eine andere nicht-radioaktive ersetzt. Die zweite Option schlägt vor, eine Schichte Firnis aufzutragen, damit die nicht-feste Kontamination keine andere Objekte verunreinigt.

Tout est poison, rien n'est poison. Seule la dose fait le poison.

Paracelse, 1493-1541

INTRODUCTION

Radioactif. Les images associées à ce mot sont diverses ; le trèfle jaune, le cancer, les bombes, l'énergie, Fukushima, Marie Curie, les déchets, etc. Il est indéniable que la radioactivité a laissé une marque historique sur le dernier siècle et reste un enjeu pour celui-ci. Parfois salvatrice, parfois malfaisante, la radioactivité a un double visage qui n'est finalement que le reflet des actions des hommes. Un an et demi après l'accident de la centrale de Fukushima, le débat sur l'énergie nucléaire est sur le feu de nombreux pays et il peut être constaté que la population a de moins en moins confiance en la technologie nucléaire alors que cette énergie représente 38% de l'électricité produite en Suisse par ses cinq réacteurs. Dans les centrales, les laboratoires et les industries où des substances radioactives sont manipulées, la sécurité est maximale et les réglementations sont strictes et sévères. Pourtant, il y a moins d'un siècle, le radium était entreposé dans des ateliers de la Chaux-de-Fonds sans aucune crainte. Une autre époque, un autre regard sur ce phénomène. Cette ville abrita en son temps plusieurs petits ateliers de poseurs de radium pour rendre les aiguilles et les cadrans horlogers luminescents pendant la nuit. L'horlogerie ne fut pas la seule à bénéficier des particularités de la radioactivité et de nombreux objets, parfois totalement commerciaux, parfois réellement utiles, apparurent et peuvent se retrouver aujourd'hui dans les musées.

Le présent travail s'interroge sur ces objets radioactifs dans les collections muséales et s'articule autour de quatre questions : Quels sont ces objets et comment les identifier ? Quelles sont les lois et les législations sur la radioactivité et comment se place l'institution muséale vis-à-vis de celles-ci ? Comment évaluer la dangerosité de ces objets et les gérer par la suite ? Y a-t-il des moyens autres que préventifs pour réduire le danger ? Pour ce faire, nous avons eu l'opportunité de réaliser cette étude à la Fondation du matériel historique de l'armée suisse (Fondation HAM) qui possède dans ses réserves un bon nombre d'objets à la peinture luminescente au radium, tels que des boussoles, des cadrans d'instruments de contrôle et de bord.

Ce patrimoine particulier n'est pas toujours facile à gérer. La radioactivité fait peur car elle est indécélable sans instrument de mesures. Sans odeur, sans bruit ni forme physique perceptible particulière, la présence de substances radioactives dans les objets patrimoniaux n'est pas forcément soupçonnée. La première partie de ce travail recense les principaux objets et leur histoire, susceptibles d'être radioactifs dans les réserves muséales afin de faciliter leur identification. Le second chapitre s'intéresse plus particulièrement au phénomène physique dans le but de comprendre plus exactement ce qu'est la radioactivité et comprendre en quoi elle représente un danger pour les êtres humains. Les principes de radioprotection sont également introduits, permettant de se protéger efficacement de la radioactivité. Dans la troisième partie, les textes de lois relatifs à la radioactivité sont présentés et mis en contexte dans un milieu muséal en mettant en place des protocoles de comportement à adopter dans différentes situations. Le dernier chapitre se penche sur un cas pratique, les peintures radioluminescentes. Nous nous sommes interrogés sur les possibilités d'atténuation ou de retrait de la source radioactive et quelles étaient les conséquences de ces traitements.

1 HISTOIRE ET APPLICATIONS

1.1 LA DECOUVERTE DE LA RADIOACTIVITE

La découverte de la radioactivité*¹ ne s'est faite ni en une seule fois ni par un seul homme. Il s'agit de découvertes expérimentales car la structure même de la matière, l'atome, n'était pas encore une hypothèse acceptée de tous. C'est suite à une cascade de découvertes entre 1895 et 1898² que la radioactivité et la structure de l'atome furent mises en évidence.

La première de ces découvertes fut celle des rayons X* le 8 novembre 1895 par le physicien allemand Wilhelm Röntgen (1845-1923) qui les a nommés ainsi du fait de leur nature inconnue. Il travaillait sur les rayons cathodiques et utilisait un tube de Crookes pour ses expériences. Il s'agit d'une ampoule de verre dans laquelle se trouve un

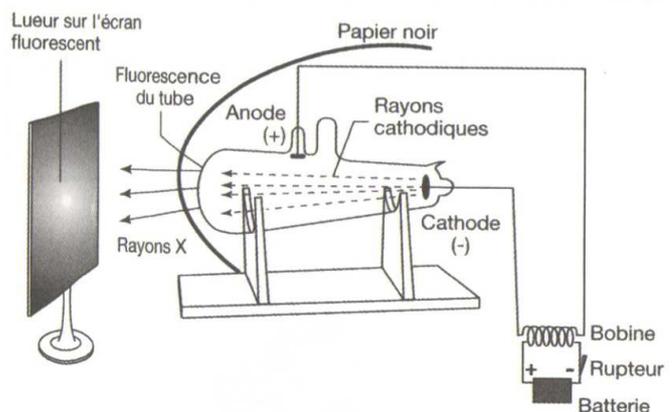


Fig. 1 : Principe de l'expérience de Röntgen. ©Bimbot, 2006, p.6

vide poussé et où se propagent des rayons cathodiques obtenus par la mise à haute tension d'une cathode. Lorsque ces rayonnements touchent la paroi du verre, ce dernier fluoresce. Lors de son



Fig. 2 : Première radiographie de l'Histoire représentant la main de Mme Röntgen. ©Souchère, 2005

expérience, Wilhelm Röntgen a déposé un papier noir autour de l'ampoule et a placé un écran recouvert de platino-cyanure de baryum (plus fluorescent que le verre) à un mètre. En démarrant l'expérience, cette plaque fluorescissait à chaque fois même en mettant des objets entre le tube et la plaque (Fig. 1)³. En y mettant sa main, il a aperçu l'ombre de ses os. Il a répété l'expérience avec la main de sa femme en la posant sur une plaque photographique qui fut impressionnée par les rayons X, faisant le premier cliché radiographique de l'histoire (Fig. 2). Comme la zone de fluorescence coïncidait avec la zone d'émission de rayons X, le physicien et mathématicien français Henri Poincaré (1854-1912) a associé les deux phénomènes lors de la présentation des résultats de Wilhelm Röntgen à l'Académie des Sciences de Paris en 1896. Le physicien français Henri Becquerel (1852-1908)⁴, un spécialiste de la luminescence* se trouvait à

cette conférence.

¹ Note à l'attention du lecteur. Les * indiquent les mots en glossaire

² Bordry, 1996, p.17-18.

³ Bimbot, 2007, p.5-7.

⁴ Bordry, 1996, p.20.



Fig. 3 : Sulfate double d'uranyle et de potassium ayant servi à la découverte de la radioactivité. ©St-Hilaire

Henri Becquerel a voulu vérifier l'hypothèse que toutes les matières à forte fluorescence engendraient des rayons X comme le suggérait Henri Poincaré. En février 1896, il a fait plusieurs expériences avec des lamelles d'échantillons cristallins et transparents de sulfate double d'uranyle et de potassium (un sel d'uranium) (Fig. 3) sur une plaque photographique entourée de deux feuilles noires épaisses avant de

placer le tout au soleil. Il savait que ces lamelles étaient très lumineuses et voulait voir si en activant la matière par le soleil, elles impressionneraient la plaque photographique. En effet, sur les développements photographiques il pouvait reconnaître sans difficulté la forme des lamelles ou des autres objets placés. De ces expériences, il lui semblait alors que l'hypothèse d'Henri Poincaré était correcte. Pourtant, le 1^{er} mai 1896, il revint sur cette conclusion. Suite à l'absence de soleil pendant plusieurs jours, le scientifique avait placé ses montages expérimentaux avec une croix de Malte dans un tiroir. Afin de vérifier si les sels conservaient sur le long terme une phosphorescence, il a développé les films même s'il ne les avait pas exposés au soleil. Alors qu'il s'attendait à trouver des impressions faibles et floues, il a découvert avec surprise des clichés d'une grande netteté (Fig. 4). Cette expérience a démontré que ces minéraux n'avaient pas besoin d'une exposition au soleil préalable mais qu'ils émettaient une luminescence spontanée. Henri Becquerel a baptisé ce nouveau rayonnement « rayons uraniques »⁵. C'est de ce jour qu'est datée la découverte de la radioactivité bien que le terme ne soit inventé que plus tard par Marie Curie. En 1897, il publiait une note rapportant qu'une année plus tard, l'intensité des sels d'uranium n'avait pas baissé. Ayant l'impression d'avoir épuisé le sujet, il a commencé d'autres recherches sur un autre thème⁶.



Fig. 4 : La silhouette de la croix de Malte placée entre la plaque photographique et les sels d'uranium. ©Archives Curie et Joliot-Curie

⁵ Radvanyi, 1998, p.9

⁶ Bordry, 1996, p.21

Entre 1896 et 1897, les chercheurs s'intéressaient peu aux rayons uraniques et ne voyaient pas l'importance de cette découverte dans la compréhension de la structure de l'atome. L'attention était surtout portée sur le phénomène des rayons X (Fig. 5) et cela a amené des découvertes liées à l'électron libre, l'électron lié à l'atome et à l'électricité⁷.

Après la naissance de sa première fille en 1897, Marie Sklodowska-Curie (1867-1934), d'origine polonaise, commençait une thèse de doctorat en sciences physiques à la Sorbonne sur l'étude de ces mystérieux rayons uraniques sous le conseil de son mari Pierre Curie (1859-1906), professeur à l'École Municipale de Physique et de

Chimie Industrielle et physicien déjà reconnu par ses pairs. La problématique de travail de Marie Curie était la question de la production spontanée de rayonnements d'autres sels d'uranium. Pour faire les mesures quantitatives, son mari, spécialisé sur les cristaux et le magnétisme, a développé et construit des appareils notamment un quartz piézo-électrique et un électromètre à quadrants associés à une chambre d'ionisation* qui permettent une étude quantitative et non plus qualitative⁸ (Fig. 6). Après l'étude de plusieurs minéraux, ils se sont rendus compte que l'uranium n'était pas la seule substance émettrice de ces rayons uraniques, tel le thorium. Ils ont découverts également que, selon les mots de Marie Curie, « certains minéraux contenant de l'uranium, la pechblende et la chalcopite, sont plus actifs que l'uranium

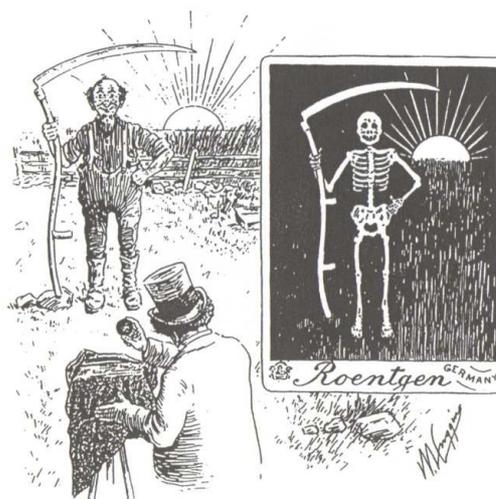


Fig. 5 : Les rayons X ont suscité beaucoup d'intérêt et de curiosité auprès des médecins mais aussi du grand public. ©Bimbot, 2006

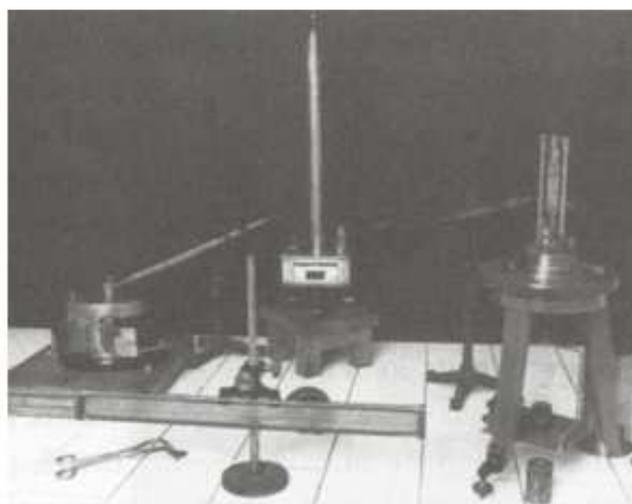
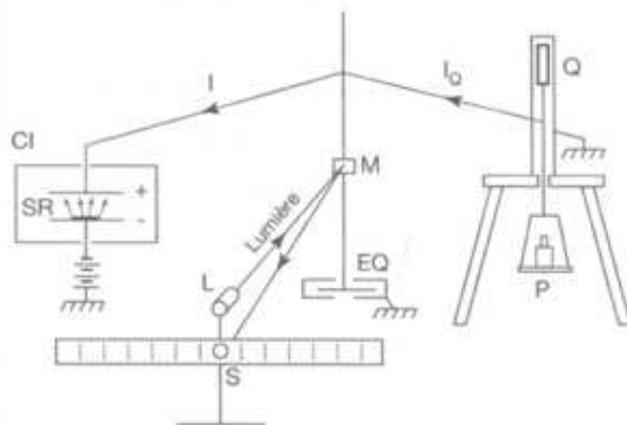


Fig. 6 : Dispositif expérimental utilisé par Pierre et Marie Curie. ©Bimbot, 2006

CI : Chambre d'ionisation ; SR : source radioactive ; EQ : électromètre à quadrants ; L : source lumineuse ; M : Miroir ; S : Spot lumineux ; I : Courant d'ionisation ; I_Q : courant électrique provenant du quartz Q ; P : poids.

⁷ Bordry, 1996, p.22

⁸ Radvanyi, 1998, p.13

*pur*⁹ ». C'est en faisant la synthèse de ces minéraux qu'en juillet 1898, le polonium est mis en évidence, puis le radium en décembre de la même année. Ces éléments sont alors nommés comme étant *radioactifs* pour la première fois.



Fig. 7 : Frédéric et Irène Joliot-Curie juste après leur découverte en 1934.
©Bordry, 1984

En 1903, le troisième prix Nobel de physique a été attribué conjointement à Henri Becquerel et Pierre et Marie Curie car il n'a pas été possible de désigner la paternité de la découverte entre les deux équipes de recherche. Henri Becquerel avait le premier mis en évidence ces rayons uraniques et le couple Curie avait largement approfondi cette découverte pour rendre désuet le terme de rayons uraniques, le remplaçant par "radioactivité"¹⁰. Les scientifiques des trente années suivantes sont allés toujours plus loin dans la matière et l'atome : différents rayonnements radioactifs ont été mis en évidence, l'existence du noyau a été prouvée et étudiée dans sa structure interne et la physique quantique a commencé à bouleverser la physique classique. En 1935, Frédéric (1900-1958) et Irène (1897-1956) Joliot-Curie (Fig. 7) ont reçu le prix Nobel de chimie pour une découverte qui a totalement changé le monde de la radioactivité. En

effet, en bombardant une feuille métallique de particules alpha, ils ont mis en évidence la possibilité de créer une source radioactive. Dès lors, la radioactivité naturelle est différenciée de la radioactivité artificielle et ses applications ont été nombreuses dans les domaines médical, industriel, de la recherche et militaire¹¹.

1.2 LES OBJETS RADIOACTIFS

Les objets décrits dans ce chapitre ne représentent pas une liste exhaustive. Ces appareils sont en revanche les plus susceptibles d'être trouvés dans un musée ou une collection.

1.2.1 Les objets des années folles

Le radium a été une découverte scientifique importante mais est aussi devenu le symbole de toute une époque. Le XIX^{ème} siècle se termine avec une série de découvertes majeures et Marie Curie, illustre femme de science, et son radium fascinaient. Suite à cette cascade de découvertes, la société prit confiance dans le progrès et la technologie et était persuadée que la science réglerait tous les problèmes de ce monde. Au moment de sa découverte, le radium et le phénomène de radioactivité étaient seulement constatés et non compris. L'énergie dégagée par ce minerai semblait inépuisable et lui a conféré un aspect mystérieux. De

⁹ Bimbot, 2007, p.19.

¹⁰ Bimbot, 2007, p.25.

¹¹ Bordry, 1984, p.111.

ce fait, on lui a prêté rapidement de nombreuses vertus thérapeutiques, cosmétiques et énergétiques dans les années 1920-1930¹². La publicité n'a pas hésité à s'emparer du mot magique pour faire vendre des produits. Le radium se retrouvait partout : des crèmes, des vêtements de corps, des rasoirs, des stylos, des sodas, du beurre, des cigarettes, etc. De nouvelles marques ont vu le jour qui incorporaient les mots radioactif, atomique, radium ou tout autre nom pouvant évoquer le phénomène auprès des consommateurs¹³. Certains de ces objets contenaient réellement de la matière radioactive, d'autres n'utilisaient que le nom prestigieux à des fins de marketing¹⁴.

Nous ne présentons ici que les trois plus grands domaines de vente où il a été prouvé que les produits vendus contenaient réellement des substances radioactives.

L'eau de Jouvence

L'utilisation du radium dans le domaine médical a permis d'améliorer les soins aux malades. La compréhension du phénomène n'étant pas encore parfaite, le radium s'est vu auréolé de propriétés médicales spectaculaires, si bien que de nombreux produits de consommation destinés à la population promettaient santé et longue vie à qui ingérait de faibles quantités de cette matière. Plusieurs formes de consommation ont été développées. Il arrive que certaines eaux naturelles passent par des minerais d'uranium et deviennent légèrement radioactives. Avec la découverte du radium et de ses étranges propriétés, le mythe de la fontaine de Jouvence a été remis au goût du jour. Appuyés par les médecins qui développent des thérapies avec le radium, dès 1902, les établissements thermaux ont vanté les propriétés médicales de leur eau enrichie parfois artificiellement en émanations de radium¹⁵ (Fig. 8). Plusieurs maladies étaient soignées ainsi comme les dermatoses, la goutte, les rhumatismes ou les maladies du système respiratoire¹⁶.

Rapidement, les médecins ont cherché à savoir quelle était la meilleure façon d'utiliser ces émanations de radium pour qu'elles soient les plus efficaces possible. Il y a donc eu plusieurs voies d'absorption, la voie cutanée par bains ou boues étant la première. Dans un second temps, des bouteilles d'eau minérale radioactive (enrichie en radon) étaient commercialisées mais elles perdaient rapidement leur activité* car le radon a une demi-vie¹⁷ de 3.8 jours. Des appareils ont été inventés pour réactiver une eau autrefois active. Le plus célèbre est celui de Walter Mund en 1929 (Fig. 9) qui utilisait du bromure de radium comme source de radon et qui, par un système de tubulures, réactivait



Fig. 8 : Publicité pour les bains thermaux d'Evaux-les-Bains, en France. ©Philippe Giraud.

¹² Bordry, 1998, p.116.

¹³ A l'Annexe 3 - Marques déposées, p.98 se trouve une liste des marques déposées entre 1927 et 1934.

¹⁴ Voir l'Annexe 18 - Publicité des objets radioactifs, p.133.

¹⁵ Appellation de l'époque. Il s'agit du gaz radon.

¹⁶ Boudia, 1998, p.127

¹⁷ Voir chapitre 2.2.3 La décroissance radioactive, p.38.

des eaux au radon de 6 microcurie par litre (ce qui équivaut à 222 MBq/m³, soit 4.4 million de fois plus élevée que la concentration naturelle de radon dans l'eau des ménages en Suisse¹⁸). L'inventeur précise que cette concentration était « 75 fois plus élevée que les eaux Gastein et 100 fois plus que celles de Baden-Baden¹⁹ ». Les émanations de radium étaient également inhalées par les patients. Ces appareils appelés émanatorium (Fig. 10) avait comme sources des sels de radium. Enfin, des appareils ont été mis à disposition de la population pour activer soi-même n'importe quelle eau. Il s'agissait des fontaines à radium.

Il y avait deux sortes de fontaines à radium²⁰. Les premières sont des jarres de terre cuite dont l'émail intègre de la carnotite, un minerai de l'uranium. L'eau qui est stockée à l'intérieur devient dès lors radioactive. Le deuxième type de fontaine contenait une source de radium qui générait du radon et qui rendait l'eau radioactive. Ces fontaines pouvaient contenir entre 5 et 8 microcurie de sels insolubles de radium²¹. La première fontaine à radium a été fabriquée par la Compagnie anglaise Radium Ltd de

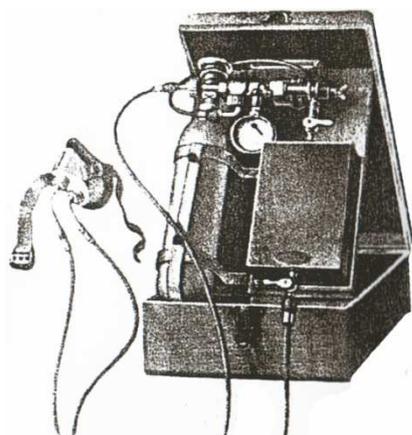


Fig. 10 : Appareil d'inhalation de radon.
©Institut Curie

Londres. Il était conseillé de boire un verre d'eau par jour de cette fontaine pour améliorer sa santé et sa longévité. Ce fut un grand succès commercial et l'utilisation de ces fontaines a été très populaire. Leur déclin a commencé après la Seconde Guerre Mondiale lorsque le regard sur le radium et la radioactivité a changé, notamment à cause des deux bombes nucléaires (Hiroshima et Nagasaki)²².

La panacée universelle

Une autre forme de « consommation » du radium à des fins thérapeutiques et médicales était la potion universelle. Cette

panacée composée de différents mélanges selon les fabricants devait guérir toutes les maladies ou presque. Heureusement pour les consommateurs, le prix du radium était très élevé²³ si bien qu'il n'y avait presque pas de substances radioactives (environ 100 Bq/gr²⁴) voire même aucune trace. Cependant, la consommation de ces potions miracles cessa presque brutalement à la mort d'Eben Byers en mars 1931.



Fig. 9 : Appareil Mund en 1929
©AC & JC

¹⁸ OFSP, 2000, p.1-3.

¹⁹ Cosset, 2011, p.52.

²⁰ Voir l'Annexe 18 - Fontaines à radium, p.134.

²¹ Genet, 1996, p.127

²² Boudia, 1998, p.130.

²³ En 1920, un gramme de radium coûtait 900'000 francs environ, soit le prix d'un immeuble à Paris à cette époque, et le gramme d'or valait 200 fois moins. Cela s'explique par la difficulté d'extraire l'élément du minerai d'uranium, la pechblende. Les méthodes de l'époque n'étant pas optimisées, il fallait 400 tonnes de pechblendes pour un gramme de radium. Aujourd'hui, les calculs démontrent que 3 tonnes de pechblendes donnent un gramme de radium. [Genet, 1996, p.125].

²⁴ Bordry, 1998, p.122.

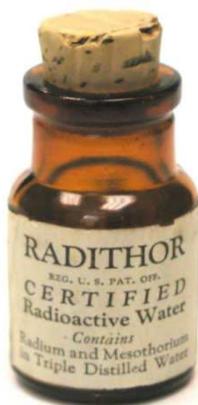


Fig. 11 : Flacon de radithor.
©Oak Ridge Associated Universities

Ce milliardaire américain, propriétaire d'une industrie métallurgique, était un grand sportif (champion de golf et de tir au pigeon) mais en 1927, en chutant, il s'est blessé au bras. La médecine classique n'arrivant pas à estomper les douleurs persistantes même après guérison, son médecin lui a prescrit une cure de Radithor (Fig. 11). Ce flacon de 16.5 ml contenait un microcurie de radium (ce qui représente 10 mSv par ingestion) et prétendait pouvoir soigner plus de 150 maladies ! Eben Byers buvait plusieurs flacons par jour et disait se sentir mieux. Il était tant persuadé des bienfaits de cette potion qu'il en faisait boire à ses chevaux de course. En quatre ans, il a bu entre 1'000 et 1'500 flacons, ce qui correspond à trois fois la dose mortelle s'il l'avait consommée en une seule fois. Le radium se fixe surtout dans les os, si bien qu'à partir de

1930, Eben Nyers a commencé à maigrir, perdre ses dents, se briser les os facilement. Son autopsie a révélé sans difficulté l'empoisonnement au radium. Son corps était devenu suffisamment radioactif pour que ses dents seules impressionnent des plaques photographiques C'est suite à ce drame que les autorités médicales américaines puis européennes ont introduit une législation sévère sur les produits contenant des substances radioactives. « *Récemment, un cancérologue de l'université de Cleveland découvrit chez un antiquaire quelques flacons vides de Radithor. Ils se révélèrent encore largement contaminés, prouvant bien la présence du microcurie de Radium allégué dans la publicité initiale du produit*²⁵ ».

La beauté du radium

Si le radium a ravivé le mythe de la fontaine de Jouvence, il était presque normal que le commerce du cosmétique s'empare du mot magique. Il y avait d'autres types de produits comme des sels de bain, du dentifrice, du parfum, du rouge à lèvres, etc. Il y avait également plusieurs marques connues : Microradium, Ramey, Radiumelys, Radiocrémeline, la crème Activa et Tho-radia. Cette dernière est sans doute la marque cosmétique aux substances radioactives la plus célèbre. Elle s'est imposée non pas par sa meilleure efficacité mais par sa campagne publicitaire. La très belle affiche (Fig. 12) créée par le publicitaire Tony Burnand a sans aucun doute été le fer de lance de cette campagne. L'aventure française du Tho-Radia a commencé en 1933 jusqu'en 1960²⁶.

²⁵ Cosset, 2011, p.47.

²⁶ Lefebvre, 2002, p.475.

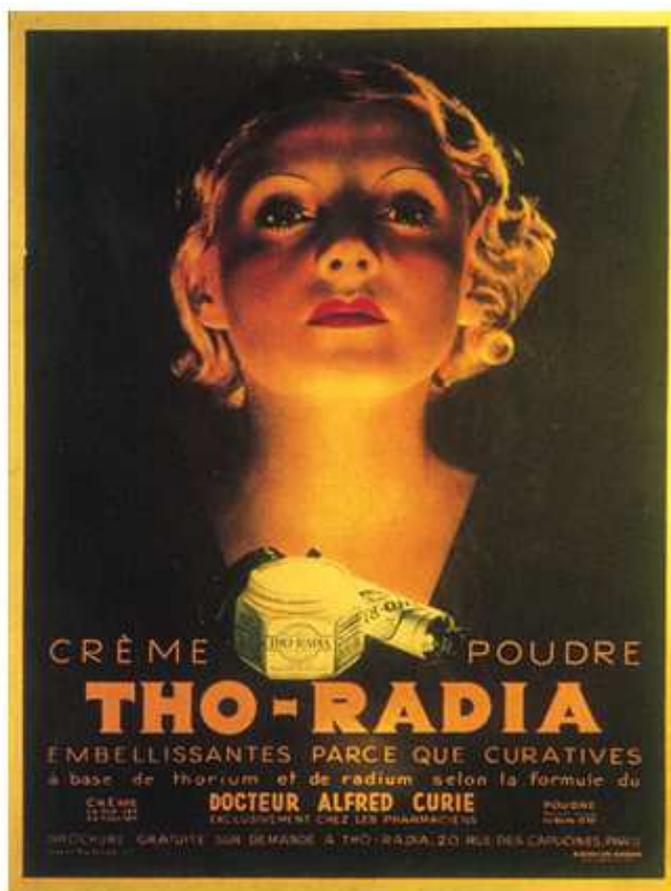


Fig. 12 : L'affiche la plus connue et la plus réussie de Tho-Radia de Tony Burnand et le modèle, Jacqueline Donny, Miss France 1948, Miss Europe 1949 et ambassadrice de la marque. ©Musée Curie, Institut Curie.

La principale préoccupation est de savoir si tous ces produits contenaient réellement des substances radioactives. Tout porte à croire que, comme les panacées, très peu d'entre eux en contenaient ou dans des quantités infimes. Les produits Tho-Radia ont visiblement contenu réellement du thorium et du radium selon le certificat d'authenticité que possédait la marque. Pour 100 gr de crème, il y avait 0.50 gr de chlorure de thorium et 0.25 gr de bromure de radium²⁷. Pour rassurer leurs clients sur la dangerosité « supposée » de ces produits (les scandales du Radithor et des radium girls²⁸ étaient d'actualité) voici l'un de leur texte publicitaire : « *A faible dose, l'action du radium est stimulante de la fonction cellulaire, tandis que les fortes doses sont destructives. Il en est de même pour toute une catégorie de produits utilisés en thérapeutique. [...] La différence entre les deux actions est comparable à [...] une douce chaleur qui fait éclore les œufs et une chaleur vive qui les fait cuire*²⁹ ». Même si à partir de 1937, il est certain que ces produits ne contenaient plus de thorium ou de radium³⁰), cela n'empêcha pas la marque de continuer de le faire croire à ses clients jusqu'en 1960.

²⁷ Lefebvre, 2007, p.923.

²⁸ Voir chapitre suivant.

²⁹ Lefebvre, 2007, p.924.

³⁰ Liste désuète qui rassemblait les produits toxiques (tableau A), les produits stupéfiants (tableau B) et les produits dangereux (tableau C) et qui fut modifiée en 1953. [Légifrance.gouv.fr, en ligne].

1.2.2 La peinture luminescente

Une propriété célèbre des sels de radium est la luminescence spontanée. Déjà dans leur laboratoire, Pierre et Marie Curie avaient noté cette étrange capacité lorsqu'ils éteignaient les lampes. Mais le prix du radium était tel qu'il n'aurait jamais pu être utilisé ainsi pour des peintures. Cependant, une autre propriété qui permit l'élaboration de ces peintures luminescentes était de rendre fluorescentes certaines substances irradiées, tout particulièrement le sulfure de zinc qui fut utilisé pour les peintures. Cette substance lumineuse a donc été employée pour rendre visibles pendant la nuit les aiguilles des montres, mais aussi des cadrans des avions et des voitures, des objets religieux, des yeux de poupées, des leurres de pêche, et tout autre objet luminescent³¹.

Durant la Première Guerre Mondiale, 30 g du précieux élément fut utilisé au total pour illuminer les cadrans, panneaux, boussoles et viseurs des armées, alors que lors de la Seconde Guerre Mondiale, les Etats-Unis seuls ont consommé pour des raisons militaires 190 g de radium, rendant des véhicules



Fig. 13 : Montre Glycine aux aiguilles radioluminescentes, 1931. ©MIH

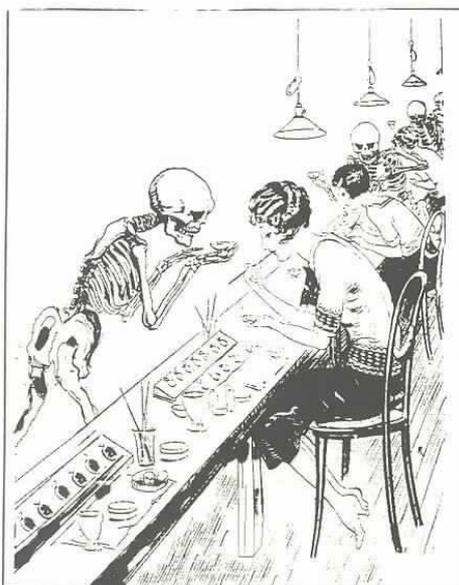


Fig. 14 : Caricature dénonçant le scandale des Radium Girls. ©swisswatchblog.ch

la plus impressionnante étant un cancer de la mâchoire (ostéosarcome). Ce scandale est connu sous le nom de celui des Radium Girls (Fig. 14).

totallement radioactifs au vu du nombre d'objets contenant ces peintures, comme sur le cuirassé *USS Iowa* où 1400 objets peints au radium ont dû être éliminés. Pour le grand public, la principale application de cette peinture était les aiguilles des montres (Fig. 13) dont le premier brevet a été déposé en 1903 par l'américain Georges F. Kunz³².

Le radium était pensé inoffensif. Cependant le premier cas d'un empoisonnement au radium chez des ouvrières a été publié en 1925 aux Etats- Unis. Le travail de ces jeunes femmes était de peindre les cadrans des montres et réveils à l'aide de pinceaux. Afin d'améliorer la précision de leurs gestes, elles affinaient la pointe de ces pinceaux entre leurs lèvres régulièrement, ingérant de ce fait de la matière radioactive.

Ces ouvrières ont alors développé des cancers et des nécroses,

³¹ Voir l'Annexe 18 - Peintures Radioluminescentes, p.136.

³² Ebinger, 1912, p.79.

En Suisse, la production de matières lumineuses était assurée par deux fournisseurs : Merz & Benteli et RC TRITEC. Certaines villes, comme la Chaux-de-Fonds, sont devenues réputées pour leurs ateliers de pose de radium³³, mais apparemment il n'y a pas eu une hausse de cancers aussi significative qu'aux Etats-Unis. L'explication est peut-être que les outils étaient légèrement différents. En effet, les poseuses de la Chaux-de-fonds n'avaient pas de pinceaux mais des aiguilles à pointe ronde ou plate en os appelées chevillettes³⁴. En 1963, la première ordonnance sur la radioprotection en Suisse interdisait l'utilisation du radium comme peinture lumineuse. Quelques essais ont été faits, comme le strontium 90 mais l'alternative a été l'emploi du tritium, un radionucléide* artificiel n'émettant que du rayonnement β arrêté par le verre des montres. Jusque dans les années 90, cette matière a illuminé les aiguilles puis a été à son tour abandonnée bien que son utilisation ne soit interdite que depuis 2007³⁵. A présent la matière lumineuse utilisée en Suisse est le Luminova® non radioactif, et fabriquée par la société RC TRITEC.



Fig. 15 : Publicité de Monnier Radium, entreprise de pose de radium et représentant de Merz & Benteli. ©La fédération horlogère suisse, 1935

1.2.3 Les outils et appareils médicaux

La découverte des rayonnements ionisants* a été la plus bénéfique en médecine. C'est suite à l'expérience non-voulue d'Henri Becquerel et confirmée par Pierre Curie que la curiethérapie s'est développée. En effet, ces messieurs ont constaté que le port prolongé d'une fiole contenant du radium au contact, ou presque, de la peau occasionnait une brûlure de celle-ci. La curiethérapie est la branche de la médecine employant des radioéléments³⁶. Le principe développé est de brûler les cellules malades par application d'une source radioactive sur la tumeur ou même à l'intérieur³⁷. Dans un premier temps, des poudres à base d'uranium étaient appliquées sur la peau dans des petits sacs. Ensuite, « l'émanation du radium » (le radon) était extraite et placée dans des tubes en verre qui étaient ensuite insérés dans les tumeurs. La gynécologie a également beaucoup utilisé ces nouvelles pratiques en induisant des applicateurs de vernis ou de peinture au radium qui étaient utilisés pour les cancers de l'utérus. Cependant, ces appareils étaient peu précis et les médecins ignoraient quelles étaient les doses qu'ils manipulaient. Le premier véritable pas en curiethérapie a été l'élaboration des aiguilles (Fig. 16 et Fig. 17) (entre 3 et 7 mg³⁸) et des tubes (pas plus de 10 mg³⁹) au radium en 1920 par les Docteurs Jean Pierquin et Georges Richard. Ces outils permettaient

³³ L'ouvrage *Les heures de la nuit* raconté par Raymond Monnier est un témoignage de la vie de l'entreprise Monnier Radium à la Chaux-de-Fonds.

³⁴ Monnier, p.34.

³⁵ Entretien Avec Mme Lisa Pedrazzi, 15 mai 2012

³⁶ La röntgenthérapie est celle qui utilise les rayons X et la radiothérapie est l'emploi de ces deux méthodes

³⁷ L'ensemble des instruments utilisés sont appelés des orum (objets au radium à usage médical).

³⁸ Brochure de l'Union Minière Belge, p.2

³⁹ Brochure de l'Union Minière Belge, p.7

de doser la quantité de sels de radium et pouvaient être utilisés en application ou en implantation. Les aiguilles sont construites en deux parties : « le corps de l'aiguille est creux et renferme le sel de radium soigneusement tassé ; la pointe est vissée, puis soudée au corps de l'aiguille après remplissage⁴⁰ ».

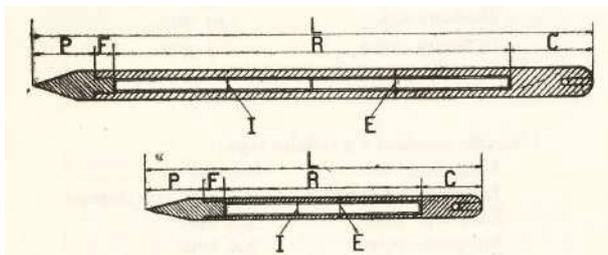


Fig. 16 : Schéma d'une aiguille à radium avec 1, 2 ou 3 cellules. ©Union Minière Belge

L = Longueur total	27.7 / 44.0 / 60.0 mm
R = longueur chambre	15.0 / 30.0 / 45.0 mm
C = longueur du chas	5.0 mm
F = longueur du filet	1.5 mm
P = longueur pointe	5.0 mm
E = diamètre extérieur	1.65 mm
I = diamètre intérieur	0.5 mm



Fig. 17 : Boîte à aiguilles et tubes au radium. ©Andra

Le problème de ces applicateurs est que le personnel soignant était constamment irradié avec les conséquences que cela supposait. Pour limiter au maximum les doses, les médecins travaillaient avec des pinces avec toute la difficulté que cela impliquait⁴¹. De plus, certaines capsules se brisaient avec le temps, laissant échapper le radon dans l'organisme. C'est avec la découverte des radionucléides artificiels que le radium a été remplacé par des substances aussi efficaces mais moins dangereuses (comme le césium 137, l'iridium 192 et les grains d'iode 125). Pourtant le radium ne disparut pas encore totalement du domaine médical. La bombe au radium (Fig. 18) a été développée en 1930 et a sans doute été l'appareil qui a ouvert la voie à la radiothérapie. Le principe était de charger un caisson blindé de plomb de plusieurs

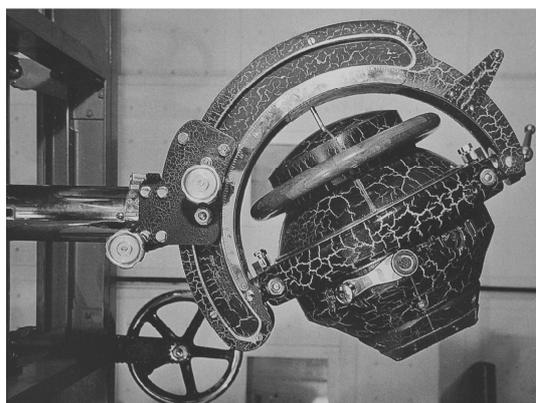


Fig. 18 : Bombe au radium, 1930. ©Musée Curie, Institut Curie

grammes (en général 10 g) et de ne laisser qu'une ouverture modulable. Le faisceau de rayonnement était ainsi « contrôlé » et n'exposait plus toute la pièce avec l'ensemble de ses occupants. Les temps d'exposition restaient cependant longs (30 minutes) et l'appareil n'était pas encore suffisamment précis. Rapidement, ces appareils ont été remplacés dans les années 1950-1960 par des bombes au cobalt 60⁴².

⁴⁰ Brochure de l'Union Minière Belge, p.2.

⁴¹ Placer une aiguille au radium sur une langue avec des pinces de 30 cm relève presque de l'exploit.

⁴² Cosset, 2011, p.37-40.

1.2.4 Les céramiques et verres

Depuis la découverte de l'uranium en 1789, les minerais d'uranium ont été utilisés dans la confection des glaçures des céramiques pour obtenir les couleurs jaune (uranate de sodium $\text{Na}_7\text{U}_2\text{O}_7$), rouge-orange (oxyde d'uranium (VI) UO_3) et parfois vert (oxyde d'uranium (VI) avec de l'oxyde de zinc) sous cuisson oxydante*. Sous cuisson réductrice*, cela donne du gris ou du noir (oxyde d'uranium (IV) UO_2)⁴³. L'utilisation des oxydes d'uranium avait l'avantage d'avoir une couleur d'un plus grand éclat que celle obtenue avec l'antimoniate de potasse pour le jaune par exemple⁴⁴.

Couleur	Teneur	Détails cuisson
Rouge	10 à 20 % d'oxyde d'uranium VI ou d'uranate de sodium	Glaçure riche en plomb car l'oxyde colore en formant un uranate basique de plomb du rouge feu au rouge tomate. La température de cuisson s'élève jusqu'à 1040°C – 1080°C.
Orange	5 à 10 % d'oxyde d'uranium VI	Une plus faible teneur d'oxyde de plomb et d'oxyde d'uranium donne un orange jaune clair. La température de cuisson s'élève jusqu'à 1040°C – 1080°C.
Jaune	2 à 10 % d'oxyde d'uranium VI 3 à 8 % d'uranate de sodium	Glaçure riche en oxyde de Bore (B_2O_3) et en alcalino-terreux et faible en oxyde de plomb. Le rajout d'oxyde d'uranium ou d'uranate de sodium colore une partie des alcalino-terreux en jaune. La température de cuisson s'élève jusqu'à 1260°C.

Tab. 1 : Description des couleurs principales pour glaçure à base de minerais d'uranium. ©Matthes, 2002

Ces glaçures se retrouvent essentiellement sur la faïence et la porcelaine fine sous forme de vaisselles ou de catelles (Fig. 19). Plus rarement, il est possible d'en trouver également sur des poteries ou des porcelaines émaillées⁴⁵. Ces pièces ont été vendues jusqu'en 1970. La production de ces glaçures a cessé pour deux raisons essentiellement ; d'autres mélanges plus rentables ont été trouvés comme celui de l'antimoine ou du fer, et une mauvaise publicité pour les fabricants sur le risque de radioactivité de leurs produits⁴⁶.



Fig. 19 : Catelle en céramique. La glaçure noir est en oxyde d'uranium. La photo témoigne de l'activité de cette décoration. ©OFSP

⁴³ Matthes, 2002, p.82.

⁴⁴ Brongniart, 1877, p.519.

⁴⁵ Schneider, 2001, p. 3-191.

⁴⁶ Schneider, 2001, p.3-192.



Fig. 20 : Verres pour service à digestif en semi-cristal moulé ouraline de la fin du XIX^{ème}. ©Ouraline

L'oxyde d'uranium peut aussi être ajouté à la composition du verre comme agent colorant. En général, cela confère au verre une couleur jaune avec des reflets verts. Il est possible que les verres soient également teintés de bleu, d'ambre, de blancs ou même de rose. La couleur de ces verres peut changer selon la lumière et l'angle de vue (Fig. 20). Les verres jaunes-verts sont désignés sous un terme spécifique : l'ouraline ou les verres d'urane.

Le diuranate de sodium ($\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$) ou le sodium uranyl carbonate ($2\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{U}\cdot\text{O}_2\text{CO}_3$) est mélangé à la pâte vitreuse afin que l'uranium soit dispersé dans toute la masse en oxyde d'uranium, donnant un rendu homogène. La masse de l'uranium représente entre 0.26 et 10 % du poids total d'un objet⁴⁷. Les objets en verre teintés par des oxydes d'uranium peuvent être des verres à boire, des gobelets, des bonbonnières, des pichets, des cendriers, des bougeoirs et d'autres objets décoratifs, mais aussi des bijoux⁴⁸. L'ouraline commence à être fabriquée dès 1830⁴⁹ et se termine à la fin de la seconde Guerre Mondiale. La fabrication semble toujours être d'actualité aux Etats-Unis et en Tchécoslovaquie⁵⁰ bien que ces produits ne soient plus que destinés aux collectionneurs⁵¹.

L'uranium n'est pas le seul radioélément ajouté au verre. En effet, il est possible d'y trouver du thorium 232 dans les lentilles optiques, utilisées surtout dans certains appareils photographiques entre 1930 et 1970⁵². Les lentilles Aero-Ektar (Fig. 21) développée lors de la deuxième Guerre Mondiale pour la reconnaissance aérienne sont sans doute les plus connues. La teneur en masse en thorium de ces lentilles se situe entre 11% et 13%. L'utilisation du thorium pour ces verres augmente l'indice de réfraction avec une faible dispersion (variation de l'indice d'onde) ce qui est très avantageux pour la reconnaissance aérienne. Il a été remarqué par les propriétaires de ces appareils que les lentilles sont devenues brunes. Ce changement de couleur est certainement dû à la présence de thorium⁵³.



Fig. 21 : Lentille Aero Ektar. ©De Vries, 2006

⁴⁷ Schneider, 2001, p.3-217.

⁴⁸ Voir l'Annexe 18 - Verrerie, p.135.

⁴⁹ Ouraline [En ligne]

⁵⁰ Hayter [En ligne]

⁵¹ Schneider, 2001, p.3-218.

⁵² Health Physics Society [En ligne]

⁵³ Briggs, 2002 [En ligne]

1.2.5 Les manchons des lampes à gaz

Certaines lampes à gaz (Fig. 22) étaient autrefois munies d'un manchon en oxyde de thorium (thorium 232 et thorium 228). Celles-ci furent très utilisées par les campeurs et les militaires pendant la Seconde Guerre Mondiale. Le principe de fonctionnement de cette lampe est de brûler le gaz émis par le pétrole. Cette combustion va chauffer le manchon qui va émettre de la lumière par son incandescence. Il faut atteindre 1375 à 1750 °C pour déclencher le phénomène. Cette propriété des oxydes de thorium a été découverte en 1885 par l'autrichien Carl Auer von Welsbach (1858 – 1929). Le manchon en lui-même est en coton ou en soie artificielle. La solution dans laquelle il était trempé était composée de thorium, d'oxydes de cérium et d'une petite quantité de nitrates de béryllium et de nitrates de magnésium. Pour finir, il était séché et brûlé pour convertir les nitrates en oxydes de thorium. Le rôle du cérium est de rendre la lumière blanche, celui du béryllium est de renforcer le manchon et celui du thorium est de produire une lumière incandescente. Le manchon était encore recouvert d'un film de nitrocellulose pour fixer les sels sur le tissu. Au total, il y a 250 mg à 400 mg d'oxyde de thorium dans un manchon⁵⁴.



Fig. 22 : Lampe à gaz avec manchon aux oxydes de thorium.
©SHAM

1.2.6 Les détecteurs de fumée et paratonnerres

Dans la lutte contre le feu, deux types de détecteurs de fumée ont été développés. Le premier est photoélectrique, c'est celui qui est utilisé actuellement, le deuxième, à ionisation, a été inventé en Suisse en 1935⁵⁵ et utilise une source radioactive. La plus répandue est l'américium 241 mais il est possible de trouver également du plutonium 238, du nickel 63 et du krypton 85. Le principe de fonctionnement est le suivant : la matière radioactive va diffuser ses rayonnements alpha grâce à l'air contenu dans l'appareil qui conduit l'électricité. Lorsque les fumées traversent la chambre d'ionisation, l'intensité du courant va baisser et déclencher l'alarme⁵⁶ (Fig. 23). Ces appareils sont interdits de vente en Suisse

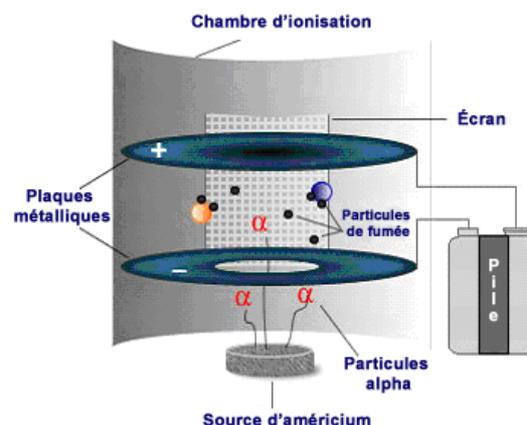


Fig. 23 : Schéma d'un détecteur de fumée à ionisation. ©CNA

mais peuvent encore être utilisés dans des conditions normalisées, ce qui signifie qu'il ne faut en aucun cas les démonter soi-même et les considérer comme déchets radioactifs* lorsqu'ils sont hors d'usage⁵⁷.

⁵⁴ Buckley, 1980, p.5-1 – 5-3.

⁵⁵ Johnson, 1979, p.434.

⁵⁶ ASN, 2010, p.282.

⁵⁷ OFSP, DFI

Les paratonnerres ont pour rôle d'attirer la foudre et de canaliser l'énergie électrique vers la terre en toute sécurité. Dans les années 1950, entre 100 et 200 paratonnerres contenant une source radioactive (appelés parad) ont été installés en suisse romande⁵⁸.



Fig. 24 : Cigogne perchée sur un parad de la marque Helita. La dégradation de ces appareils pose un problème environnemental. ©INPR

En effet, dès 1914, le docteur Leó Szilárd (1898-1964), physicien hongrois, a amélioré le paratonnerre de l'inventeur américain Benjamin Franklin (1706-1790) en ajoutant dans la pointe une source radioactive⁵⁹, du radium 226 ou de l'américium 241. L'idée étant que les rayonnements émis ioniserait l'air autour du paratonnerre et attirerait par conséquent bien mieux la foudre⁶⁰.

Il y a quatre marques principales⁶¹ en France (Duval Messien, Helita, Indelec, Franklin France) qui ont développé ces paratonnerres jusqu'en 1987, date à laquelle ces instruments ont été jugés dangereux et retirés de la circulation⁶². Tout comme les détecteurs d'incendie à ionisation, le risque est lié au démontage éventuel de ces appareils, mais également au fait qu'ils se trouvent à l'extérieur et qu'ils se dégradent donc plus facilement

(Fig. 24). La situation en Suisse de ces parad semble moins importante qu'en France où il est estimé qu'il reste entre 30 et 40'000 appareils dont certains auraient plus de 80 ans.

⁵⁸ Leuenberger, 2005, [en ligne]

⁵⁹ Inventaire national des paratonnerres radioactifs [en ligne]

⁶⁰ Fortier, 1923, p.371.

⁶¹ Voir Annexe 18 - Paratonnerres radioactifs, p.137.

⁶² ASN, 2010, p.282.

2 LE PHENOMENE RADIOACTIF

2.1 SOURCES RADIOACTIVES

La radioactivité est une propriété physique de certains atomes dont le noyau est instable. Comme partout dans la nature, la matière a tendance à se rapprocher d'un état énergétique plus, voire totalement, stable. Pour ce faire, les noyaux instables (appelés radionucléides) se transforment spontanément en produisant des particules et des rayonnements. A terme, les atomes se stabilisent et les noyaux ne se transforment plus. Cette transformation s'appelle désintégration* et s'effectue plus ou moins lentement. Cette vitesse de désintégration est propre à chaque radionucléide. La radioactivité est donc un phénomène tout à fait naturel qui existe depuis toujours dans la nature.

2.1.1 Sources naturelles

Le rayonnement cosmique

L'espace véhicule toutes sortes de particules et de rayonnements. Les rayonnements cosmiques ont pour origine des rayonnements solaires et des rayonnements galactiques venant d'au-delà de notre système solaire et parfois même d'au-delà de notre galaxie. Leur flux est relativement constant bien que le champ magnétique de la terre et l'activité solaire puissent le faire varier. L'énergie des rayonnements cosmiques dépasse 100 MeV. Ils interagissent avec la matière de la planète et ses habitants mais leur présence n'y est pas uniforme. Aux pôles, l'intensité des rayonnements est plus forte qu'à l'équateur⁶³. L'altitude est un facteur primordial dans les doses reçues par le rayonnement cosmique car il est absorbé et modifié par l'atmosphère avant d'atteindre le niveau de la mer. A cette altitude, l'intensité du rayonnement est de 0.54 mSv* par année. Les personnes vivant à 1000 mètres d'altitudes reçoivent une dose 60% plus élevée qu'au bord de la mer, sans compter les voyages en avion dont l'exposition est 150 fois supérieure à celle du niveau de la mer. Quant aux cosmonautes de la station MIR, ils subissent une exposition 500 fois supérieure⁶⁴ (Fig. 25).

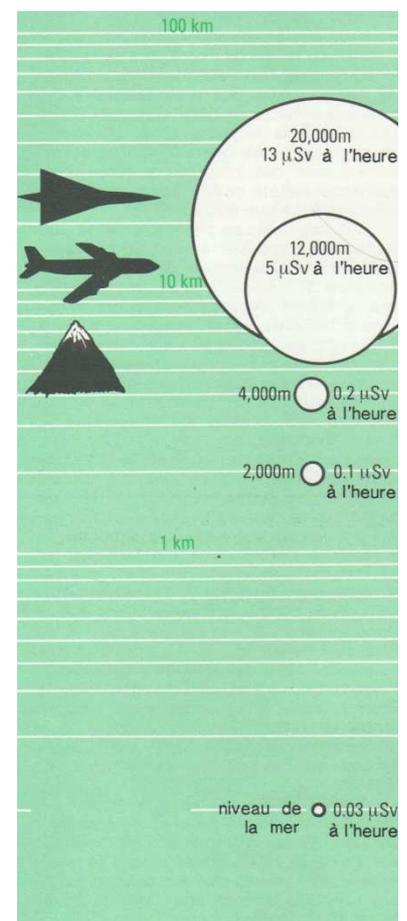


Fig. 25 : Rayonnements cosmiques selon l'altitude. ©PNUE, 1988.

Les radionucléides dans la nature

Plusieurs isotopes* radioactifs proviennent essentiellement de l'écorce terrestre et peuvent être observés parce que leur temps de désintégration est au minimum aussi long que l'âge actuel de la Terre. Les doses émises sont influencées par la géologie locale ainsi que par le climat (pluie, brouillard, ensoleillement,

⁶³ AEN, 1997, p.38.

⁶⁴ ARCEA/GASN, 2011, p.2

humidité). A l'intérieur des bâtiments elle dépend des matériaux de constructions qui peuvent autant faire écran aux rayonnements extérieurs qu'en émettre (par exemple le béton a une activité de 500 Bq/kg). Cela représente une exposition à peine supérieure à celle des rayonnements cosmiques au bord de la mer, bien que dans certains pays elle soit 20 fois supérieure⁶⁵ selon la géologie.

Le potassium 40, le radon 222 et le radon 220 sont les trois principaux radionucléides (ainsi que leurs descendants) naturels à être la source des doses internes. Le potassium 40 est d'ailleurs l'un des principaux composants radioactifs du corps humain avec le carbone 14 et, par conséquent, un adulte présente une activité d'environ 8'000 Bq⁶⁶. Le radon est un gaz et le résultat de la désintégration du radium. Il peut se trouver en plus ou moins grande concentration selon le milieu géologique mais contribue à 80% des doses ingérées. La dose absorbée est d'environ de 1.3 mSv par année et par habitant. Les radionucléides peuvent aussi se retrouver dans la nourriture ce qui représente 20% des expositions internes naturelles. « *Certains se fixent sur un organe, d'autres ne séjournent que peu de temps*⁶⁷ ».

2.1.2 Sources artificielles

Les traitements médicaux

Pour la population qui ne travaille pas avec la radioactivité, il s'agit de la plus importante source d'exposition artificielle dans la plupart des pays. L'utilisation la plus courante est la radiographie X qui délivre une dose d'environ 0.6 mSv⁶⁸ (cela dépend de la zone du corps à observer). Par année et par habitant, cela fait une moyenne de 1 mSv dans les pays industrialisés et de 0.3 mSv au niveau mondial⁶⁹. En revanche, l'utilisation des substances radioactives dans les diagnostics (notamment pour localiser les

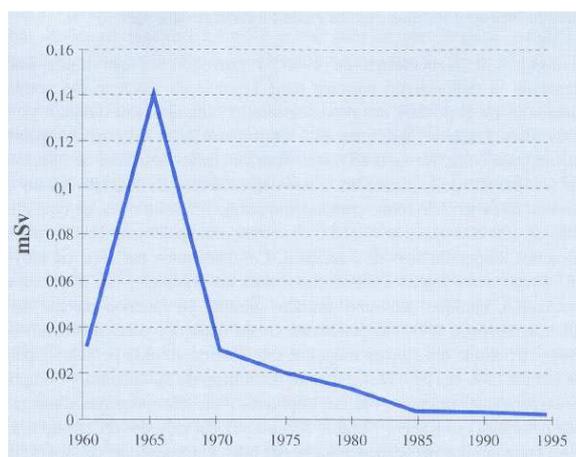


Fig. 26 : Doses annuelles de rayonnements résultant des essais nucléaires.

tumeurs) délivre des doses entre 1 et 20 mSv. Un scanner cérébral donne même une dose de 50 mSv⁷⁰. Pour soigner les cancers, des doses plus élevées sont nécessaire mais leur utilisation est focalisée sur une zone très restreinte et l'évolution des appareils permet de toujours plus limiter les radiations sur les tissus en bonne santé.

Les essais d'armes nucléaires

Entre 1954 et 1963, 450 essais d'armes nucléaires ont été effectués. Les substances radioactives de ces bombes se sont dispersées dans l'atmosphère. En

⁶⁵ ARCEA/GASN, 2011, p.2.

⁶⁶ Bonche, 2002, p.25

⁶⁷ ARCEA/GASN, 2011, p.2

⁶⁸ ARCEA/GASN, 2011, p.3.

⁶⁹ AEN, 1997, p.41.

⁷⁰ ARCEA/GASN, 2011, p.3

1964, elles représentaient le taux record de 7% (Fig. 26) de la radioactivité environnementale⁷¹. Ces substances se sont depuis redéposées sur terre et dans l'eau. A partir de 1980, suite à différents traités sur la question, tous les essais sont faits sous terre, évitant les retombées néfastes sur la population⁷². A présent, cela représente 1% de la radioactivité naturelle et équivaut à 0.02 mSv par an⁷³.

Les centrales à énergie nucléaire

Il s'agit des plus grosses entreprises utilisant des matières radioactives. Cependant, actuellement, elles sont sécurisées et surveillées pour ne pas disperser de substances radioactives dans l'atmosphère. La dose moyenne pour la population locale est de seulement 1% de la radioactivité naturelle.

Les centrales peuvent créer de gros dégâts lors d'accidents graves. L'exemple de la centrale de Tchernobyl dans l'Union Soviétique en 1986 est tristement célèbre et les retombées radioactives ont fait grimper la dose annuelle entre 1986 et 1989 à 40 mSv pour les habitants des zones contaminées⁷⁴.

2.1.3 L'exposition humaine globale

La dose annuelle n'est pas toujours identique d'une année à une autre. La moyenne globale pour des pays comme la France ou la Belgique est de 3.50 mSv par année et par habitant au début du XXème siècle alors qu'en Suisse, elle s'élève à 4.0 mSv. Cela s'explique par la géologie du sol qui contient des minéraux radioactifs. Cependant, un siècle auparavant, cette moyenne s'élevait à 2.50 mSv. Les essais et les accidents nucléaires (Tchernobyl, Fukushima) ne sont pas les principaux facteurs de cette augmentation. Elle est essentiellement due à l'évolution des diagnostics et des traitements médicaux⁷⁶.

	Doses moyennes annuelles pour la population suisse	
	mSv	%
Exposition naturelle		
Rayonnement cosmique	0.35	8.75
Rayonnement terrestre	0.45	11.25
Irradiation interne (nourriture)	0.40	10
Radon	1.60	40
Total	2.8	70
Applications médicales	1.00	25
Rejets de l'industrie et retombées atmosphériques	0.2	5
Total	1.2	30
Exposition globale	4.00	100

Tab. 2 : Exposition globale d'un individu pour une année⁷⁵.

⁷¹ ARCEA/GASN, 2011, p.3.

⁷² AEN, 1997, p.42.

⁷³ ARCEA/GASN, 2011, p.3.

⁷⁴ AEN, 1997, p.44.

⁷⁵ OFSP, 1999, p.22

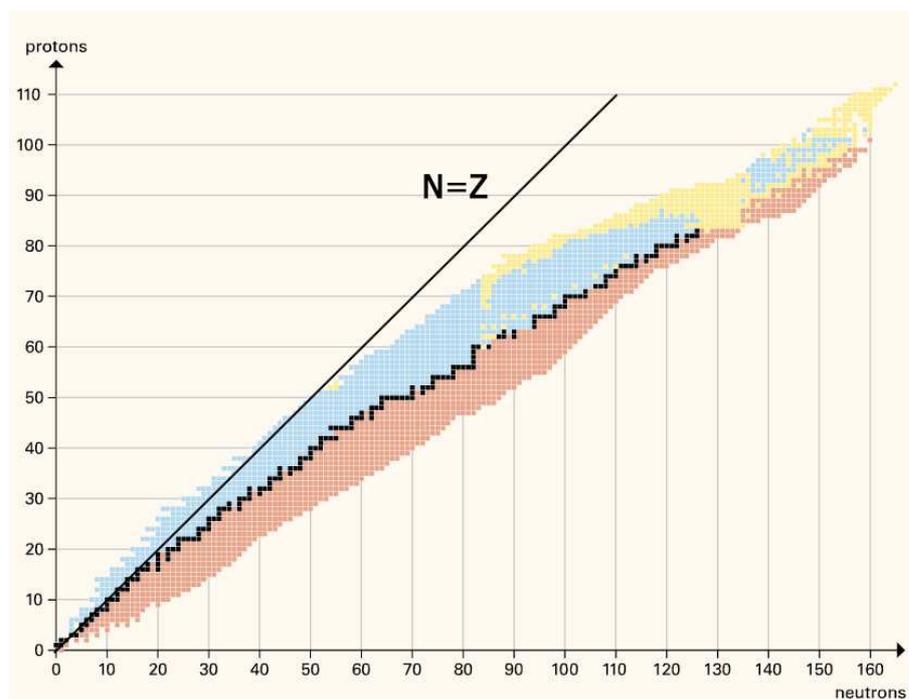
⁷⁶ La radioactivite.com [En ligne]

2.2 LA RADIOPHYSIQUE

2.2.1 Le noyau

La radioactivité est la propriété de certains atomes instables à se stabiliser en se transformant spontanément, ce qui dégage de l'énergie. Les processus mis en jeu dans le phénomène de la radioactivité se produisent essentiellement au niveau de noyau⁷⁷.

L'instabilité de ces noyaux provient de leur excédent de matière ou d'énergie. Ces noyaux sont appelés des radionucléides (en opposition aux noyaux stables dits nucléides*). Tous les nucléides mis en évidence expérimentalement sont représentés sur la carte des nucléides⁷⁸ (3847⁷⁹ nucléides sont représentés dont seulement 287 sont naturels⁸⁰). Il s'agit d'une extension du tableau de Mendeleïev qui donne toutes les caractéristiques physiques des nucléides. Les carrés noirs sont les nucléides stables et se trouvent dans ce qu'on désigne comme la vallée de stabilité (Fig. 27). Les autres nucléides cherchent constamment à se rapprocher d'un état stable en une ou plusieurs transformations internes⁸¹. Les radionucléides ont plusieurs façons d'atteindre la vallée de stabilité selon l'excédent de masse et/ou d'énergie à libérer. Sur le diagramme, les radionucléides en jaune ont un surplus de masse (donc de protons* et de neutrons*), ceux



en bleu ont un excès de neutrons et ceux en rouge ont trop de protons. Cette matière est émise sous forme de rayonnements. Cette émanation est appelée désintégration.

Fig. 27 : Diagramme de stabilité. ©Universalis

⁷⁷ Plus de détails à l'Annexe 4 - Le noyau, p.101.

⁷⁸ Ce tableau étant particulièrement grand, il est difficile de mettre dans ce travail une illustration. Nous vous invitons à consulter ce site pour l'étudier : <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>

⁷⁹ Nucleonica [En ligne].

⁸⁰ La radioactivité.com [En ligne].

⁸¹ Souchère, 2005, p.22-23.

2.2.2 Les rayonnements

Il y a plusieurs types de radioactivité et donc de rayonnements. Nous n'illustrerons ici que brièvement⁸² les trois principales et plus souvent rencontrées.

Alpha

Les radionucléides lourds avec un excédent de masse émettent des particules lourdes chargées qui composent le rayonnement α . Cette particule est composée de deux protons et de deux neutrons, soit, un noyau d'hélium (Fig. 28)⁸³. Elle est donc lente. Une particule α de 2 MeV a une vitesse de 9600 km/sec ce qui est relativement lent par rapport à la vitesse de la lumière (300 000 km/s)⁸⁴. Elle est également fortement chargée électriquement du fait de sa taille et ionise sans problème les atomes se trouvant sur son chemin. La trajectoire d'une particule α n'est pas déviée mais est très courte (Fig. 29) du fait de cette forte ionisation où elle perd son énergie. Le principal danger qu'elle représente est lorsqu'elle est ingérée.

Bêta

Les particules β sont émises par des radionucléides qui ont soit un excès de neutrons (β^-), soit un excès de protons (β^+). La particule est plus petite puisqu'il s'agit d'électrons* (Fig. 30) émis qui constituent le rayonnement β ⁸⁵. Les électrons sont plus rapides que les lourds noyaux d'hélium, leur vitesse s'approchant de celle de la lumière. De cette façon, ils sont également appelés les particules légères. Les particules β ionisent la matière et perdent leur énergie de cette façon. Cependant comme ils sont de masse similaire aux électrons des atomes qu'ils vont rencontrer, ils seront déviés de leur trajectoire lors d'un contact ou lorsqu'ils passent près d'un noyau. L'énergie perdue lors de ces freinages est restituée sous forme d'un photon γ qui est lui-même absorbé plus loin⁸⁶. Les particules β sont moins dangereuses que les particules α

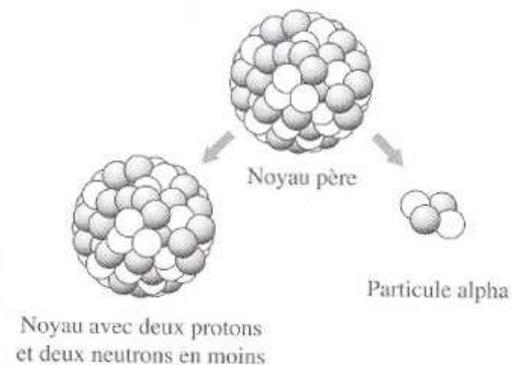


Fig. 28 : Désintégration Alpha ©Souchère, 2005

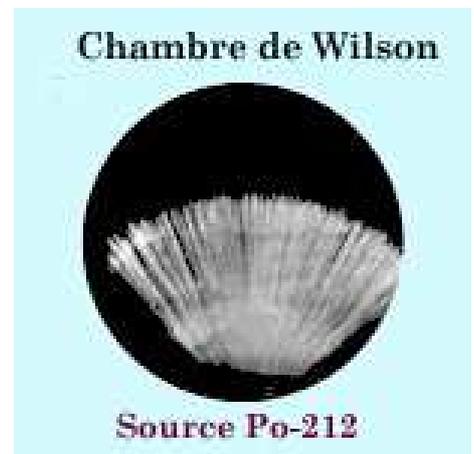


Fig. 29 : Chambre à brouillard de Wilson où est illustré le parcours défini (11.5 cm) des particules alpha de 9 MeV. ©IN2P3

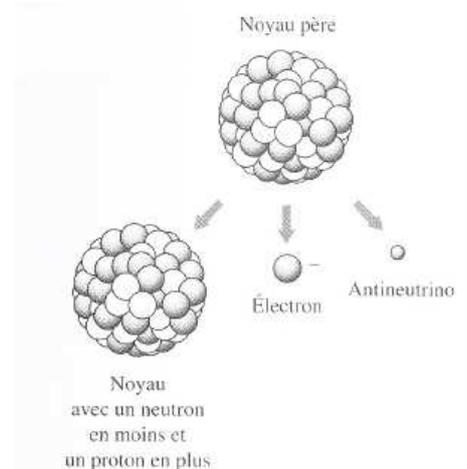


Fig. 30 : Désintégration Bêta moins ©Souchère, 2005

⁸² Plus de détails à l'Annexe 4 - Les rayonnements, p.101.

⁸³ Souchère, 2005, p.23-24.

⁸⁴ La radioactivité.com [En ligne].

⁸⁵ Giancoli, 2004, p.364.

⁸⁶ La radioactivité.com [En ligne].

car moins énergétiques mais elles peuvent en conséquence pénétrer plus profondément la matière.

Gamma

Le rayonnement γ n'est pas composé de particules chargées mais de photons d'une longueur d'onde définie. C'est cette longueur d'onde qui classera le photon comme rayonnement X ou γ . Ils sont souvent émis suite à une désintégration α ou β quand le radionucléide a encore un excès d'énergie (Fig. 31). L'émission d'un rayon γ permet au noyau de se réorganiser⁸⁷. Etant les moins énergétiques, les rayons γ peuvent traverser pendant longtemps la matière sans interagir avec les atomes. Il est très difficile dans ce cas de les stopper.

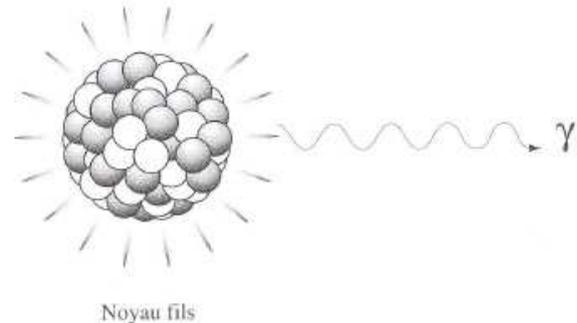


Fig. 31 : Désintégration Gamma ©Souchère, 2005

2.2.3 La décroissance radioactive

Les désintégrations d'un échantillon d'isotope radioactif se font de façon imprévisible. Cependant, en utilisant les probabilités, le nombre de désintégrations dans un échantillon peut être déterminé sur un temps donné. Il a donc été observé qu'au cours du temps, le nombre de désintégrations de noyaux d'un même isotope radioactif décroît de façon exponentielle. Ce constat est appelé la loi de la décroissance radioactive. « On appelle activité d'une substance donnée le nombre de noyaux qui se désintègrent à un moment donné⁸⁸ » et l'unité utilisée est le becquerel (Bq)* qui correspond à une désintégration par seconde. Un isotope radioactif n'est pas caractérisé par le temps total nécessaire à une activité nulle mais par sa demi-vie*⁸⁹ ($T_{1/2}$). Il s'agit du temps nécessaire pour que son activité diminue de moitié. Ainsi, il ne reste à une substance composée d'un isotope radioactif que la moitié des radionucléides après une demi-vie, puis plus qu'un quart après deux demi-vies, un huitième après trois demi-vies, etc. (Fig. 32). Après

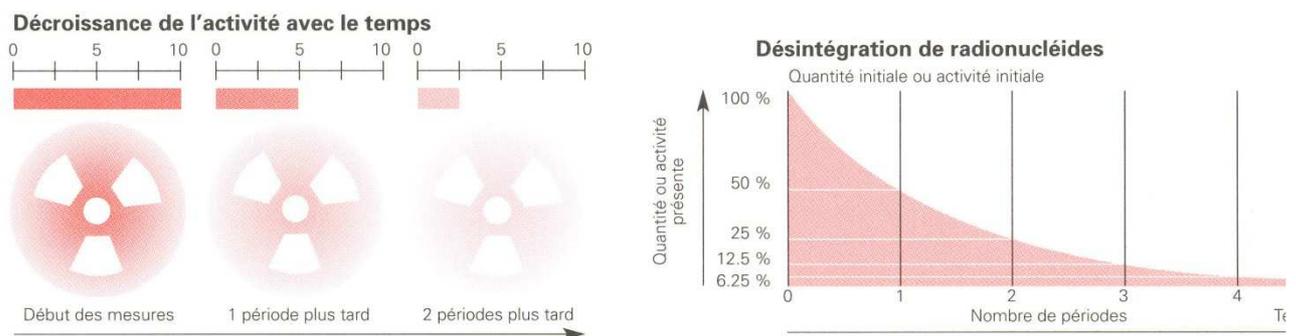


Fig. 32 : Décroissance de l'activité. ©OFSP

⁸⁷ Giancoli, 2004, p.365.

⁸⁸ OFSP, brochure, p.7.

⁸⁹ Les périodes des radionucléides sont indiquées dans l'ORaP, annexe 3, colonne 2.

une dizaine de demi-vies, l'isotope radioactif est considéré comme disparu bien qu'en réalité, il subsiste encore un millième de noyaux initiaux. Du fait qu'il s'agisse d'une courbe exponentielle, la courbe tendra vers zéro sans jamais l'atteindre⁹⁰.

2.2.4 Les chaînes de désintégration

Le radionucléide qui se désintègre donne lieu soit à un nucléide stable soit à un autre nucléide radioactif. Pour atteindre la vallée de la stabilité, il faut souvent de nombreuses étapes intermédiaires. Ces suites de radionucléides se terminent par un nucléide stable et sont appelées chaînes de désintégration ou séries radioactives⁹¹. Les radionucléides naturels sont toujours présents par ces chaînes de désintégration. En effet, lors de la formation du système solaire, il est supposé que presque tous les nucléides ont été formés au même moment. Les isotopes radioactifs de vie plus courte que l'âge de la Terre ont logiquement fini par disparaître. Trois radionucléides, l'uranium-235 (vie de 0.70 milliards d'années), l'uranium-238 (vie de 4.47 milliards d'années) et le thorium-232 (vie de 14.0 milliards d'années) se trouvaient dans « *le nuage proto-solaire qui s'est condensé pour former le Soleil, la Terre et les planètes*⁹² ». Tous les radionucléides naturels présents sont des filles de ces trois éléments lourds⁹³. Une quatrième chaîne, l'uranium-233, était autrefois naturelle mais a finalement disparu du fait des vies inférieures à celle de l'âge de la Terre. Cette chaîne est à présent artificielle.



Fig. 33 : Mémorial à Hambourg portant cette inscription "Aux Röntgenologistes et radiologistes de tous les pays qui ont donné leur vie dans la lutte contre les maux de l'humanité". Inauguré en 1936. ©Futura-Science

2.3 LA RADIOPROTECTION

La radioprotection regroupe l'ensemble des mesures prises pour protéger l'homme et l'environnement des rayonnements radioactifs. Pour comprendre les stratégies de protection mises en place, il est important de comprendre les effets des rayonnements sur la matière. Les effets néfastes des rayonnements ionisants ont été remarqués peu de temps après leur découverte. Les premières victimes furent les médecins, chercheurs et techniciens qui utilisaient énormément les rayons X.

Rapidement, plusieurs centaines de cas de lésions ont été observés dans les premières années comme des brûlures de la peau ou même des cancers après leur utilisation dans le domaine médical⁹⁴. En 1936, un monument a été construit à l'hôpital St. Georg à Hambourg en mémoire des victimes dans le corps médical

⁹⁰ Souchère, 2005, p.28-29.

⁹¹ Giancoli, 2004, p.368.

⁹² La radioactivité.com [En ligne].

⁹³ Voir Annexe 5 -Chaînes de désintégration, p.104.

⁹⁴ AEN, 1997, p.15.

des rayons ionisants (Fig. 33). 169 noms de 15 pays différents étaient initialement inscrits avant que la liste ne se rallonge. En 1960, il y en avait 360⁹⁵.

2.3.1 Mesures du rayonnement

Les radionucléides qui se désintègrent libèrent une énergie qui affecte les tissus. Différentes mesures sont effectuées pour évaluer l'impact de cette énergie⁹⁶. Ces mesures ont permis d'établir des limites d'irradiation annuelles⁹⁷ se trouvant dans l'ORaP⁹⁸. La mesure la plus pertinente et la plus explicite dans l'expression du danger pour des utilisateurs ponctuels d'objets radioactifs est le débit de dose*.

C'est un appareil (un radiamètre) qui calcule la quantité de Sv reçue par un organisme sur un temps donné. Souvent, il s'agit de $\mu\text{Sv/h}$. Le débit de dose est très utilisé en radioprotection. Elle permet de se situer par rapport aux doses totales limites annuelles en plus de l'irradiation naturelle posées par la loi, soit 1 mSv⁹⁹ pour la population ne travaillant pas avec la radioactivité et 20 mSv pour les travailleurs utilisant des sources radioactives. L'utilisation du débit de dose en radioprotection est donc très utile. Par exemple, une montre avec des aiguilles luminescentes au radium avec un débit de dose de 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ au contact. Cela fait 0.0005 mSv/h, cette montre peut donc être portée 2000 heures¹⁰⁰ avant de dépasser le 1 mSv prescrit. Cependant, la philosophie derrière une norme n'est pas qu'une situation est favorable quand elle est en-dessous d'une valeur limite mais qu'elle est intolérable quand elle se trouve au-dessus. De ce fait, il est préférable de chercher à minimiser l'exposition et pas de simplement la réduire sous un seuil limite.

2.3.2 Effets sur la matière vivante

Les trois rayonnements α , β et γ n'ont pas les mêmes caractéristiques et réactions du fait de leur nature même. Ils n'auront non plus pas la même dangerosité s'ils sont à l'extérieur ou à l'intérieur du corps humain. La particule α étant la plus énergétique, elle est la plus dangereuse si elle est ingérée mais il est facile de s'en protéger. Les particules β sont moins énergétiques mais pénètrent mieux dans la matière et représentent surtout un danger lorsqu'elles sont ingérées. Les rayons γ traversent presque toutes les matières mais sont très peu énergétiques. L'action d'un rayonnement sur une cellule peut se découper en cinq étapes¹⁰¹ (Fig. 34):

⁹⁵ Zerbib, 1989, p.321.

⁹⁶ Voir l'Annexe 6 - Définitions des différentes doses, p.105.

⁹⁷ Voir l'Annexe 10 - Résumé des doses, p.120.

⁹⁸ Plus de détails sur les lois et les ordonnances au chapitre 3.2 Juridiction, p. 49 et à l'Annexe 8 - Extraits de la réglementation, p.108.

⁹⁹ Dans le cas des diagnostics et traitements des patients, aucune dose limite n'est établie car le bénéfice tiré d'un meilleur diagnostic est supérieur au risque éventuel que le patient développe un cancer dans une dizaine d'années.

¹⁰⁰ Il y a 8'766 heures dans une année.

¹⁰¹ PNUE, 1988, p.50.

1. Rayonnement

Les rayonnements ont une plus ou moins grande pénétration et perdent leur énergie par interaction électrique avec les électrons des atomes de la matière qu'elles traversent.

2. Effets électriques

Lors de la collision d'un rayonnement avec un atome, ce dernier perd un électron dans le dixième de billionième de seconde qui suit. Cet électron devient un ion négatif et l'atome un ion positif. Il s'agit du processus d'ionisation. L'électron libre peut ioniser d'autres atomes.

3. Transformations physiques et chimiques

Pendant le dixième de milliardième de seconde qui suit, l'atome et l'électron sont instables. Des réactions en chaînes se produisent alors dans leur structure les transformant en radicaux libres, des nouvelles molécules réactives.

4. Lésion de la molécule d'ADN

Ces nouvelles molécules vont réagir entre elles ou avec d'autres molécules dans le millionième de seconde suivant. Ces réactions engendrent des modifications dans la structure interne des cellules et altèrent l'ADN.

Les conséquences de ces modifications peuvent être différées dans le temps ou immédiates.

5.a Destruction de cellules

La cellule peut ne pas supporter les modifications engendrées trop rapidement et de façon trop intense. Elle meurt alors immédiatement. Les effets sont souvent visibles, comme des brûlures, des vomissements ou même la mort de l'organisme. Il s'agit d'effets déterministes.

5.b Transformation de cellules

La cellule se transforme mais reste viable. Les effets ne sont visibles que quelques jours ou plusieurs années plus tard. Ces cellules peuvent dégénérer et provoquer des cancers ou des effets héréditaires. Il s'agit d'effets stochastiques.

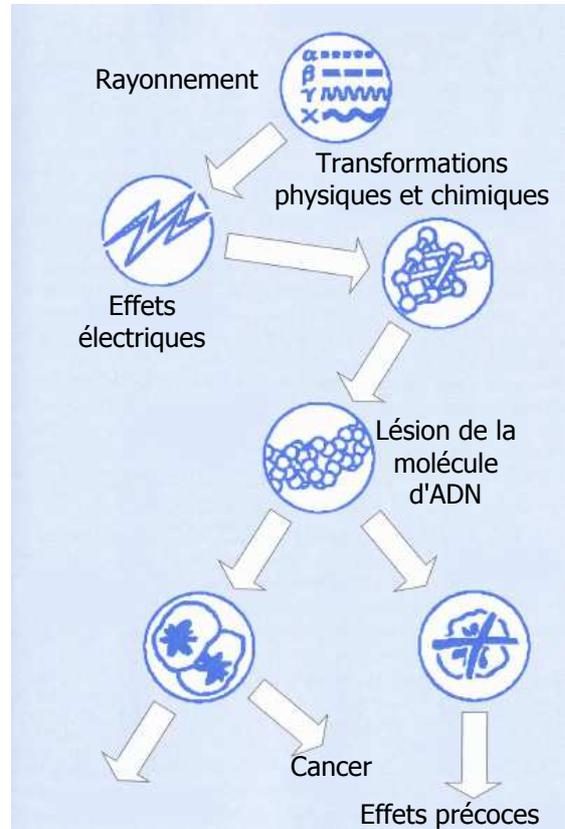


Fig. 34 : Action d'un rayonnement sur une cellule.
©AEN, 1997, p.57.

Effets déterministes et stochastiques

Chaque jour, plusieurs millions de cellules meurent et sont remplacées par d'autres. Ce processus reste naturel si elles meurent sous l'effet d'une faible dose de rayonnements ionisants. Elles sont simplement remplacées par des cellules neuves en quelques jours ou quelques semaines¹⁰². Cependant, si la dose est trop élevée, augmentant le nombre de cellules mortes, l'organisme n'arrive pas à les remplacer. Les effets sont donc immédiatement (ou presque) visibles et peuvent aller des brûlures de la peau jusqu'à la mort. Le minimum de radiations pour obtenir des effets immédiats, dits déterministes, ne sont pas identiques selon les organes. Cependant, une moyenne de 0.5 Sv a été établie pour l'ensemble du corps. Une fois ce seuil atteint, les premiers effets se font observer et s'aggravent à mesure que la dose augmente. Par exemple, « pour la peau, une dose locale de 3 à 8 Sv entraîne une rougeur passagère, de 7 à 10 Sv une cloque et au dessus de 10 Sv une nécrose¹⁰³ ». Le tableau ci-dessous (Tab. 3) donne l'échelle des symptômes lors d'une exposition à une très forte dose de rayonnements.

De 0.25 à 0.5 Sv	Modification possible de la formule hématologique, pas de lésions graves.
De 0.5 à 2 Sv	Vomissement chez 50 % des personnes concernées dans les premières 24 heures, légère fatigue, avec modification de la formule hématologique, pas d'autres symptômes.
De 2 à 4.5 Sv	Vomissements chez plus de 50 % des personnes concernées peu après l'irradiation, impression d'avoir une gueule de bois pendant les premiers jours, puis période latente sans symptômes d'une à trois semaines avec modification de la formule hématologique. Puis l'apparition d'une maladie hématopoïétiques, des muqueuses et du périoste, s'accompagnant de fièvre et de saignements, entre autres, etc. Chute des cheveux dans 50 % des cas.
4.5 Sv	Décès dans 50 % des cas dans les trente jours en l'absence de traitement médical (dose semi-létale).
A partir de 10 Sv	Dose létale, décès dans les deux semaines qui suivent l'irradiation.
Plusieurs dizaines de 10 Sv	Lésion au cerveau et du système nerveux, décès dans les heures ou les jours qui suivent l'irradiation.

Tab. 3 : Lésions précoces consécutives à une irradiation globale aiguë ©SUVA, 2008

Cependant, il est important de noter que les effets déterministes sont également bénéfiques. La radiothérapie utilise en effet de très fortes doses pour détruire les cellules cancéreuses. Les rayonnements sont contrôlés et focalisés sur la zone cancéreuse pour minimiser la dose reçue par les tissus sains.

Les effets stochastiques sont moins compris que les effets déterministes. Les doses qui n'engendrent pas des effets visibles immédiatement sont appelés faibles doses. Leurs effets sont encore mal compris et plus ces doses sont faibles moins ils sont prévisibles. Quand une cellule est irradiée sans être détruite, son ADN a une probabilité d'avoir été modifié. Cette cellule peut alors dégénérer des années plus tard et engendrer un cancer ou des anomalies qui peuvent être héréditaires. Au contraire d'une brûlure par une forte irradiation, il n'est pas possible de certifier qu'un cancer développé est dû à une exposition aux faibles

¹⁰² AEN, 1997, p.52-53.

¹⁰³ IN2P3, p. 30 [En ligne].

doses durant la vie d'un être humain. « Comme c'est la probabilité et non la gravité de la conséquence qui dépend de la dose, les effets sont appelés effets stochastiques, ce qui implique qu'ils sont de nature aléatoire ou statistique, tardifs ou différés¹⁰⁴ ». Les chercheurs n'ont pas certifié un seuil minimum où les rayonnements seraient totalement inoffensifs. Plus les doses sont minimales, plus la probabilité est faible qu'elles altèrent l'ADN, donc plus c'est difficile à observer.

Irradiation externe et interne

Deux types d'irradiation sont distingués. Lorsque la source se situe à l'extérieur du corps, il s'agit d'une irradiation externe. Les rayonnements doivent traverser la barrière naturelle du corps, la peau, pour atteindre les organes. Il peut s'agir d'une source solide ou liquide qui se trouve plus ou moins éloignée de l'organisme voire en contact direct de l'épiderme (il s'agit dans ce cas d'une contamination*) ou d'un gaz radioactif dans l'air. Les rayonnements cosmiques et terrestres sont considérés comme des irradiations externes. Les rayonnements α et β ne traversent pas le corps au contraire des rayons γ .

Le deuxième type d'irradiation est interne lorsque la source se trouve à l'intérieur de l'organisme par inhalation dans le cas où l'air est contaminé, par ingestion si la nourriture ou la boisson est contaminée ou par absorption s'il y a eu un contact direct prolongé. Le danger lié à l'irradiation interne est qu'il n'y a aucune protection entre le radionucléide et l'organe. Les substances radioactives ingérées réagissent selon les radionucléides qui les composent. Par exemple l'iode-131 se fixe sur la thyroïde comme l'élément iode. Le radionucléide est donc stocké dans un organe ou un tissu qu'il irradie directement pendant plusieurs jours ou plusieurs années selon sa demi-vie. Les effets sont donc plus conséquents. Il est difficile voire impossible de retirer un radioélément incorporé¹⁰⁵. Pour le danger de l'irradiation interne, les radionucléides¹⁰⁶ sont classés en quatre catégories selon leur radiotoxicité qui est déterminée selon le type de rayonnements dégagés et leur capacité à s'intégrer dans les tissus ou organes plus ou moins radiosensibles.

En cas d'ingestion d'une substance, il est possible d'estimer la dose ingérée ou inhalée à condition de connaître le radionucléide et son activité¹⁰⁷.

Groupe 1 Très forte radiotoxicité	²²⁷ Ac, ²⁴¹Am , ²⁵² Cf, ²⁴² Cm, ²⁴⁴ Cm, ²³⁷ Np, ²³¹ Pa, ²¹⁰ Pb, ²¹⁰ Po, ²³⁶ Pu, ²³⁹ Pu, ²²⁶Ra , ²²⁶ Th, ²³⁰ Th, ²³³ U
Groupe 2 Forte radiotoxicité	¹¹⁰ Ag ^m , ¹⁰⁹ Cd, ¹⁴⁴ Ce, ⁶⁰ Co, ¹³⁴ Cs, ¹⁵² Eu, ¹²⁵ I, ¹³¹ I, ¹⁰⁶ Ru, ¹⁵¹ Sm, ⁹⁰Sr , nat.Th , ²³²Th
Groupe 3 Radiotoxicité modérée	¹⁴¹ Ce, ¹⁴³ Ce, ³⁶ Cl, ⁵⁷ Co, ¹³⁷ Cs, ¹⁶⁹ Er, ^{152m} Eu, ⁵⁵ Fe, ⁵⁹ Fe, ²⁰³ Hg, ¹⁹² Ir, ¹⁴⁰ La, ⁵⁴ Mn, ⁹⁹ Mo, ²² Na, ²⁴ Na, ⁶³ Ni, ³² P, ¹⁴⁷ Pm, ¹⁴⁹ Pm, ¹⁹¹ Pt, ²²² Ra, ⁶⁶ Rb, ¹⁰³ Ru, ¹²⁴ Sb, ⁴⁶ Sc, ⁷⁵ Se, ¹¹³ Sn, ¹⁶⁰ Tb, ²³⁴Th , ²⁰⁴ Tl, ¹⁷⁰ Tm, ⁴⁸ V, ¹⁶⁹ Yb, ⁶⁵ Zn
Groupe 4 Faible radiotoxicité	⁷ Be, ⁵¹ Cr, ⁶⁴ Cu, ³H , ¹²⁹ I, ^{113m} In, ⁸⁵ Kr, ²²⁰ Rn, ³⁵ S, ³¹ Si, ^{99m} Tc, nat.U , ²³⁵ U, ¹³³ Xe

Tab. 4 : Les radioéléments susceptibles d'être retrouvés dans les objets patrimoniaux sont en gras. Dans le groupe 1 se trouve que des émetteurs α alors que les autres groupes recensent des émetteurs β et γ . ©IN2P3/CIPR

¹⁰⁴ AEN, 1997, p.55

¹⁰⁵ Suva, 2008, p.19.

¹⁰⁶ Les radionucléides rencontrés dans les objets patrimoniaux sont détaillés à l'Annexe 2 - Fiches techniques des radionucléides, p.93.

¹⁰⁷ Voir l'Annexe 7 - Formules, p.107.

2.3.3 Les moyens de protection

Finalement, tout est une question de dose. Soit la dose est élevée et est prise en une fois, soit elle est faible mais est prise sur une longue durée. Pour se protéger des irradiations, il y a trois modes de protection face à une source radioactive.

Le temps

Moins de temps nous sommes exposés à une source, mieux nous nous portons. Les effets stochastiques étant évalués par des probabilités, moins un organisme entre en contact avec une source de rayonnements, moins il a de chance de contracter ces effets. Le travail avec des sources radioactives nécessite une certaine éthique qui stipule notamment que toute irradiation inutile doit être évitée. C'est particulièrement le cas en médecine où les patients sont exposés à de grandes doses et chaque examen doit donc être justifié.

La distance

Les particules chargées ne se déplacent pas très loin dans l'air. 5 cm peuvent arrêter les particules α alors que les particules β sont un peu plus pénétrantes et ont besoin de 3 m d'air pour se stopper. Les rayons γ ne peuvent qu'être atténués avec une matière très dense comme le plomb. Cependant, ces rayonnements sont émis dans toutes les directions et par conséquence « *la probabilité pour qu'un gamma se dirige vers une cible diminue rapidement avec la distance¹⁰⁸* » (Fig. 35). De ceci, il a pu être constaté que l'exposition diminue par le carré de la distance¹⁰⁹. Ce qui signifie que pour un débit de dose situé à un mètre, ce dernier est divisé par quatre si la source est éloignée de deux mètres, par cent à dix mètres, par quatre cent à vingt mètres, etc. L'utilisation de pinces ou d'actionnement à distance sont des moyens très utilisés en médecine et qui baissent considérablement le débit de dose¹¹⁰.

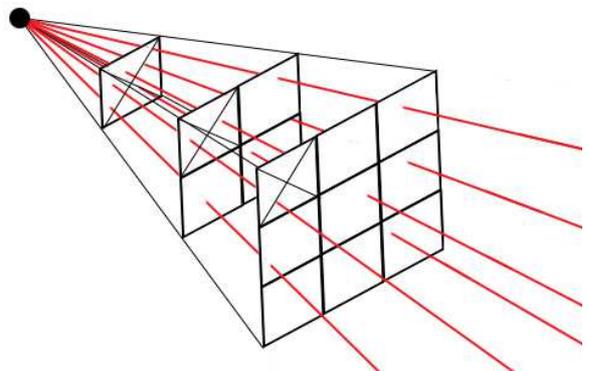


Fig. 35 : Effet d'angle solide. Plus on est proche de la source, plus on a de chances d'être exposé à un rayon. Au contraire, plus on s'éloigne, moins on court de risque d'être exposé. ©HECR Arc, 2012

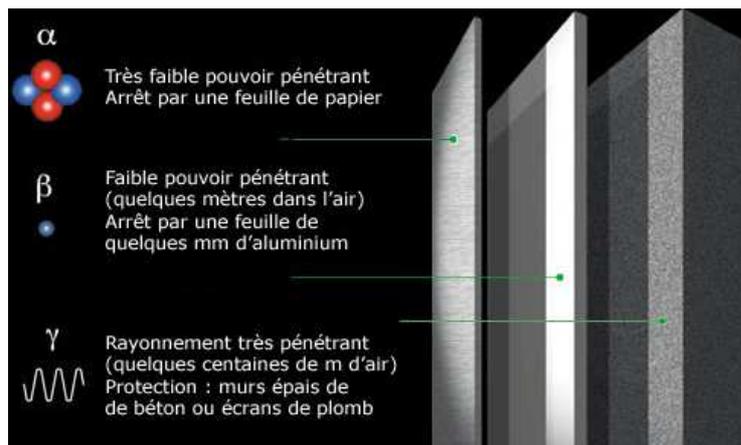
¹⁰⁸ La radioactivité.com [En ligne].

¹⁰⁹ Voir l'Annexe 7 - Formules, p.107.

¹¹⁰ AEN, 1997, p.79.

Le blindage

Les rayonnements ont des degrés de pénétration différents. Les rayons α peuvent être arrêtés par une feuille de papier, les rayons β par quelques millimètres d'aluminium et les rayons γ ne peuvent être atténués que par une dizaine de centimètres de plomb ou un épais mur de béton (Fig. 36). Ce blindage peut être installé sur la source même, qui permet de focaliser le rayonnement dans une seule direction (c'est notamment le cas en médecine) et éviter d'irradier tout le reste de la place, ou il peut s'agir d'écran de protection derrière lesquels les travailleurs se placent. La protection personnelle des travailleurs pour



limiter l'irradiation externe mais surtout éviter toute irradiation interne peut constituer en des combinaisons pour stopper les α et β ou des renforcements en plomb pour les γ . Le port de gants est évidemment obligatoire lors de manipulation de sources¹¹¹.

Fig. 36 : Les écrans de blindage des différents rayonnements.
©IN2P3

¹¹¹ En médecine, il existe également des lunettes à verres plombés, des bonnets plombés et des blouses plombées.

3 LA RADIOACTIVITE ET LES MUSEES

3.1 LES MUSEES DE SUISSE

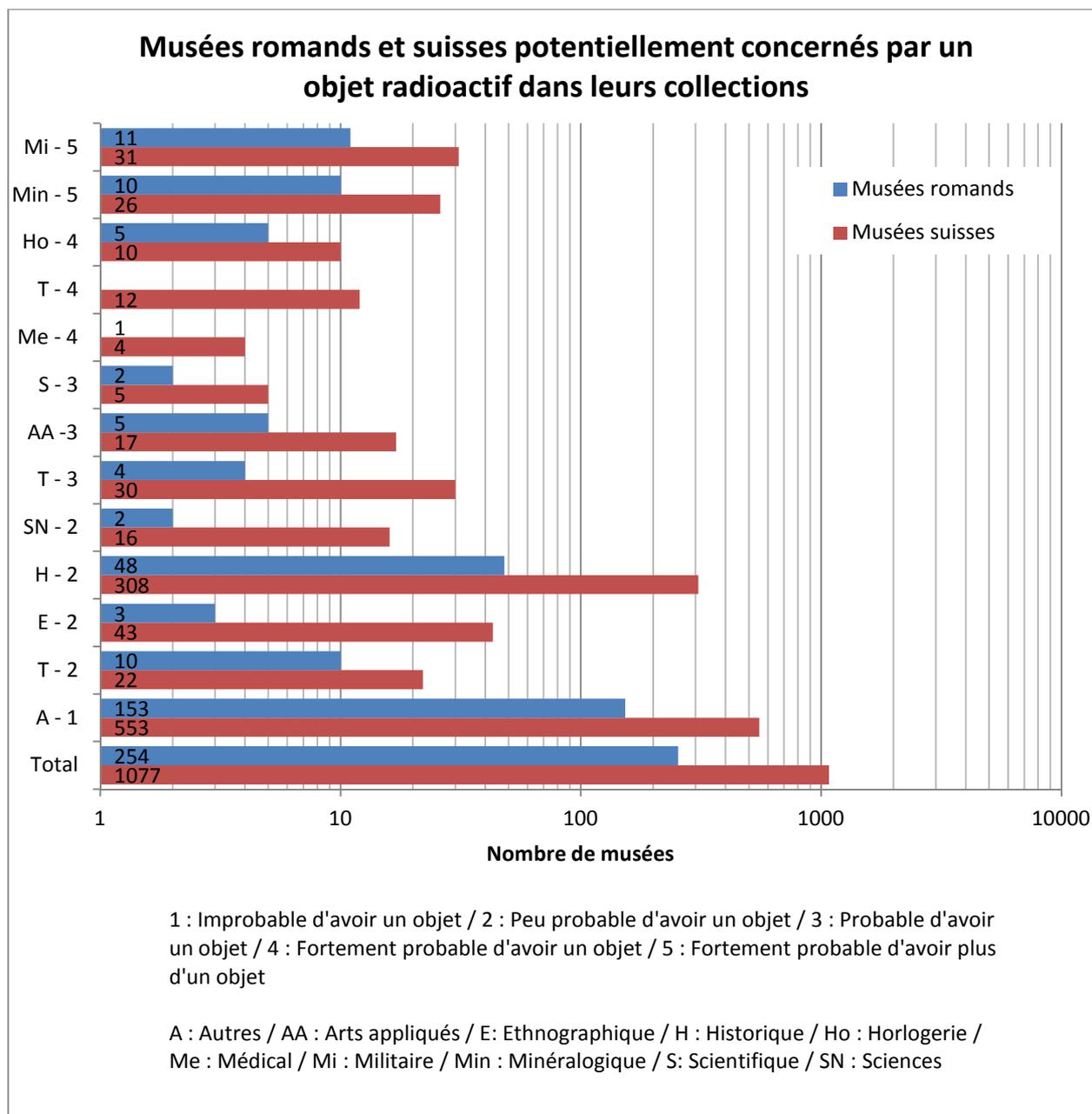
3.1.1 Collections ciblées en Suisse

Il est difficile d'estimer combien de musées en Suisse sont concernés par la problématique de la radioactivité dans leurs collections. Les objets radioactifs ne se collectionnent pas en tant que tels mais parce qu'ils font partie d'une suite chronologique ou parce qu'ils sont insolites et parfois anecdotiques. Ainsi, il est possible de considérer deux types de collections qui peuvent abriter ces objets : les collections ciblées techniques, scientifiques et horlogères où la matière radioactive peut se retrouver sur des pièces précises et souvent connues; les collections historiques et ethnographiques où la matière radioactive n'est pas toujours soupçonnée. Certaines collections sont plus susceptibles que d'autres de contenir ces objets. Afin de donner une estimation de musées potentiellement concernés par ce problème, une échelle arbitraire de 1 à 5 a été créée selon différents types de collections.

Niveau d'évaluation	Collections concernées	Remarques
1 : Improbable d'avoir un objet	Autres	Il s'agit des musées dont les thèmes ont extrêmement peu de chance de contenir des objets radioactifs, comme les beaux-arts.
2 : Peu probable d'avoir un objet	Ethnographique Historique Science naturelle Technique	Les objets radioactifs sont caractéristiques d'une époque et de sa société. Il peut s'agir d'objets usuels comme d'objets plus scientifiques ou techniques. Il est donc possible d'en trouver dans ces collections si le contexte et la période étudiés correspondent.
3 : Probable d'avoir au moins un objet	Arts appliqués	Il est possible de trouver des céramiques avec des glaçures contenant de l'uranium ou des verres d'urane.
	Scientifique	Il est possible de trouver des instruments d'expérimentation ou de mesures contenant une matière radioactive.
	Technique	Il est possible de trouver des instruments électriques et de mesures contenant des matières radioactives.
4 : Fortement probable d'avoir un objet	Horlogerie	Il est tout à fait probable de trouver au moins un cadran horloger avec une matière luminescente au radium ou au tritium.
	Médicale	Les collections ciblées uniquement sur l'histoire médicale ont de fortes chances de posséder des aiguilles ou des tubes au radium, ou tout autre cataplasme avec des matières radioactives.
	Véhicules	Les collections de véhicules ont de fortes chances de posséder un véhicule avec des cadrans luminescents au radium, surtout s'il s'agit d'une collection aéronautique.

5 : Fortement probable d'avoir plus d'un objet	Militaire	Il est pratiquement sûr de trouver dans une collection militaire du matériel de la Seconde Guerre Mondiale, comme des véhicules, des lampes et des balises contenant des matières radioactives ¹¹² .
	Minéralogique	Il est pratiquement sûr de trouver des minerais d'uranium dans ce type de collection.

Les musées de Suisse¹¹³ ont ensuite été évalués selon cette échelle comme le montre le diagramme ci-dessous.



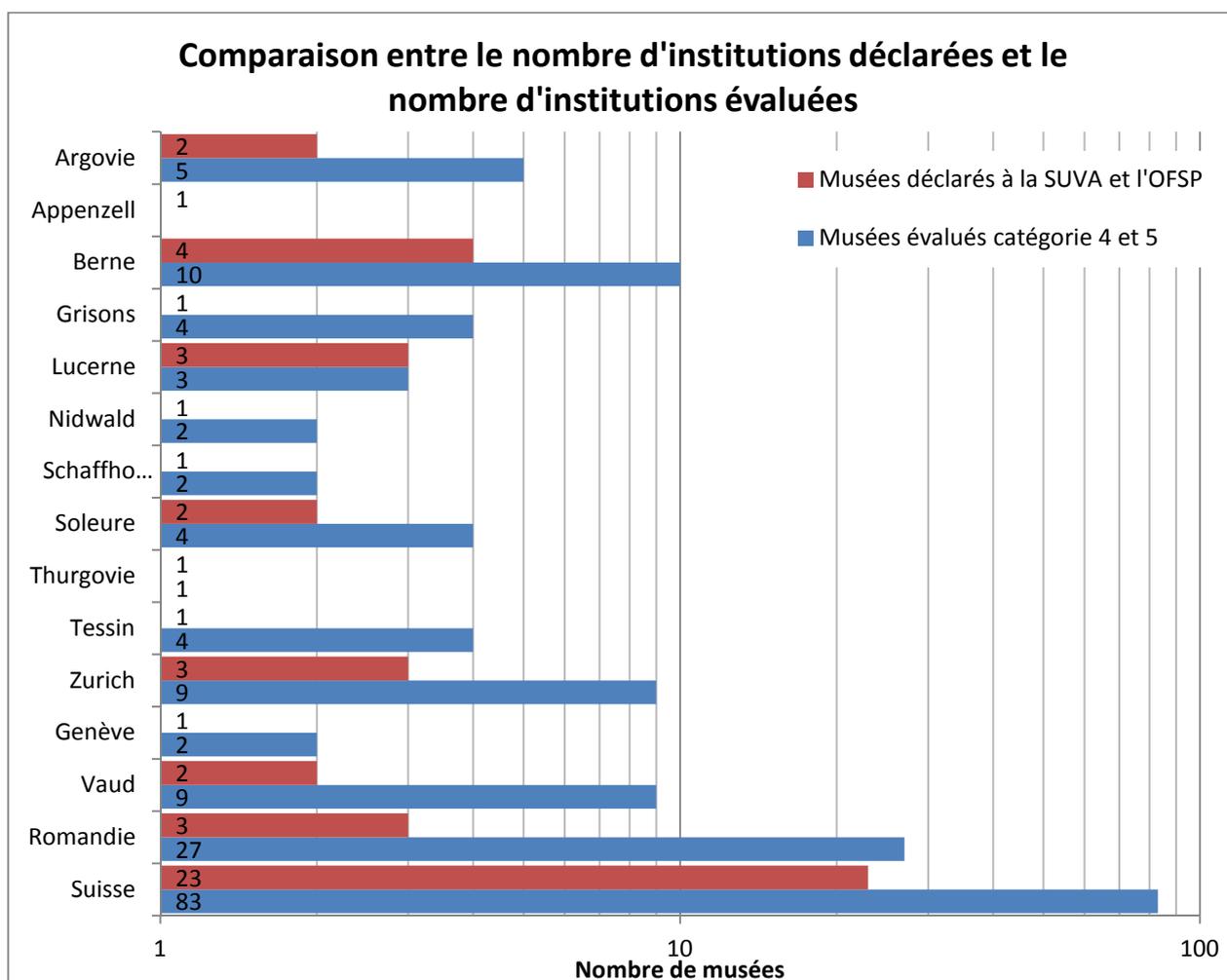
Il a pu être constaté que sur 1077 institutions muséales en Suisse, environ la moitié (554) peut éventuellement posséder au moins un objet radioactif. En suisse romande, sur 254 musées, 101 sont

¹¹² Zürcher, 2009.

¹¹³ Cette étude a été réalisée à partir du site internet museums.ch.

susceptibles de posséder au moins un objet radioactif. Cependant, les catégories 2 et 3 ont une probabilité moindre par rapport aux catégories 4 et 5. Il est possible dans ce cas d'estimer le nombre potentiel de musées ayant une grande probabilité de posséder ces objets à 83 sur l'ensemble de la Suisse et à 27 sur la Suisse Romande.

Pour des raisons de sécurité, toute institution doit être déclarée auprès de l'OFSP et de la SUVA lorsqu'elle possède du matériel radioactif et que les doses limites sont dépassées¹¹⁴. Cela peut être des instruments de mesures utilisés dans le domaine de la conservation-restauration ou des objets de collections. La SUVA nous a communiqué le nombre d'institutions muséales déclarés comme recelant du matériel radioactif.



Sur toute la Suisse, 23 institutions sont déclarées tandis qu'il est estimé que 83 sont fortement susceptibles de posséder des objets radioactifs. Il s'agit essentiellement de collections se trouvant dans des cantons suisses-allemands, puisque seulement 3 d'entre elles sont en Suisse Romande. Il est probable que certaines institutions possédant des objets radioactifs ignorent l'existence de ces matières ou n'ont pas connaissance des actions à entreprendre pour leur gestion.

¹¹⁴ Plus de détails au chapitre 3.2.3 Définition légale de la radioactivité et autorisation, p.50.

3.2 JURIDICTION

3.2.1 Textes de réglementation

Il y a plusieurs textes qui réglementent la manipulation des matières radioactives dans plusieurs situations et contextes différents. Nous n'exposerons que ceux qui concernent les institutions muséales ou les collections. De ce fait, il y a quatre textes importants¹¹⁵ :

- La loi sur la radioprotection (LRaP) du 22 mars 1991 et l'ordonnance sur la radioprotection (ORaP) du 22 juin 1994

Ces deux textes représentent la base de la radioprotection pour tous les domaines (médical, industriel, recherche, etc.). Chaque domaine comprend par la suite des textes plus précis. Pour le milieu muséal, toutes les règles de radioprotection se trouvent dans ces deux textes-ci. Il est à noter que certaines valeurs contenues actuellement dans l'ORaP vont être remplacées en 2014, lors du prochain remaniement de l'ordonnance.

- L'ordonnance relative au transport des marchandises dangereuses par route (SDR) du 29 novembre 2002 et L'accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR) du 1^{er} janvier 2011.

Ces textes-ci sont complémentaires de l'ORaP en matière de transport des marchandises dangereuses. Ils légifèrent sur les colis et les protocoles d'envoi.

Chacun de ces textes seront détaillés par catégorie d'utilisation dans les chapitres suivants.

3.2.2 Institutions de radioprotection

En Suisse plusieurs institutions ont différents mandats concernant la radioactivité. Seules celles pouvant intervenir dans le milieu du patrimoine sont citées et décrites¹¹⁶.

Office fédéral de la santé publique (OFSP)

L'OFSP a plusieurs domaines de compétences. En radioactivité et rayonnement, cet office a deux objectifs : contrôler la radioactivité environnementale ainsi que la surveillance et le contrôle des autorisations pour les lieux publics et médicaux. Il est également chargé de proposer des modifications si nécessaire aux ordonnances et aux lois concernant la radioprotection.

¹¹⁵ Ces textes étant très volumineux et remis à jour régulièrement, il n'y a pas de copie dans ce travail. Nous vous conseillons de vous référer aux textes actuels disponibles en ligne aux adresses indiqués en bibliographie. Cependant pour une meilleure compréhension, à l'Annexe 8 - Extraits de la réglementation, p.108, se trouvent des extraits ciblés.

¹¹⁶ Pour plus d'informations sur chaque institution, nous vous conseillons de consulter leur site en ligne dont les adresses se trouvent à l'Annexe 1 - Contacts, p.91.

Caisse National Suisse d'Accidents (SUVA)

La SUVA a trois activités principales : la prévention, l'assurance et la réadaptation pour les travailleurs. Elle gère les risques professionnels et la gestion de la radioactivité en fait partie. Elle est mandatée par la Confédération pour être un organe de surveillance dans les entreprises. Elle est donc habilitée à dispenser des formations, à contrôler les entreprises et à disposer d'un service de dosimétrie.

Institut Paul Scherrer (PSI)

Il s'agit d'un centre de recherche pour les sciences naturelles et les sciences de l'ingénierie. Sa compétence en radioactivité est l'étude du stockage des déchets radioactifs. Chaque année, il organise en collaboration avec l'OFSP une collecte de déchets radioactifs auprès des centres de médecine, de recherche et d'industrie. Ils sont emballés au PSI avant d'être envoyé à la NAGRA pour y être stockés. Cet insitut est également qualifié pour offrir des formations dans le domaine de la radioprotection.

Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs (NAGRA)

La NAGRA s'occupe de stocker les déchets radioactifs qu'ils proviennent de l'industrie nucléaire ou de particuliers. Elle a pour rôle de réceptionner les déchets radioactifs emballés par le PSI et de les stocker dans des dépôts géologiques. Cette société est également chargée de réaliser des études géologiques par la Confédération.

Institut de radiophysique (IRA)

Cet institut fait partie du département de radiologie médicale du CHUV (Centre Hospitalier Universitaire Vaudois). Deux de ses domaines d'activités sont la radiophysique médicale et la protection radiologique. Dans ce deuxième domaine, l'IRA est mandaté par l'OFSP pour surveiller la radioactivité de l'environnement. L'IRA possède également un service de dosimétrie. L'IRA ne travaille que sous mandat de l'OFSP pour des travaux en-dehors du CHUV.

Centre de compétences Radioprotection

Ce laboratoire se trouve à Spiez et fait partie de l'office fédéral de la protection de la population (OFPP). Son domaine d'activité est la gestion des effets des risques et menaces atomiques et il travaille donc avec l'armée. Dans le domaine de la radioactivité, le service radioprotection s'occupe essentiellement du matériel militaire encore en utilisation ou non. Il est également mandaté par l'OFSP pour la surveillance de la radioactivité environnementale.

3.2.3 Définition légale de la radioactivité et autorisation

La radioactivité se trouve à l'état naturel et est constamment présente en tant que bruit de fond. Chaque année, la dose annuelle moyenne reçue par la population suisse est de 4 mSv¹¹⁷. La réglementation en vigueur légifère sur la quantité de dose annuelle qu'il est possible de recevoir en plus de celle reçue

¹¹⁷ Voir Chapitre 2.1 Sources radioactives, p.33.

naturellement¹¹⁸. Les travailleurs spécialisés en radioactivité ont l'autorisation de recevoir 20 mSv par an et sont suivis par des médecins, alors que pour la population normale qui ne subit pas de contrôle et qui n'a pas à travailler avec des éléments radioactifs, cette limite s'élève à 1 mSv¹¹⁹. Le personnel de musée, ne rentrant pas dans la première catégorie, ne peut donc être exposé qu'à 1 mSv par an.

Selon l'Art.69 de l'ORaP, les lieux où sont manipulées des matières radioactives sont classés en quatre catégories selon l'activité totale des sources manipulées.

- Laboratoire A : l'activité est de 1 fois la limite d'autorisation (LA) à la limite supérieure fixée par les autorités compétentes
- Laboratoire B : L'activité est entre 1 et 10'000 fois la LA
- Laboratoire C : L'activité est entre 1 et 100 fois la LA

Pour obtenir les autorisations, chaque laboratoire doit disposer d'équipements spéciaux et de protocoles précis. Les laboratoires où sont manipulées des sources radioactives mais dont l'activité est inférieure à la limite d'autorisation sont considérés comme des laboratoires "normaux", ce qui est le cas des musées par exemple.

Les matières radioactives sont définies par l'Art.2 de la LRaP et l'Art.1 et l'Art.2 de l'ORaP¹²⁰. Une matière radioactive est définie selon son radionucléide et son activité. Deux limites ont été posées en se basant sur l'activité des radionucléides¹²¹ :

- La limite d'exemption (LE)
Pour chaque radionucléide, une activité est définie. Si la matière soupçonnée est au-dessus de cette limite, elle est considérée comme radioactive et sa manipulation est réglementée par la LRaP et l'ORaP. En-dessous de cette limite, la matière n'est pas considérée comme radioactive et n'entre pas dans la réglementation. Elle est alors dite exemptée.
- La limite d'autorisation (LA) :
Si une matière (ou plusieurs) dépasse l'activité de la L_a fixée pour chaque radionucléide, il est alors nécessaire de détenir une autorisation de l'OFSP pour la conserver. Si elle se trouve en-dessous de la LA mais au-dessus de la LE, elle est dite exceptée.

Si les matières radioactives sont exemptées, aucune autorisation n'est nécessaire pour les manipuler. Si elles sont exceptées ou si leur activité dépasse la LA, seule une personne formée aux principes de radioprotection peut les manipuler tel qu'il est mentionné à l'art.10 de l'ORaP. Ces formations doivent correspondre à l'activité et aux responsabilités du travail. Ces formations sont disponibles auprès de la

¹¹⁸ Voir l'Annexe 10 - Résumé des doses, p.120.

¹¹⁹ Une exception est faite pour les patients médicaux qui subissent des diagnostics ou des traitements par rayonnements. Il est considéré que le gain qu'apportent ces méthodes est largement supérieur au risque qu'elles induisent.

¹²⁰ Voir l'Annexe 8 - Bases légales de la définition, p.108.

¹²¹ Annexe 3 de l'ORaP, colonne 9 et 10.

SUVA, du PSI et de l'IRA¹²². Certains objets spécifiques, comme les montres luminescentes, sont exemptés. Ceci est dû au fait que les produits de consommation ne nécessitent d'autorisation que pour les fabricants et non pour les utilisateurs des objets finaux. Cependant, pour des raisons de sécurité, nous conseillons de traiter ces objets comme n'importe quel autre objet radioactif.

3.3 PROTOCOLES DE COMPORTEMENT

D'une manière générale, si une institution possède des objets radioactifs dans ses collections, il est toujours préférable de les déclarer auprès de l'OFSP, de la SUVA¹²³. Dans le cas de matériel historique de l'armée, il est nécessaire de posséder une autorisation de l'OFSP. M. Markus Zürcher du Centre de compétences Radioprotection au laboratoire de Spiez est le répondant dans cette situation¹²⁴. Cependant, certaines actions peuvent être entreprises au sein du musée.

3.3.1 Identification visuelle

Sans appareil de mesure, il est impossible de certifier la présence d'une substance radioactive. Cependant, certains aspects historiques ou indications sur l'objet peuvent donner des indices et permettre d'adopter un comportement adéquat avant la confirmation par analyse.

Les chemins de décisions ci-dessous donnent des pistes d'identification des substances radioactives dans les objets muséaux les plus souvent rencontrés et caractéristiques¹²⁵. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive.

¹²² Les formations homologuées par l'OFSP se trouvent à l'adresse suivante :

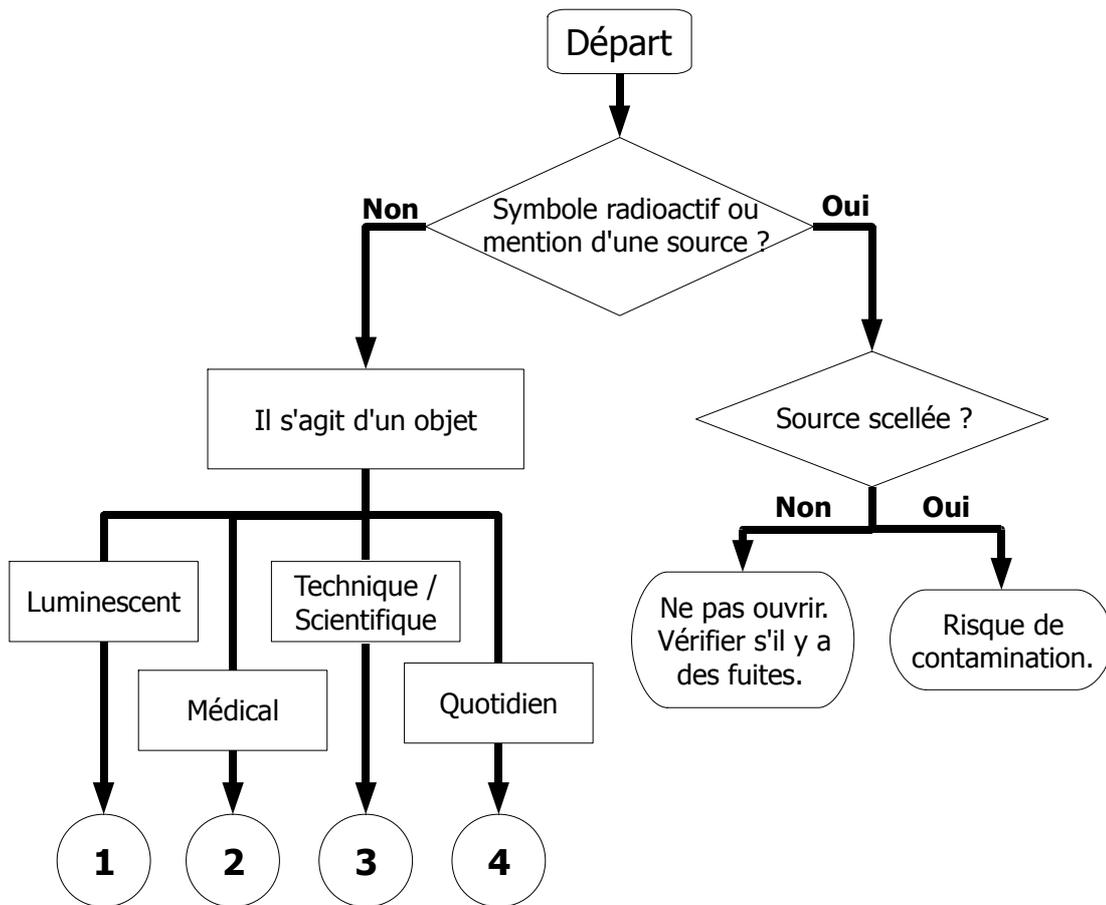
<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/10219/10418/index.html?lang=fr>

¹²³ L'une ou l'autre organisation peut être prévenue selon les contacts déjà établis. La plus compétente prend le relais si nécessaire. Elles travaillent en étroite collaboration.

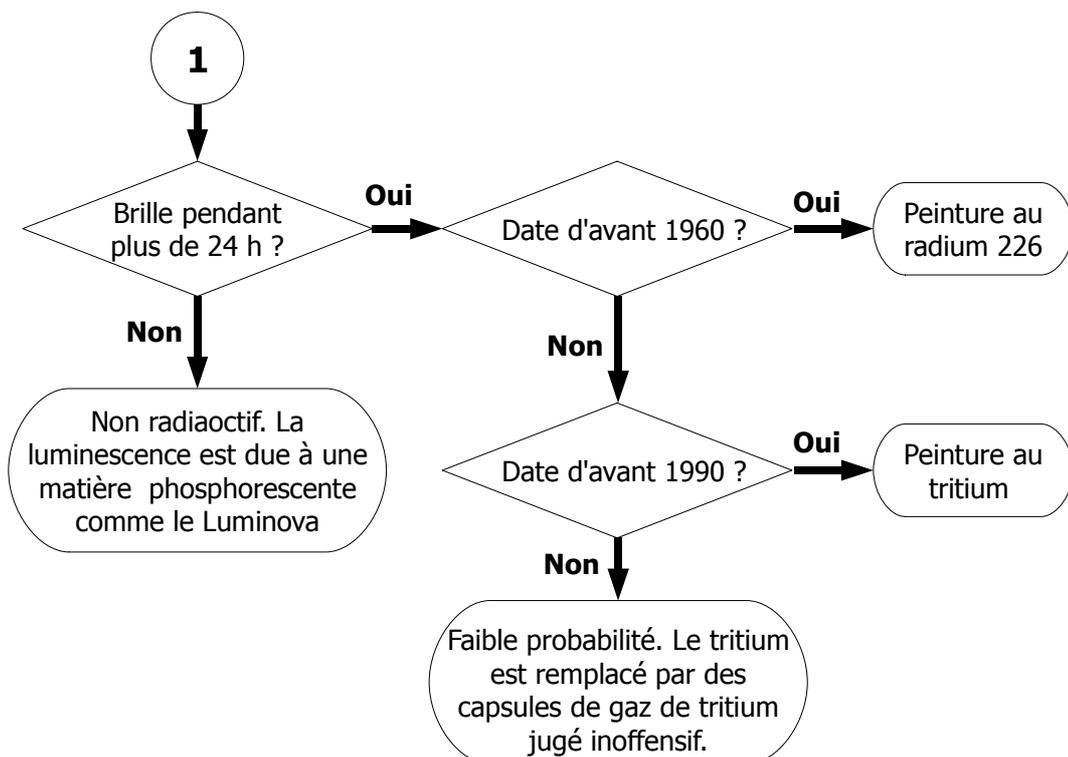
¹²⁴ Les documents législatifs relatifs au matériel militaire se trouvent à l'Annexe 9 - Directives DDP, p.118.

¹²⁵ Plus d'informations sur ces différents objets au chapitre 1.2 Les objets radioactifs, p.21.

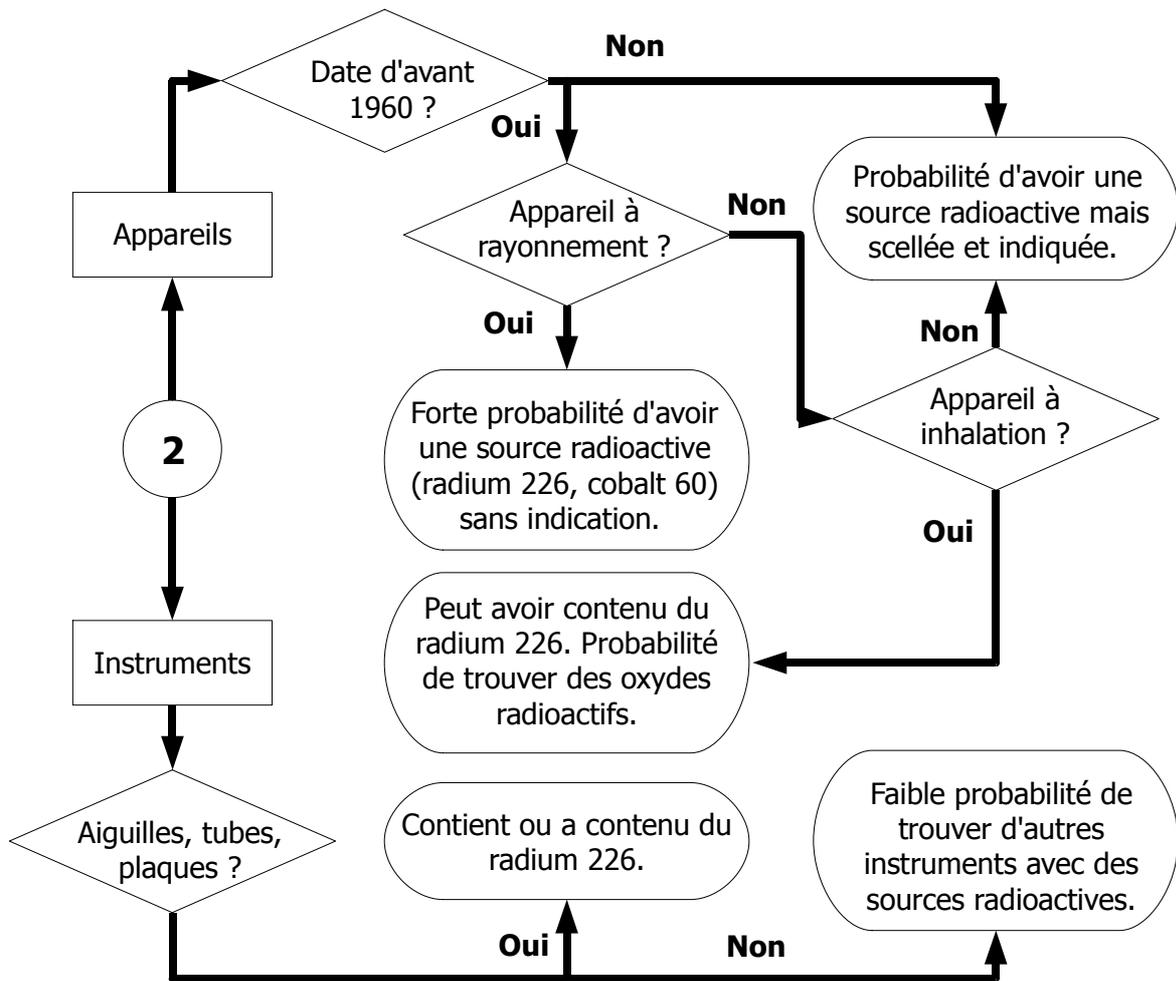
Chemin de décisions pour l'identification des objets radioactifs muséaux



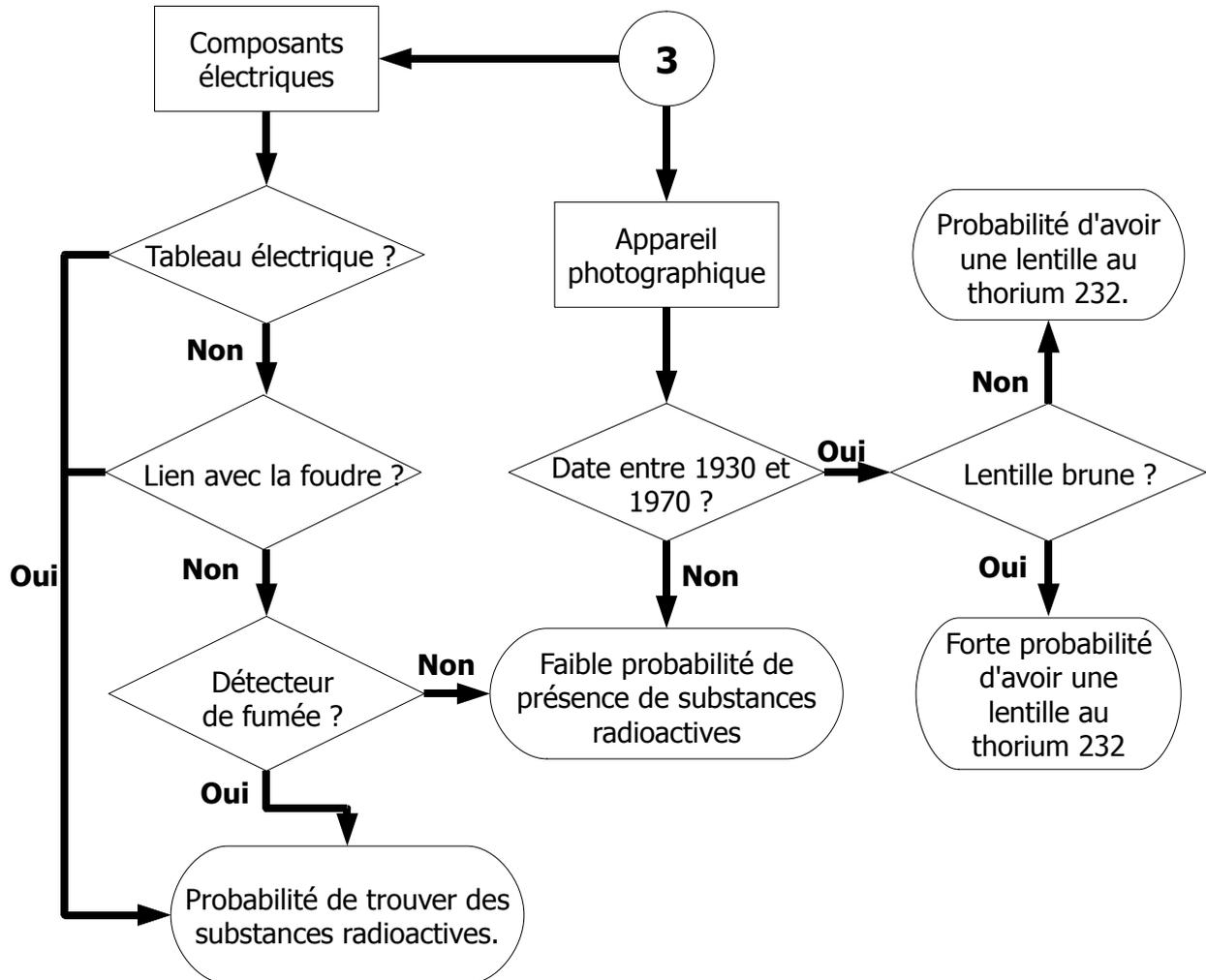
Chemin de décisions pour l'identification des peintures radioactives



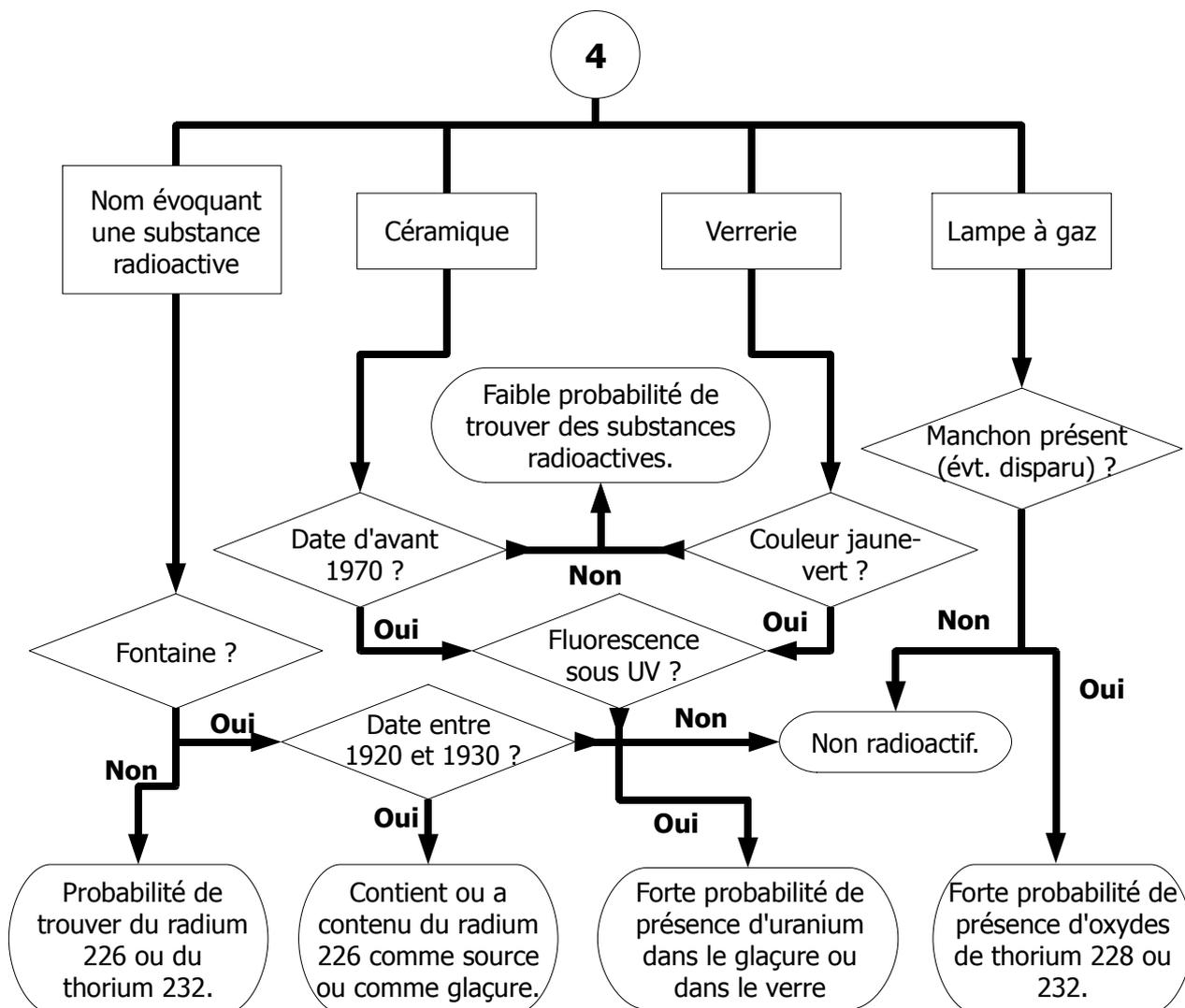
Chemin de décisions pour l'identification du matériel médical radioactif



Chemin de décisions pour l'identification des appareils techniques avec des substances radioactives



Chemin de décisions pour l'identification des objets usuels



3.3.2 Identification analytique

Il existe d'autres types d'appareils mais il s'agit ici des plus utilisés et pratiques dans le milieu muséal. Les mesures réalisées sur le terrain par le personnel de musée permettent une bonne approche pour une première identification et évaluation. Cependant, aucune mesure réalisée par un non spécialiste ne peut être reconnue et utilisée pour des études officielles ou auprès d'organisme comme l'OFSP ou la SUVA.

- Compteur Geiger-Müller

Il s'agit peut-être de l'appareil le plus connu du grand public. Le compteur Geiger-Müller (ou compteur GM) (Fig. 37) est un détecteur à remplissage gazeux et est sensible aux rayonnements α , β et γ . Il ne nécessite pas de prélèvement d'échantillon, il suffit d'approcher la sonde de l'objet à évaluer. Le principe de fonctionnement est simple. Deux électrodes sont montées à des potentiels



Fig. 37 : Compteur Geiger-Müller ©HECR Arc, 2012

électriques différents dans une enceinte gazeuse, souvent un gaz rare comme l'argon ou l'hélium. Quand un rayonnement traverse l'enceinte, il va ioniser le gaz et le rendre conducteur pendant un très bref instant. Chaque pulsion électrique est comptabilisée par l'appareil qui affiche des coups par secondes (CPS*). Cependant, le compteur GM est rapidement saturé si le flux est de plus de 10^3 coups/seconde. De ce fait il ne s'agit pas d'un appareil très précis mais permet des comparaisons entre des objets semblables si les mesures sont reproductibles. Cet appareil permet la détection d'un rayonnement sans pour autant définir lequel ni identifier le radionucléide¹²⁶.

- Radiamètre

Un radiamètre (Fig. 38) est également un détecteur à remplissage gazeux. Il est sensible aux rayonnements α , β et γ . Il ne nécessite pas de prélèvement d'échantillon, il suffit d'approcher la sonde de l'objet à évaluer. Le principe de fonctionnement est similaire au précédent appareil. Cependant au lieu de



Fig. 38 : Radiamètre ©HECR Arc, 2012

comptabiliser le nombre de rayonnements, l'appareil affiche l'énergie moyenne qu'ils ont cédée lors de leur interaction avec le gaz. Il affiche alors des mSv ou des μ Sv. Cette donnée est très intéressante car elle permet d'évaluer l'irradiation externe. Des sondes plus spécifiques (comme

¹²⁶ Lyoussi, 2010, p.65 et 79.

une sonde β) permet de caractériser les rayonnements. Autrement, l'appareil ne délivre pas d'information sur la nature du radionucléide ni sur le type de rayonnement dégagé¹²⁷.

- Spectroscopie gamma

Il s'agit d'une analyse qualitative et quantitative. Elle permet l'identification des radionucléides et peut donner leur activité. Elle nécessite le prélèvement d'échantillons ou la mesure de petits objets mais n'est pas destructive. L'appareil détecte les rayonnements γ qui accompagnent très souvent les désintégrations α ou β et mesure leur énergie. Le pic de ces énergies constitue un spectre. Chaque radionucléide possède un spectre d'énergie différent les identifiant. Cependant, certains radionucléides n'émettent pas de rayonnement γ , comme le thorium 232. Dans ce cas de figure, l'appareil va détecter le spectre γ de son descendant, le plomb 212. L'appareil mesure également l'intensité de ces rayonnements γ pour définir l'activité de l'échantillon. Cette mesure est très utile pour certifier la présence d'un radionucléide précis et pour définir avec exactitude son activité¹²⁸.

3.3.3 Evaluation du danger

Chaque rayonnement a ses caractéristiques et sa propre dangerosité¹²⁹. Le rayonnement gamma pose un problème de radioprotection dans le milieu médical mais pas dans le milieu muséal car la quantité n'est pas significative et les doses reçues peuvent être facilement réduites en se tenant à distance¹³⁰. Les personnes les plus concernées par le danger de la radioactivité sont les conservateurs-restaurateurs ou toutes celles manipulant ces objets. En effet, les particules alpha et bêta peuvent être ingérées notamment lors d'un démontage. Même en respectant les consignes de radioprotection, le personnel d'un musée n'est pas habilité à ouvrir, démonter ou restaurer un objet contenant une substance radioactive. De ce fait, l'identification préalable d'une source est importante en plus de déterminer le type de contamination.

Les substances radioactives qui peuvent se trouver dans les objets patrimoniaux ne sont parfois pas scellées dans des compartiments spéciaux (comme c'est souvent le cas pour les appareils médicaux d'aujourd'hui). Ces objets peuvent être considérés comme contaminés. La contamination est une souillure par des substances radioactives. Elle peut toucher un objet qui contient lui-même une source radioactive ou peut le devenir s'il entre en contact avec un objet contaminant et devient de ce fait radioactif. Deux types de contamination sont distingués :

- un objet radioactif a une contamination fixe lorsqu'il ne dépose pas de particules radioactives par contact ou par le biais d'une autre substance comme la poussière ou l'eau. Cet objet ne risque pas de polluer son environnement.

¹²⁷ Voir l'Annexe 11 - Protocole de mesures du radiamètre, p.120.

¹²⁸ Lyoussi 2010, p.156.

¹²⁹ Voir chapitre 2.2 La radiophysique, p.36.

¹³⁰ Voir chapitre 3.3.4 Exposition, p.64.

- un objet radioactif a une contamination non-fixe lorsque, par contact ou par le biais d'une autre substance, la poussière ou l'eau, il dépose des particules radioactives. Cet objet est un contaminant et risque de polluer son environnement.

Les objets contaminants sont les plus problématiques car les plus dangereux. En effet, le risque est élevé d'ingérer des particules radioactives. Le chemin de décision¹³¹ ci-dessous permet de déterminer la radioactivité d'un objet et les paramètres nécessaires à sa gestion en fonction de son cas¹³². Pour les mesures, il est toujours conseillé de se procurer un radiamètre ou de faire appel à un spécialiste. Cependant, si cela n'est pas possible, l'annexe 13¹³³ expose quelques valeurs propres à quelques catégories d'objets afin de donner une idée des doses susceptibles d'être reçues en leur contact. Il est important de souligner que toute manipulation d'un objet radioactif même soupçonné se fait avec des gants et sur des surfaces de travail préparées¹³⁴.

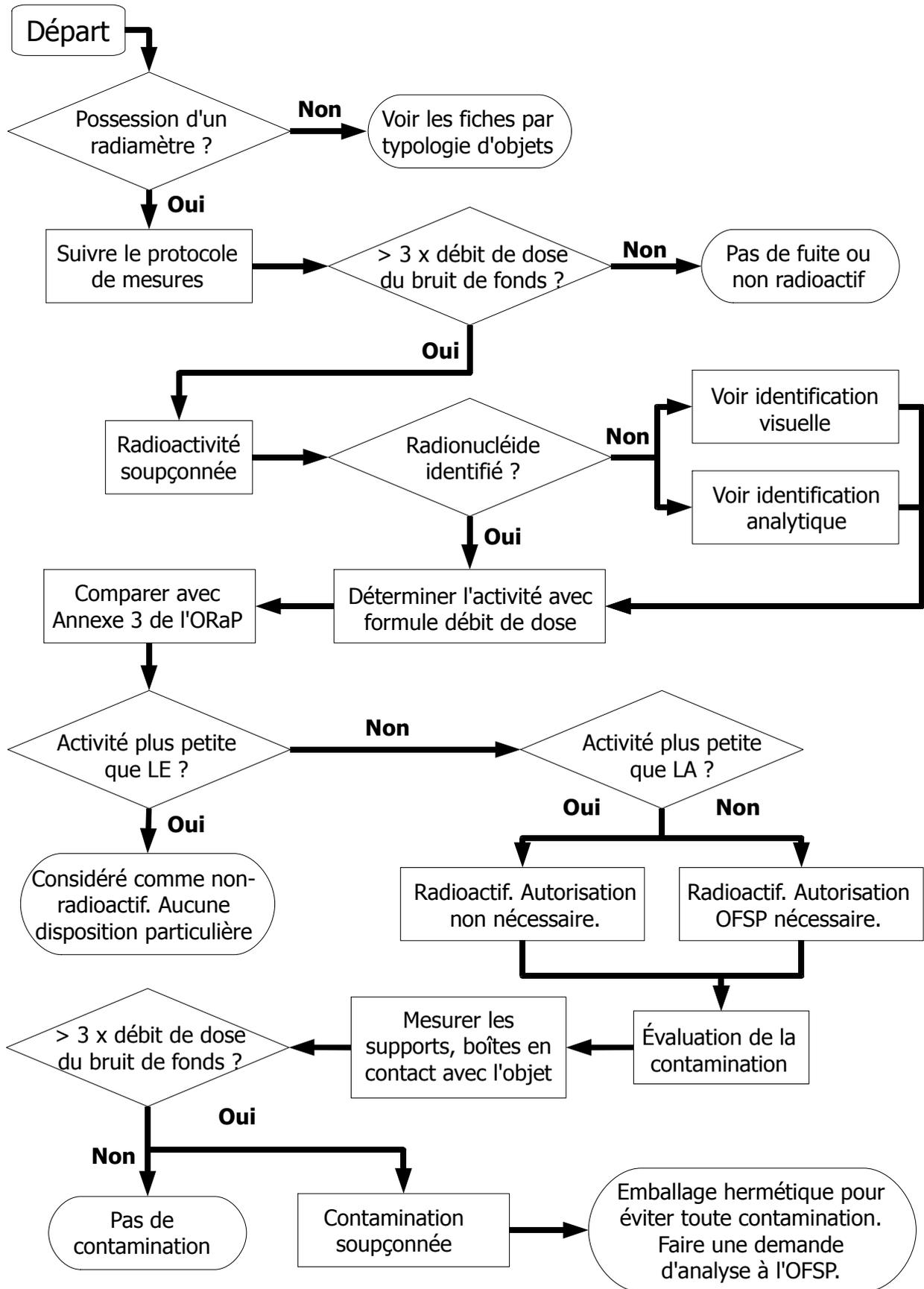
¹³¹ Le chemin de décision a été élaboré suite à la conversation avec Monsieur André Gurtner le 12.06.12.

¹³² Les informations complémentaires au chemin de décision sont l'Annexe 11 - Protocole de prise de mesures, p.121, le chapitre 3.3.1 Identification visuelle, p.52 et 3.3.2 Identification analytique, p.57.

¹³³ Voir l'Annexe 13 - Valeurs indicatives, p.125.

¹³⁴ Voir chapitre 3.3.4 Manipulation, p.61.

Chemin de décisions pour l'évaluation du danger



3.3.4 Gestion du danger

Manipulation

Certains gestes sont à adopter quand il est question de manipuler des objets radioactifs même seulement soupçonnés. Lors d'une manipulation, le principal risque n'est pas le rayonnement gamma mais bien la contamination¹³⁵ ou l'ingestion de radionucléides.

1. Il est nécessaire de toujours porter des gants. La poussière peut être chargée de radionucléides. Même si les rayonnements alpha et bêta ne traversent pas la peau, elle doit être protégée pour éviter un dépôt de radionucléides susceptibles d'être ensuite ingéré (passage de la main sur la figure). Dans cette même optique, il est important de ne pas toucher ce qui l'est habituellement à mains nues comme les poignées de porte, les robinets, le déclencheur de l'appareil photo, etc.
2. Il ne faut ni boire, ni manger, ni fumer dans le lieu où se trouvent des objets radioactifs car il y a un risque d'ingestion, surtout s'ils contiennent du radium ou du thorium. L'un des fils de ces derniers est le radon, gaz qui peut sous cette forme être plus facilement absorbé.
3. Afin d'éviter de contaminer les emplacements de travail, il est conseillé de placer l'objet sur un emplacement préparé à l'avance. L'idéal est d'accéder à une surface de travail facilement nettoyable comme une paillasse de laboratoire en carrelage. Après l'observation de l'objet, la surface peut être nettoyée avec un peu d'éthanol. Il est également possible de recouvrir l'emplacement de papier ménage qui est ensuite éliminé¹³⁶.
4. Lors de prises de mesures, la sonde ou l'appareil ne doit jamais entrer en contact direct avec la surface de l'objet afin d'éviter de contaminer l'appareil lui-même et de fausser les mesures. Les mesures dites au contact se font au plus proche mais sans jamais toucher l'objet.
5. Un principe de radioprotection est d'éviter toute exposition inutile à un rayonnement ionisant. Même si le danger que représente le rayonnement gamma est faible, il est conseillé de ne pas s'en approcher si cela n'est pas nécessaire. De ce fait, il est préférable de changer de table de travail ou de pièce pour la réalisation d'autres travaux.
6. Il ne faut jamais ouvrir de sources radioactives ou entreprendre un traitement qui pourrait l'altérer. Les laboratoires des institutions muséales ne sont pas équipés de systèmes de sécurité suffisants pour réaliser ce type d'action. Le risque de contamination et d'incident est très élevé dans ce cas.

¹³⁵ Voir chapitre 3.3.3 Evaluation, p.58.

¹³⁶ Voir chapitre 3.3.4
Elimination, p.67.

Risques et manipulation par catégorie d'objets		
	Risques	Gestion
Fontaine	Dans certaines fontaines réside une source de radium. Cette source engendre un risque d'irradiation externe, interne et de contamination.	Manipuler avec des gants. Si elle est présente, ne pas toucher la source et contacter l'OFSP ou la SUVA. Placer l'objet dans un contenant hermétique.
Instrument médical	Les aiguilles, tubes et plaques peuvent encore être remplies de radium. Il y a un risque d'irradiation interne et de contamination.	Manipuler avec des gants. Vérifier le risque de contamination. S'il y a un soupçon, les placer dans un contenant hermétique et demander une expertise de l'OFSP ou de la SUVA.
Lampe à gaz	Les manchons brûlés se fractionnent en poussière au moindre choc. Cette poussière est radioactive et constitue un risque de contamination et d'irradiation interne.	Si le manchon a été utilisé, manipuler avec prudence pour ne pas le briser. Port de gants obligatoire. Placer l'objet dans un contenant hermétique afin d'éviter toute forme de contamination. Il est conseillé de réaliser une analyse de contamination auprès de l'OFSP ou de la SUVA.
Objets des années 1920-30	La plupart de ces objets sont inoffensifs. Cependant comme il est difficile de savoir s'ils ont contenu des substances radioactives, il faut toujours les traiter avec prudence.	Manipulation avec des gants recommandée. Il est conseillé d'évaluer le risque de contamination.
Paratonnerre, détecteur de fumée, sources scellées	Tant que ces objets sont en bon état et sont employés dans leur utilisation normale, ils ne représentent pas un grand risque. Cependant, il s'agit d'objets souvent endommagés par le temps et peuvent avoir des fuites radioactives. Il y a un risque d'irradiation interne.	Manipuler avec des gants et ne jamais les ouvrir. Vérifier si le scellé est toujours hermétique. Dans le cas contraire, mettre l'objet dans un contenant hermétique. Il est conseillé dès lors de réaliser une analyse de contamination auprès de l'OFSP ou de la SUVA.
Peinture luminescente	Qu'elle soit au radium ou au tritium, les cadrans arrêtent ou atténuent les rayonnements. Les montres en bon état ne représentent pas un risque élevé. En revanche, les montres cassées	Manipuler avec des gants. Ne pas ouvrir les cadrans même pour une restauration. La peinture peut s'effriter en poussière. Vérifier le risque de contamination. Si besoin, placer l'objet

	peuvent représentés un risque d'irradiation externe, interne et de contamination. Les peintures luminescentes ont tendance à s'écailler et à faire une fine poussière radioactive.	dans un contenant hermétique et contacter l'OFSP ou la SUVA.
Verrerie, céramique, lentille	Ces objets ne représentent pas un grand danger. Les substances radioactives sont intégrées dans la structure de l'objet et ne présentent pas un risque de contamination. Il peut y avoir un risque de contamination interne s'ils sont utilisés pour consommer des liquides.	Manipuler avec des gants. Ne pas abraser les surfaces pour éviter de créer des poussières.

Stockage

Le dépôt des objets radioactifs en réserve est réglementé par l'ORaP¹³⁷. Cette situation doit être discutée avec un représentant de la SUVA ou de l'OFSP car plusieurs solutions sont envisageables selon les conditions. D'une manière générale, il est préférable de regrouper tous les objets radioactifs soit dans un même local fermé et séparé du reste de la collection, soit s'il y a peu d'objets, dans une armoire fermée¹³⁸. L'accès de ce local ou du compartiment de rangement fermé doit être contrôlé. Sur la porte du local ou de l'armoire, il est nécessaire d'appliquer le logo radioactif et d'indiquer que cette zone est contrôlée.

Ces procédures doivent être mises en place pour deux raisons principales. La première est sécuritaire. Avertir de la nature radioactive de ces objets et restreindre leur accès permet d'éviter les incidents de manipulation par ignorance qui peuvent causer une contamination externe ou interne. La deuxième est préventive en cas de sinistres. Un dégât d'eau, de feu ou de chute peut considérablement abîmer l'objet et sa substance radioactive. Il y a alors un risque de contamination. Si les objets sont éparpillés dans la réserve sans moyen de distinction, les secouristes peuvent refuser d'intervenir à cause des risques radiologiques.

L'art. 39 de l'ORaP précise qu'en-dehors de la zone contrôlée, les personnes travaillant dans l'institution ne doivent pas être exposées à plus de 0.02 mSv par semaine. Cependant, dans les endroits rarement fréquentés où personne ne travaille durablement, cette limite peut monter jusqu'à 0.1 mSv par semaine. Dans certains endroits très peu fréquentés, il est toléré jusqu'à 0.42 mSv par semaine. Cependant, le personnel du musée ne doit pas dépasser la valeur limite de 1 mSv par an. Si le dépôt de ces objets dans un local ou une armoire n'est pas suffisant pour respecter les valeurs limites, il est possible de les placer dans un coffre en plomb qui va considérablement atténuer les rayonnements γ .

¹³⁷ Ce paragraphe a été écrit suite aux conversations avec Mme Lisa Pedrazzi le 15.05.12 et Mme Nicole Bosshart le 23.05.12 ainsi que sur la base des articles ORaP visibles à l'Annexe 8 - Bases légales sur le stockage, p.110.

¹³⁸ Les objets doivent reposer sur des structures chimiquement compatibles afin d'éviter toute altération.

Exposition

La problématique liée à l'exposition d'un objet radioactif est la dose reçue par le public. Le rayonnement alpha est arrêté après 5 cm d'air, le rayonnement bêta après 3 m d'air et le rayonnement gamma ne peut être atténué que par du plomb. Ce sont donc principalement les deux derniers rayonnements qui doivent être gérés lors d'une exposition. Le rayonnement bêta peut-être arrêté par un écran de plexiglas® ou de verre. L'idéal est de placer l'objet dans une vitrine. Pour le rayonnement gamma, il a déjà été vu que le débit de dose est diminué par le carré de la distance¹³⁹, plus l'objet est éloigné, moins il y a de chance d'être exposé. En mettant l'objet dans une vitrine, une distance est déjà créée avec le visiteur, diminuant de ce fait son exposition aux rayonnements gamma. De plus, un visiteur reste rarement plus de dix minutes devant un objet. De ce fait, la dose reçue en μSv par visiteur est pratiquement négligeable, comme le montre l'exemple suivant :

Pour une exposition de dix boussoles émettant chacune $1.8 \mu\text{Sv/h}$ à 1 cm^{140} dans une vitrine, les visiteurs peuvent s'approcher au plus près à 20 cm. La formule suivante exprime la diminution du débit de dose par le carré de la distance :

$$d_1^2 \cdot \dot{H}_1 = d_2^2 \cdot \dot{H}_2 \quad \left| \begin{array}{l} d_1 = \text{distance entre la source et } \dot{H}_1 \\ d_2 = \text{distance entre la source et } \dot{H}_2 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \dot{H}_1 = \text{débit de dose à la distance } d_1 \\ \dot{H}_2 = \text{débit de dose à la distance } d_2 \end{array}$$

Nous obtenons de ce fait :

$$\begin{array}{l} d_1 = 1 \text{ cm} \quad \dot{H}_1 = 10 \times 1.8 \mu\text{Sv} \\ d_2 = 20 \text{ cm} \quad \dot{H}_2 = ? \end{array} \quad \left| \quad \frac{1^2 \cdot 18}{20^2} = \dot{H}_2 \quad \text{Donc } \dot{H}_2 = 0.045 \mu\text{Sv/h} \right.$$

En admettant que le temps moyen que passe le visiteur à regarder les dix boussoles est de dix minutes, cela donne une dose totale de $0.0075 \mu\text{Sv}$ par personne.

Transport

Les matières radioactives font partie de la classe 7 des marchandises dangereuses et leur transport est réglementé par la SDR et l'ADR (SDR/ADR)¹⁴¹. Le transport des échantillons ou des objets muséaux contenant des matières radioactives est donc également réglementé. Afin de répertorier toutes les matières dangereuses dans le transport, les numéros ONU (n°ONU) permettent d'identifier rapidement le contenu des colis quel que soit leur taille. Les deux n°ONU attribuer à des échantillons ou des objets en colis exceptés est le UN2910 : quantités limitées en colis exceptés et le UN2911 : appareils ou objets en colis exceptés. L'envoi de ce genre de colis dépend de la nature de l'objet ou de l'échantillon et de l'activité

¹³⁹ Voir chapitre 2.3.3 Les moyens de protection p.44 et l'Annexe 7 - Formules p.107.

¹⁴⁰ La dose supposée se base sur les mesures d'une des boussoles les plus fortement actives de la Fondation HAM.

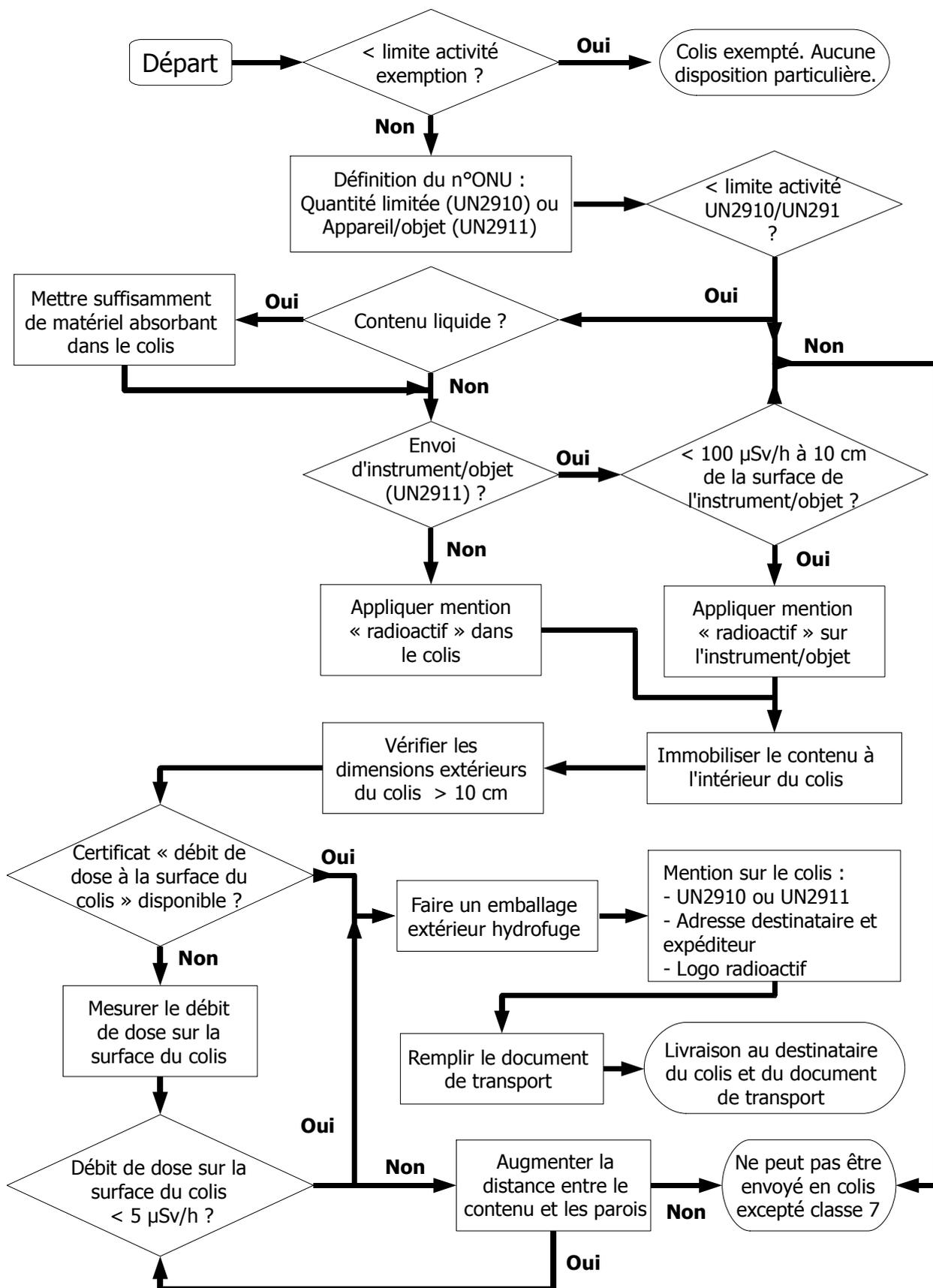
¹⁴¹ Ce paragraphe a été écrit suite à la conversation avec Mme Pedrazzi le 15.05.12 et sur la base des articles SDR/ADR visibles à l'Annexe 8 - SDR / ADR, p.115.

des radionucléides qu'il contient. Le personnel de musée ne peut transporter que des colis exemptés ou exceptés selon les activités limites définies pour le transport selon les prescriptions de la SDR/ADR¹⁴². Si le colis ne peut être envoyé en colis excepté, il est nécessaire de posséder une autorisation ou de faire appel à une entreprise de transporteurs spécialisés. Le chemin de décision¹⁴³ ci-dessous permet de préparer et de vérifier un envoi en colis excepté.

¹⁴² Voir l'Annexe 14 - Compléments pour le transport, p.126.

¹⁴³ Le chemin de décision a été élaboré à partir d'un document établi par la SUVAPRO fourni par Mme Lisa Pedrazzi le 15.05.12.

Chemin de décisions pour le transport des matières radioactives exceptées



Elimination

L'élimination des déchets radioactifs est légiférée par la LRaP et L'ORaP¹⁴⁴. Selon l'art. 79 "*Seuls les déchets faiblement radioactifs peuvent être rejetés dans l'environnement*", ce qui signifie que les déchets solides et liquides doivent avoir une activité inférieure à la limite d'exemption par catégorie de radionucléide. Cependant, appliqués au milieu muséal, deux situations peuvent être différenciées :

- Les interventions sur l'objet
Même s'il n'est pas autorisé à appliquer un traitement qui induit l'ouverture ou l'altération de la source qui engendre un risque de contamination, il est possible d'effectuer quelques actions, comme le dépoussiérage. La poussière retirée de l'objet peut alors être contaminée¹⁴⁵. Si l'activité de ces déchets est en dessous de la limite d'exemption, il est autorisé de les traiter comme n'importe quel autre déchet.
- L'élimination de sources ou d'objets radioactifs
Certains objets ou sources ont une activité à la limite de la LE voire en-dessous. Dès qu'il s'agit d'un objet, nous conseillons cependant de l'éliminer comme déchet radioactif. Dans ce cas de figure, ces déchets doivent être stockés dans un endroit sûr et dans des contenants hermétiques pour éviter toute contamination. L'OFSP en collaboration avec le PSI organise chaque année une campagne de ramassage de déchets radioactifs à laquelle il est possible de s'inscrire¹⁴⁶. Les déchets sont conditionnés au PSI et placés dans des entrepôts intermédiaires avant d'être envoyés à la NAGRA pour un stockage définitif. Lors de la collecte les déchets doivent être préparés selon la procédure de l'OFSP.

¹⁴⁴ Ce chapitre a été écrit sur la base des articles de la LRaP et de l'ORaP, visibles à l'Annexe 8 - Bases légales sur les déchets radioactifs, p.111.

¹⁴⁵ Nous rappelons de suivre les règles de radioprotection lors de ces actions, au chapitre 3.3.4 Manipulation, p.61.

¹⁴⁶ Formulaire d'inscription et procédure disponibles à l'adresse suivante :
<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/10468/10469/10472/index.html?lang=fr>

4 CAS PRATIQUES : LES PEINTURES LUMINESCENTES

4.1 SITUATION

La Fondation du matériel historique de l'armée suisse (Fondation HAM), créée par l'Association du musée suisse de l'armée le 23 juillet 2008, est l'organisation professionnelle mandatée pour gérer et assurer la conservation des collections du matériel historique militaire qui appartiennent à la Confédération Helvétique. Les collections sont réparties sur deux sites différents. Les collections de matériel optique, de lampes et lanternes (Fig. 39), d'uniformes et équipements personnels, de pièces d'artillerie, de maquettes de ponts, etc. se trouvent sur le site de Thoune réparties entre plusieurs entrepôts mis à disposition par l'armée. Quant aux collections de véhicules et de chars, elles se trouvent sur le site de Berthoud, dans l'ancien parc automobile de l'armée¹⁴⁷.



Fig. 39 : Réserve de la collection de lampes et lanternes
©SHAM

4.2 DEMARCHE

Afin de compléter cette étude, nous avons évalué les traitements possibles pour atténuer ou retirer une source radioactive. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux peintures luminescentes. L'objectif est de comparer les interventions curatives possibles et les options préventives. La fondation HAM nous a mis à disposition une série d'objets non significatifs pour la collection (objets présents en grand nombre) afin que nous puissions réaliser des analyses et des tests.

La problématique des peintures luminescentes est de deux ordres ; le rayonnement gamma peut être important et elles peuvent s'effriter avec le temps posant le problème de la contamination et de la perte de matière d'une peinture. Ces deux constats ont justifié le choix des objets : un anémomètre et quatre boussoles. L'anémomètre étant dans une boîte en bois, la démarche consistait à déterminer si cette dernière avait une contamination non-fixe et, si tel était le cas, à réaliser des essais de fixation de la contamination. Quant aux boussoles, nous voulions réaliser des essais de décontamination.

Pour commencer, des mesures ont été réalisées avec un radiamètre afin de vérifier que les objets étaient bien radioactifs. Dans un deuxième temps, nous voulions identifier plus formellement les radionucléides contenus dans ces peintures. Pour finir nous avons effectué des mesures de contamination.

¹⁴⁷ Stiftung HAM, [en ligne]

Il a été difficile cependant d'obtenir les autorisations pour réaliser les premières mesures. Pour la réalisation des tests, sans formation en radioprotection adéquate, nous n'avons pas obtenu les autorisations nécessaires. Faute d'avoir accès à un laboratoire de type C¹⁴⁸, les tests désirés n'ont pu être ni expérimentés, ni observés.

4.3 LES OBJETS

Les objets suivants ont été mis à disposition par la Fondation HAM pour cette étude : une série de boussoles, un anémomètre, des lunettes de vision et des lampes à gaz. Les objets que nous avons sélectionnés sont les deux premiers.

4.3.1 Les boussoles

Plusieurs types de boussoles ont été étudiés. Les premières font partie d'un lot d'environ cinquante boussoles de la marque RECTA. Il s'agit d'une marque suisse originaire de Bienne qui fabrique des chronographes depuis 1897 et des boussoles depuis 1914. En 1941, elle conçoit "*la première boussole boîtier à bain d'huile*¹⁴⁹" qui fut utilisée notamment par l'armée. Rien d'étonnant de ce fait d'en retrouver dans les collections de la Fondation HAM. Nous avons sélectionné une boussole en bonne état (1)¹⁵⁰ et une boussole en mauvais état (6). La troisième (832) et quatrième (7) boussoles proviennent d'un lot hétéroclite. Les boussoles sélectionnées ne font pas partie de la collection mais font partie d'un stock de réserve.

Caractéristiques techniques des boussoles RECTA

- Boîtier coulissant	- Marque luminescente sur l'aiguille côté nord
- Marques luminescentes à l'avant et à l'arrière du boîtier	- Marques luminescentes aux nombres 12, 8, 56 et 52, ainsi qu'un double trait au nord et un point au sud.
- Capsule pivotante et remplie de liquide (supposé d'huile)	

Boussole Recta 1

Bonne lisibilité, intérieur de la capsule propre, quelques griffures sur le boîtier

Boussole Recta 6

Mauvaise lisibilité de la capsule, bulle à l'intérieur de la capsule, jaunissement du liquide, griffures sur le boîtier.

¹⁴⁸ Voir chapitre 3.2.3 Définition légale de la radioactivité et autorisation, p.50.

¹⁴⁹ L'utilisation de l'huile dans les capsules des boussoles permet de minimiser les oscillations des aiguilles afin de faciliter la lecture.

¹⁵⁰ Les numéros des boussoles sont arbitraires ou sont leur numéro d'inventaire.

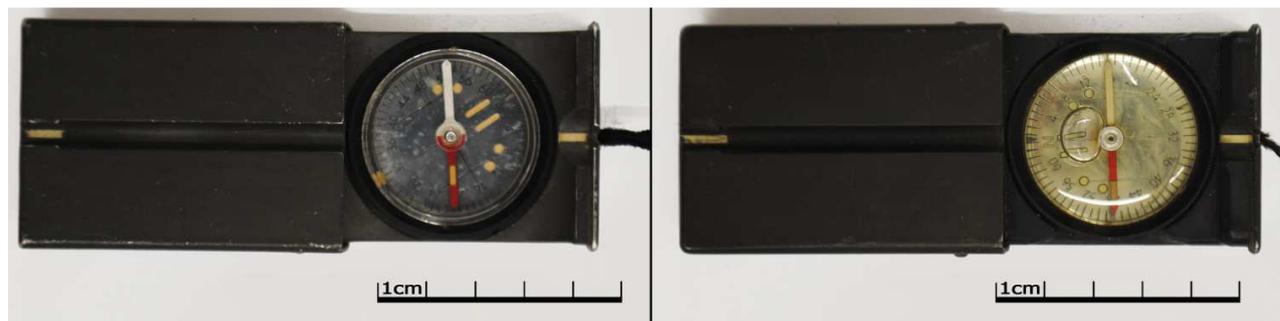


Fig. 40 : Boussole Recta 1 et boussole Recta 2 ©HECR Arc, 2012

Caractéristiques techniques de la boussole 7

- Couvercle à rabat
- Marques lumineuses sur la flèche et un repère
- Plateau pivotant

Description

Mauvaise lisibilité de la capsule, plateau pivotant cassé, présence de corrosion verte sur le couvercle et l'anneau.



Fig. 41 : Boussole 7 fermée et ouverte ©HECR Arc, 2012

Caractéristiques techniques de la boussole 832

- Pas de couvercle
- Cadre pivotant
- Marques lumineuses sur l'aiguille côté nord et sur les quatre points cardinaux

Description

Lisibilité moyenne de la capsule à cause de la présence de poussière, verre non fêlé.

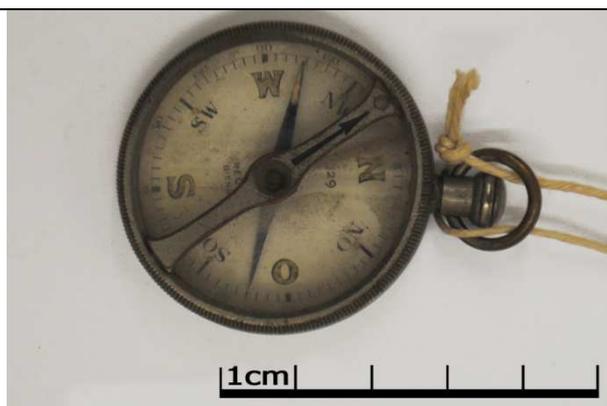


Fig. 42 : Boussole 832 ©HECR Arc, 2012

4.3.2 L'anémomètre

Il s'agit d'un appareil pour mesurer la vitesse du vent (Fig. 43). La fondation HAM en possède plusieurs dont deux autres identiques à celui-ci. Ce matériel doit encore être trié avant d'être définitivement

inventorié. Nous avons sélectionné ce type-ci car il est pourvu d'une matière luminescente sur les chiffres du cadran. Il se trouve dans une boîte en bois muni d'une poignée pour le transport. Au point d'immobilisation de l'appareil, la peinture s'écaille et nous avons noté qu'au fond de la boîte se trouve des pertes de matières de peinture (Fig. 44).



Fig. 43 : Anémomètre dans sa boîte ©HECR Arc, 2012

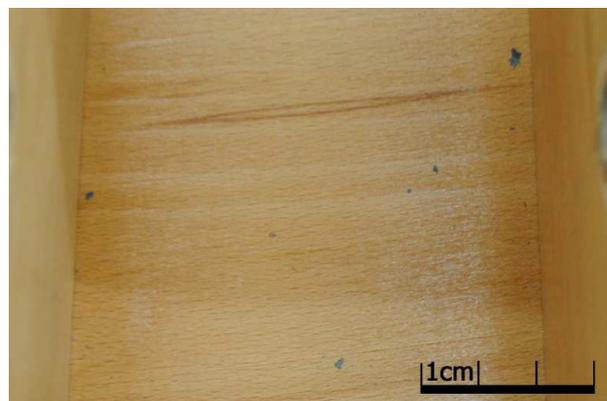


Fig. 44 : Perte de matière au fond de la boîte ©HECR Arc, 2012

4.4 ÉVALUATION DU DANGER

4.4.1 Mesure du débit de dose et des coups par seconde

Nous avons commencé par réaliser des mesures¹⁵¹ en atelier avec un radiamètre¹⁵² (Fig. 45). Cet appareil permet une mesure en $\mu\text{Sv/h}$, mSv/h (débit de dose) et en CPS, mais ne permet pas l'identification du rayonnement ou du radionucléide.

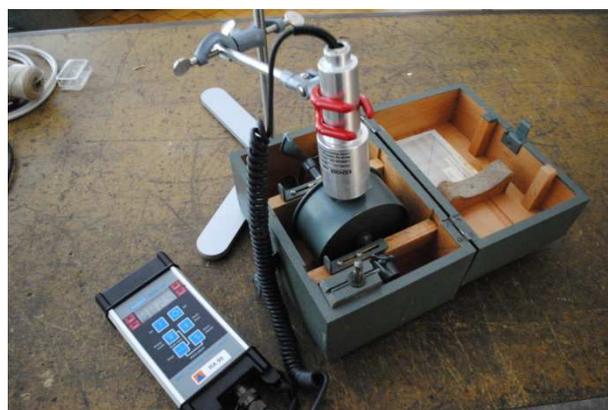


Fig. 45 : Prise de mesures avec le radiamètre. ©HECR Arc, 2012

Il a pu être constaté que l'anémomètre était l'objet le plus réactif. Lorsque la boîte est fermée, le radiamètre mesure encore à 0.5 cm un rayonnement. La mesure du fond de la boîte en bois n'a peut-être pas été le triple du bruit de fonds en $\mu\text{Sv/h}$ mais les CPS étaient suffisamment élevés pour soupçonner la présence de contamination.

Pour les boussoles, nous avons obtenu différents résultats. Le rayonnement de la boussole recta 1 est le plus faible. A 10 cm, l'appareil ne détecte plus que le bruit de fond et à 0.5 cm, les mesures en étaient proches. La Boussole 832 est dans une situation similaire. Nous nous attendions à ce que la boussole recta 6 soit la plus forte du fait de son mauvais état. Le jaunissement du liquide et la bulle laissaient à penser

¹⁵¹ Protocole de mesure à l'Annexe 11 - Protocole de mesures du radiamètre, p.121 et détails des mesures à l'Annexe 15 - Mesures des objets, p.129.

¹⁵² Références techniques à l'Annexe 12 - Fiche technique du radiamètre, p.123.

que la capsule n'était plus hermétique. Par conséquent, nous nous attendions à un rayonnement plus fort ce qui ne fut pas le cas. Lorsque cette boussole est fermée, le débit de dose ne bouge pratiquement pas mais les CPS sont considérablement réduits. La boussole 7 a le débit de dose le plus élevé. Une fois fermée, le même phénomène que pour la boussole recta 6 s'observe. Le débit de dose baisse à peine, les CPS sont réduits. Ces deux dernières boussoles montrent que le rayonnement le plus dangereux que détecte surtout l'appareil est le rayonnement gamma.

4.4.2 Détermination du radionucléide

Afin de déterminer avec exactitude le radionucléide présent dans la peinture, nous avons apporté plusieurs boussoles au laboratoire d'analyse de la radioactivité de l'environnement de l'OFSP à Berne. M. André Gurtner, collaborateur technique, a déterminé qu'il s'agissait bien du radium 226 à l'aide d'un spectromètre gamma (Fig. 46 et Fig. 47). En revanche, il n'a pas été possible de mesurer l'activité de la peinture. En effet, il est nécessaire pour ce faire de prélever un échantillon de dimensions précises et calibrées par la machine. Nous n'avons non plus pas identifié le radionucléide de l'anémomètre car ce dernier était trop volumineux pour rentrer dans l'appareil.



Fig. 46 : Le spectromètre gamma. ©HECR Arc, 2012



Fig. 47 : Boussole 6 dans le spectromètre ©HECR Arc, 2012

Cette information nous a permis de calculer approximativement l'activité¹⁵³. La boussole recta 1 a 40 Bq d'activité et se trouve par conséquent à la limite de la LE. La boussole recta 6 a une activité de 100 Bq et dépasse la LE en restant sous la LA. Les deux boussoles peuvent donc être considérées comme radioactives.

¹⁵³ Selon la formule de l'Annexe 7 - Loi du carré de la distance, p.107.

4.4.3 Mesures de contamination

Bien que la mesure en $\mu\text{Sv/h}$ ne soit pas plus élevée que trois fois le bruit de fonds (à $0.10 \mu\text{Sv/h}$), nous avons voulu savoir si la boîte en bois de l'anémomètre était contaminée. Pour ce faire, le groupe de radioprotection de l'IRA a accepté de réaliser ces analyses. Ce prélèvement est appelé frottis (Fig. 48). Nous avons reçu des cotons de diamètre défini et les avons passés sur une surface avec un peu d'éthanol¹⁵⁴. La poussière et les radionucléides, s'il y en a, se retrouvent sur ce coton. Nous avons prélevé cinq échantillons de l'anémomètre (Fig. 49) et sa boîte et cinq autres échantillons des boussoles¹⁵⁵. Les rayonnements des dix frottis ont été mesurés à l'IRA en spectrométrie groupée. Après une heure d'analyse, sans résultat évident de contamination, ils ont passé 89 heures dans le spectromètre γ afin d'affiner l'analyse.

Les résultats¹⁵⁶ n'ont pas montré que les boussoles ou l'anémomètre étaient contaminés mais ont confirmé que pour tous les objets, il s'agissait bien de peinture au radium 226.

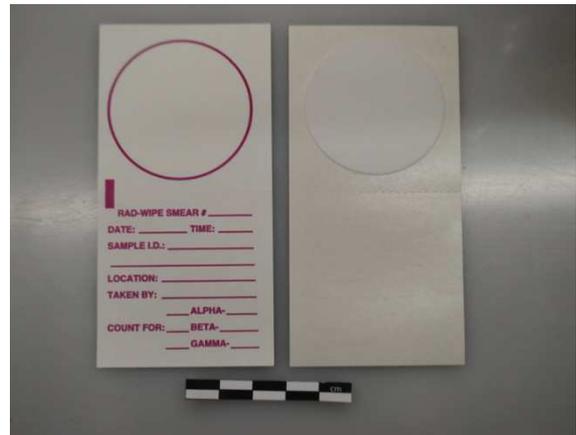


Fig. 48 : Frottis fourni par l'IRA ©HECR Arc, 2012



Fig. 49 : Couvercle de la boîte de l'anémomètre. Le soutien est en contact avec le cadran radioluminescent. ©HECR Arc, 2012

4.5 TRAITEMENTS CURATIFS

Qu'il s'agisse de contamination fixe ou non-fixe, des mesures préventives peuvent être employées, mais également des traitements plus invasifs pour atténuer la radioactivité d'un objet. N'ayant pas obtenu d'autorisation pour effectuer des essais et rendre compte de ces traitements possibles, nous ne les avons pas expérimentés.

4.5.1 Décontamination

La décontamination consiste à retirer de l'objet les substances radioactives afin qu'il devienne inerte. Elle peut être de deux ordres.

¹⁵⁴ Protocole à l'Annexe 11 - Protocole de prise d'échantillons pour une analyse de contamination, p.122.

¹⁵⁵ Les détails des frottis à l'Annexe 15 - Mesures des objets, p.129.

¹⁵⁶ Voir l'Annexe 17 - Résultats des analyses de contamination, p.132.

Retrait de la contamination non-fixe

Les particules radioactives qui rendent un objet radioactif peuvent parfois être retirées si le matériau contaminé n'est pas poreux, comme le métal non corrodé. Les particules sont seulement posées mais ne sont pas incrustées. De ce fait, elles peuvent contaminer tout objet entrant en contact avec elles.

L'objectif est de récupérer ces particules sur un matériau absorbant afin de retenir le solvant et les particules, comme un coton. Il est plus efficace semble-t-il d'utiliser un solvant comme l'éthanol¹⁵⁷ pour récupérer la poussière qui est le premier véhicule de ces particules radioactives.

Il est nécessaire de travailler en appliquant les principes de manipulation ainsi qu'avec un appareil de mesure comme un radiamètre afin de vérifier que l'objet ne réagisse plus et de le faire expertiser si besoin.

Retrait de la source

Dans certains cas, il peut être envisagé de retirer la source parce qu'elle est considérée comme trop dangereuse. Cela peut-être le cas des fontaines au radium auxquelles leur source de radium est retirée. Ce travail doit être réalisé par des personnes qualifiées et dans un laboratoire spécialisé de type C au minimum pour des raisons évidentes de sécurité. La manipulation de sources radioactives comporte des risques élevés de contamination et d'incidents.

L'entreprise RC TRITEC fabrique pour le marché horloger suisse la matière lumineuse non-radioactive, le Luminova®. Elle propose également un service de décontamination des peintures lumineuses de montres anciennes¹⁵⁸. Entre 2009 et 2010, elle a été mandatée pour décontaminer 40'000 boussoles Recta de l'armée. Ce traitement était nécessaire car l'armée ne souhaitait plus conserver ces boussoles. Pour une question de volume de stockage, il était plus judicieux de retirer les peintures radioactives avant de les traiter comme déchets radioactifs et d'éliminer les boussoles comme déchets inertes.

Le travail de décontamination se déroule dans un laboratoire de type B. Le travail s'effectue dans une enceinte fermée avec une aspiration (Fig. 50). Elle est également équipée d'un petit aspirateur plus fin. Les cadrans subissent d'abord un traitement mécanique pour retirer un maximum de peinture puis sont plongés dans des solutions chimiques permettant d'éliminer les derniers résidus de peinture. Les cadrans et aiguilles peuvent être très abîmés (rayures, fissures, cassures) suite à ce traitement et doivent ensuite être restaurés. Cependant, l'objectif



Fig. 50 : Atelier de décontamination des cadrans et aiguilles de montres ©RC TRITEC, 2012

¹⁵⁷ Ce paragraphe est écrit suite à la conversation téléphonique avec M. Adrien Klapisz, le 09.05.12

¹⁵⁸ Ce paragraphe est écrit suite à la visite de l'entreprise par son directeur, M. Albert Zeller, le 08 juin 2012.

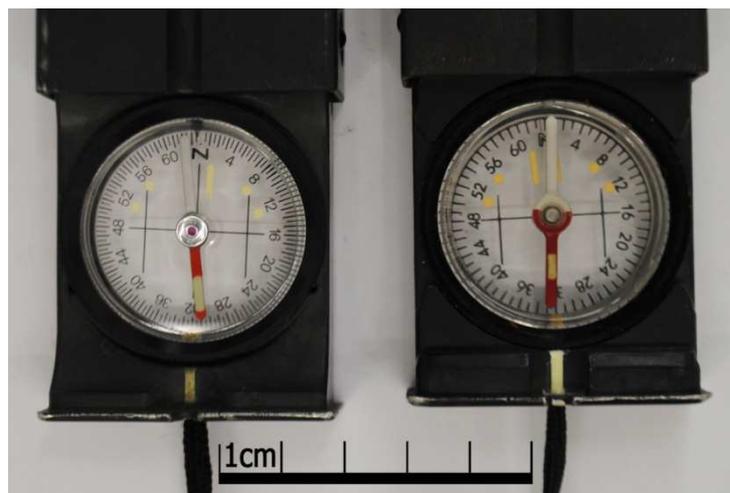


Fig. 51 : Boussole non traitée à gauche et boussole traitée par RC TRITEC à droite ©HECR Arc, 2012

qui est de retirer la totalité du radium est atteint. Les aiguilles et cadrans sont ensuite regarnis de Luminova®.

Faire appel à une entreprise spécialisée pour décontaminer un objet peut être une solution envisageable s'il est primordial de retirer la source. Il est difficile d'évaluer les conséquences exactes de ce traitement sans étude mais il est tout fois très invasif et presque illusionniste (Fig. 51). Il paraît important d'évaluer la nécessité de la

décontamination d'une boussole en bon état avec un faible débit de dose. Les substances radioactives ne doivent pas être considérées à la légère mais peuvent être gérées par des moyens préventifs peut-être de façon plus rentable que ce traitement lourd.

4.5.2 Fixation de la contamination

Sur certains matériaux poreux la contamination n'est pas fixe mais il n'est cependant pas possible de la retirer dans sa totalité. C'est le cas du bois par exemple où comme la poussière, les particules radioactives s'infiltreront dans les porosités et l'utilisation d'un solvant a plutôt l'effet de les infiltrer plus loin dans la matière que de les retirer.

Au musée Curie à Paris, M. Jean-Pierre Degrange, expert en radioprotection indépendant, a été confronté à plusieurs objets scientifiques en bois qui ont été contaminés par des sources radioactives¹⁵⁹. Le principal danger de ces objets, même s'ils ne sont pas d'une grande activité, est qu'ils en contaminent d'autres à leur tour. De ce fait, la méthode employée dans ce musée est la pose d'un vernis sur les zones contaminées. Ceci ne diminue pas la radioactivité en elle-même mais emprisonne les particules les empêchant de contaminer d'autres surfaces.

Ce traitement a l'avantage d'être moins interventionniste comparé à la décontamination. Cependant, son utilisation pose quelques questions. Tout d'abord, le rendu esthétique risque d'être changé par une apparence brillante ou mate et par un changement de couleur. En général ce genre de contamination est très localisé, de ce fait l'emploi d'un vernis sur une zone ciblée risque de contraster avec les autres surfaces de l'objet. De plus, il est difficile de prévoir comment le vernis va vieillir et quel impact cela aura sur l'efficacité de la fixation de la contamination.

¹⁵⁹ Ce paragraphe est écrit suite à la conversation téléphonique avec M. Jean-Pierre Degrange, le 25 mai 2012.

5 SYNTHÈSE

Le phénomène de la radioactivité nous étant très mal connu avant la réalisation de ce travail, que nous avions des aprioris quant au danger que cela représentait. Comme beaucoup de monde, en sachant qu'un objet est radioactif, nous avons de l'appréhension et nous nous tenions en retrait sans finalement vraiment comprendre pourquoi c'était dangereux.

Ce travail a permis de rendre compte de la dangerosité réelle de ce phénomène. Il n'est pas nécessaire de s'enfuir en courant dès que le compteur Geiger-Müller se manifeste car il s'agit essentiellement de rayonnement γ qui est un danger stochastique. Plus il y a de rayonnement γ , plus il y a de probabilité qu'ils réagissent avec nos cellules. La plupart des objets radioactifs rencontrés dans les musées ne sont pas comparables aux appareils médicaux au niveau de leur production de rayonnements et l'irradiation externe ne peut dans ce cas pas être le danger le plus présent. Cela ne banalise pas pour autant le problème, bien au contraire. L'irradiation interne est bien plus néfaste pour notre santé que l'irradiation externe et c'est lors du démontage ou de la manipulation que le risque d'ingestion est le plus élevé. C'est ce danger-ci qui est mal connu. Il est difficile avec les moyens d'un musée d'estimer la quantité de particules radioactives susceptibles d'être présent sur nos doigts, sur le plan de travail ou sur d'autres objets et d'être par la suite ingérées. A nouveau, ce danger peut paraître tout à coup effrayant mais il met surtout en évidence le réel besoin d'une méthodologie de travail rigoureuse lors de la manipulation d'objets. En respectant les règles de radioprotection, ce danger peut être géré comme celui de n'importe quelle autre substance toxique.

De ce fait, il nous apparaît comme normal d'avoir rencontré des difficultés tout au long de ce travail, au niveau législatif, notamment pour la réalisation des tests de fixation de la contamination ou de retrait de la source. Ce genre de travaux ne peut être réalisé dans les laboratoires des institutions muséales pour des raisons de sécurité. Les laboratoires spécialisés possèdent des équipements adaptés pour la manipulation de substances radioactives et des protocoles en cas d'incidents et de contamination, et le personnel a suivi une formation adéquate en radioprotection. Pour approfondir notre étude sur les traitements des peintures radioactives, il aurait été nécessaire de suivre une formation en radioprotection reconnue par l'OFSP. Malheureusement, ces cours ne se déroulent qu'une ou deux fois par an et aucun ne pouvait être suivi pendant la période de cette étude. Cependant, cela a mis en évidence les difficultés rencontrées par un conservateur-restaurateur qui n'a pas l'occasion d'effectuer ces formations. Nous avons pu malgré tout montrer qu'il y a des actions possibles à réaliser en respectant les limites de notre profession.

CONCLUSION

L'objectif général de ce travail était de concevoir un document pratique permettant de s'informer sur le problème de la radioactivité dans les collections en apportant des éléments de réponse aux quatre questions soulevées qui sont l'identification, l'évaluation, la gestion et le traitement des objets radioactifs.

La radioactivité est un phénomène invisible et nécessite l'utilisation d'appareils de mesures pour la détecter formellement. Cependant, il est possible de faire une première identification visuelle afin d'adopter un comportement adéquat pour prévenir tout incident. Ceci est possible avec l'observation d'indices comme les périodes de fabrication, la fonction, les inscriptions et l'histoire des objets. Nous nous sommes donc concentrés sur les objets radioactifs les plus souvent rencontrés dans les musées en décrivant les éléments pertinents sur leur contexte historique afin de faciliter leur identification.

Nous avons également expliqué le phénomène physique et pour quelles raisons la radioactivité était dangereuse pour la santé. Les appareils de mesures détectent le plus souvent des rayonnements γ , caractéristiques de l'irradiation externe. Cependant, dans le milieu muséal le plus grand risque n'est pas celui de l'irradiation externe mais bien interne. L'ingestion de radionucléides est possible lors de manipulation sans respect des consignes de radioprotection. Ceci nous a donc amené à concevoir des fiches pratiques sous forme de chemins de décision permettant une condensation des informations et une prise de décision rapide pour la gestion de ces objets. L'adaptation des textes législatifs ou de radioprotection au contexte muséal était également une étape importante afin de réaliser les conséquences réelles de la possession d'un objet radioactif dans les collections.

Pour finir nous avons essayé d'évaluer l'intérêt d'un traitement plus invasif pour réduire ou retirer le danger radioactif des peintures luminescentes. La contamination est problématique car le risque d'ingestion de particules est plus élevé. Les deux traitements qui nous ont intéressés sont la fixation de la contamination au moyen d'un vernis et le retrait de la peinture par des moyens mécaniques et chimiques. Du fait que nous n'ayons pas reçu les autorisations adéquates, cet aspect n'a pu être expérimenté.

Afin de compléter cette étude, il serait intéressant de réaliser des essais de décontamination dans le but de rendre compte des avantages et des inconvénients de cette méthode. Nous avons eu l'opportunité de visiter l'entreprise RC TRITEC qui propose de décontaminer des pièces horlogères. Il serait intéressant de comparer des méthodes mises en place par un industriel et celles d'un conservateur-restaurateur afin d'évaluer l'efficacité, la rentabilité et la faisabilité de l'opération. Cependant, si un tel travail devait se mettre en place, il serait nécessaire de suivre une formation en radioprotection au préalable afin de disposer des autorisations nécessaires.

Nous proposons également une étude sur un point non développé dans ce document. La problématique des objets radioactifs lors de sinistres. En effet, un sinistre quel qu'il soit peut fortement endommager un objet dont les substances radioactives peuvent dès lors contaminer les surfaces, l'air ou l'eau. Si ces objets

ne sont pas facilement identifiables, les secouristes peuvent refuser d'intervenir pour cause de risque radiologique. Il serait dès lors intéressant d'évaluer ce risque dans les institutions muséales afin d'établir des mesures adaptées au stockage de ces pièces.

Ce travail nous a permis de mettre en évidence les actions préventives possibles dans le cadre des textes législatifs et à évaluer plus justement le danger de la radioactivité. La sensibilisation et l'information auprès des institutions muséales des protocoles de manipulation des objets, qu'ils soient radioactif ou contenant d'autres substances toxiques ou dangereuses, est primordiale pour la santé du personnel et éviter tout incident.

ABREVIATIONS ET SIGLES

ANDRA : Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

DDPS : Département fédérale de la défense, de la protection de la population et des sports

DFI : Département fédéral de l'intérieur

HAM : Fondation matériel historique de l'armée suisse

IRA : Institut de radiophysique

MIH : Musée International d'Horlogerie

OFPP : Office fédérale de la protection de la population

OFSP : Office fédérale de la santé publique

PSI : Paul Scherrer Institut

GLOSSAIRE

5.1 VOCABULAIRE

ACTIVITE

Nombre de désintégrations par unité de temps. L'unité est le becquerel (Bq) et équivaut à une désintégration par seconde.

ORaP, 2012, p.58.

CONTAMINATION RADIOACTIVE

Souillure d'un objet par des substances radioactives, le rendant ainsi radioactif à son tour.

ORaP, 2012, p.58.

CUISSON OXYDANTE

Atmosphère de cuisson constituée d'un surplus d'oxygène.

Matters, 2002, p.55

CUISSON REDUCTRICE

Athmosphère de cuisson sans présence d'oxygène.

Matters, 2002, p.55

DECHETS RADIOACTIFS

Substances radioactives ou matières contaminées qui ne sont plus utilisées.

ORaP, 2012, p.59.

DESINTEGRATION

Transformation spontanée et aléatoire d'un noyau en un autre par émission de rayonnements.

Giancoli, 2004, p.352.

DEMI-VIE OU PERIODE

Temps nécessaire pour que l'activité du radionucléide diminue de moitié.

Giancoli, 2004, p.366.

DOSE

Grandeur utilisée pour exprimer le risque sanitaire dû aux rayonnements ionisants.

ORaP, 2012, p.59.

ELECTRON

Constituant de l'atome de charge électrique négative. C'est une particule qui gravite autour du noyau.

Giancoli, 2004, p.360.

GLAÇURE

Enduit vitrifiable posé à la surface de la céramique.

Matthes, 2002, p.27

IONISATION

Phénomène physique de l'action qui enlève ou ajoute des charges à un atome. Du fait qu'il ne soit plus neutre, il devient soit positif, soit négatif et devient un ion.

Giancoli, 2004, p.352.

ISOTOPE

Deux atomes dont le nombre de protons est identique mais dont le nombre de neutrons diffère.

Giancoli, 2004, p.353.

RAYON X

Rayonnement électromagnétique composé de photons. Il est produit par des transitions électroniques au contraire du rayonnement gamma qui provient de la désintégration radioactive.

Giancoli, 2004, p.170.

LUMINESCENCE

Certains corps ont la propriété d'absorber de l'énergie sous une forme d'excitation (sauf celle de la chaleur) et d'émettre les photons en la restituant lorsque les molécules retournent à leur état fondamental. Lorsque

le phénomène n'est visible que lorsque le corps est excité par la source, il s'agit de fluorescence. Lorsque le phénomène persiste après le retrait de la source d'excitation, il s'agit de phosphorescence.

Bordry, 1996, p.20

NEUTRON

Composant du noyau atomique de charge électrique neutre.

Giancoli, 2004, p.352.

NUCLEIDE

Atome caractérisé par le nombre de protons et de neutrons qu'il contient.

Giancoli, 2004, p.352.

PROTON

Composant du noyau atomique de charge électrique positive.

Giancoli, 2004, p.352.

RADIOACTIVITE

Désintégration spontanée de radionucléides. Phénomène accompagnée de rayonnements ionisants.

ORaP, 2012, p.63.

RADIONUCLEIDE

Noyau atomique instable caractérisé par son nombre de protons et de neutrons, qui se désintègre spontanément en émettant des rayonnements ionisants.

ORaP, 2012, p.63.

RAYONNEMENT IONISANT

Rayonnement dont l'énergie est suffisante pour arracher des électrons de l'enveloppe électronique.

ORaP, 2012, p.64.

5.2 UNITES DE MESURE

BECQUEREL (BQ)

Unité de l'activité d'un radionucléide. 1 Bq est égal à un désintégration par seconde. Il remplace l'unité précédente, le curie (Ci). $1 \text{ Ci} = 3.7 \text{ E}+10 \text{ Bq}$

ORaP, 2012, p.58.

GRAY (GY)

Nom de l'unité de la dose absorbée. $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$

ORaP, 2012, p.58.

REM (REM)

Ancienne unité pour la dose équivalente, la dose absorbée et le débit de dose. Est remplacé par le Sv. $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$

Cours SUVA, 2012, p.29.

SIEVERT (SV)

Nom de l'unité du débit de dose ou de la dose effective. $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} = 100 \text{ rem}$.

ORaP, 2012, p.64.

BIBLIOGRAPHIE

*Les ouvrages et sites conseillés sont signalés par un **

ADR

**Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR). Européen, 1 janvier 2011.*

<http://www.unece.org/fr/trans/danger/publi/adr/adr2011/11contentsf.html>

AEN, 1997

**Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN). Le point sur les rayonnements : applications, risques et protection. OCDE, England, 1997.*

ARCEA/GASN, 2011

Association des retraités du groupe CEA, groupe argumentaire sur le nucléaire (arcea/GASN). Fiche n°1 : Environnement radioactif naturel et artificiel. ARCEA/GASN, 2011.

ASN, 2010

Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Rapport annuel 2010. ASN, France, 2011.

BIMBOT, 2007

**Bimbot, René. Histoire de la Radioactivité : l'évolution d'un concept et de ses applications. Vuibert / Adapt, Paris, 2007.*

BONCHE, 2002

Bonche, Paul. Le nucléaire expliqué par des physiciens. EDP Sciences, France, 2002.

BORDRY, 1996

Bordry, Monique et Radvanyi, Pierre. « La découverte de la radioactivité d'Henri Becquerel à Pierre et Marie Curie ». IN Schubnel, Henri-Jean (dir.). Histoire Naturelle de la radioactivité. Revue de Gemmologie, Paris, 1996, p.17-35.

BORDRY, 1998

Bordry, M. « Les années folles du radium ». IN Bordry, M et Boudia, S (dir.). Les rayons de la vie : Une histoire des applications médicales des rayons X et de la radioactivité en France de 1895 à 1930. Institut Curie, France, 1998, p.116-124.

BORDRY, 1984

Bordry, M et Radvanyi, P. La radioactivité artificielle et son histoire. Du Seuil, Paris, 1984.

BOUDIA, 1998

Boudia, S. « Les fontaines de jouvences : Thermalisme, eaux minérales et radioactivité ». IN Bordry, M et Boudia, S (dir.). *Les rayons de la vie : Une histoire des applications médicales des rayons X et de la radioactivité en France de 1895 à 1930*. Institut Curie, France, 1998, p.126-130.

BRONGNIART, 1877

Brongniart, A. *Traité des arts céramiques ou des poteries*. Tome II, Dessain et Tolra, France, 1877.

BRIGGS, 2002 [EN LIGNE]

Briggs, M. *The Aero-Ektars* [En ligne] 16 janvier 2002 [Consulté le 28 mai 2012].
<http://home.earthlink.net/~michaelbriggs/aeroektar/aeroektar.html>

BUCKLEY, 1980

Buckley, D.W *et al. Environmental Assesment of Consumer Products Containing Radioactive Material*. US Nuclear Regulatory Commision, Washington, 1980.

COSSET, 2011

*Cosset, Jean-Marc et Huynh, Renaud. *La fantastique histoire du radium : Quand un élément radioactif devient potion magique*. Ouest France, France, 2011.

Delacroix, D *et al. Radionucléides et radioprotection : Manuel pour la manipulation de substances radioactives dans les laboratoires de faible et moyenne activité*. 2^{ème} édition, EDP Sciences, France, 2006.

EBINGER, 1912

Ebinger & Isler. « Cadrons et aiguilles lumineux à base de masse lumineuse radio-active » IN *La Fédération Horlogère Suisse*, n°12 de la vingt-septième année, 14 février 1912, p.79-80.

FISHER, 1980

Fisher, Charlie. *Les radioéléments et leurs utilisations*. Eyrolles, Paris, 1980.

FORTIER, 1923

Fortier, Julien. Un paratonnerre au radium pour la captation de l'électricité atmosphérique IN *La Science et la Vie* n°77. Excelsior Publications, 1923, p.369-374.

GENET, 1996

Genet, M. « Le radium : un remède miracle » IN Schubnel, Henri-Jean (dir.). *Histoire Naturelle de la radioactivité*. Revue de Gemmologie, Paris, 1996, p.124-127.

GIANCOLI, 2004

Giancoli, Douglas C. *Physique générale 3 : Ondes, optique et physique moderne*. Les Editions de la Chenelière inc., 2^{ème} édition, 2004, Montréal.

HAYTER [EN LIGNE]

Hayter, T. *Vaseline Glass / Uranium Glass – What is it ?* [En ligne] 1st. Glass 2008 [Consulté le 12 mai 2012]. <http://1st-glass.1st-things.com/vaselineglass.html>

HEALTH PHYSICS SOCIETY [EN LIGNE]

Health Physics Society. *Produits de consommation contenant des éléments radioactifs*. [En ligne] [Consulté le 28 mai 2012] <http://www.cna.ca/french/pdf/nuclearfacts/healthphysicsociety-FR.pdf>

IN2P3

IN2P3. *Comprendre et utiliser les rayonnements*. Conférence [En ligne] IN2P3 [Consulté le 6 juin 2012] http://www.in2p3.fr/physique_pour_tous/aulyce/nepal/presentation.htm

INVENTAIRE NATIONAL DES PARATONNERRES RADIOACTIFS [EN LIGNE]

Inventaire national des paratonnerres radioactifs [En ligne] [Consulté le 15 mai 2012]. <http://www.paratonnerres-radioactifs.fr/>

JOHNSON, 1979

Johnson, J.E. Smoke Detectors containing radioactive materials. IN. Moghissi, Alain et al. « *Radioactivity in consumer products* ». U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1979, p.434-440.

LA RADIOACTIVITE.COM [EN LIGNE]

**La radioactivité.com* [En ligne] [Consulté le 05 juin 2012] <http://www.laradioactivite.com/fr/site/pages/intro.html>

LEFEBVRE, 2007

Lefebvre, T et Raynal, C. « Le mystère Tho-Radia » IN *La Revue du Praticien*, vol. 57, 30 avril 2007, p.922-925.

LEFEBVRE, 2002

*Lefebvre, Thierry et Raynal, Cécile. *L'histoire étonnante du Tho-Radia*. In Revue d'histoire de la pharmacie, n°335, 2002, p. 461-480.

LEUNBERGER, 2005

Leunberger, Ueli. *Elimination des paratonnerres radioactifs*. L'assemblée fédérale – le parlement suisse [en ligne] 31.08.2005 [Consulté le 3 juillet 2012] http://www.parlament.ch/f/suche/pages/geschaefte.aspx?gesch_id=20051063

LRAP

**Loi sur la radioprotection (LRaP)*, Suisse, 22 mars 1991 (Etat le 1^{er} janvier 2007). http://www.admin.ch/ch/f/rs/c814_50.html

LYOUSSI, 210

Lyoussi, A. *Détection de rayonnements et instrumentation nucléaire*. EDP Sciences, France, 2010.

MATTHES, 2002

Matthes, W. *Emaux et glaçures céramiques*. Eyrolles, France, 2002.

MONNIER

*Monnier, R. *Les Heures de la Nuit*. Témoignage écrit recueilli par Le Cahier à Spirale, non daté.

NUCLEONICA [EN LIGNE]

Nucléonica. *Karlsruhe Nuclide Chart*. [En ligne] [Consulté le 7 mai 2012]

<http://www.nucleonica.net/wiki/index.php?title=Category:KNC>

OFSP, DFI

Office fédéral de la santé publique (OFSP). *Détecteur de fumée à ionisation (détecteur incendie) : informations aux consommateurs*.

OFSP, 2010

*Office fédéral de la santé publique (OFSP). *Directives L-04-04 : Matériel historique de l'armée contenant des substances radioactives*. OFSP, Suisse, 2010.

OFSP, 2000

Office fédéral de la santé publique (OFSP). *Manuel suisse du radon*. OFSP, Suisse, 2000.

OFSP, 1999

Office fédéral de la santé publique (OFSP). *Radioactivité et radioprotection*. Brochure de l'OFSP, Suisse, 1999.

ORAP

**Ordonnance sur la radioprotection (ORaP)*, Suisse, 22 juin 1994 (Etat le 1^{er} janvier 2012).

http://www.admin.ch/ch/f/rs/c814_501.html

OURALINE.COM [EN LIGNE]

Ouraline, voir et savoir [En ligne] Ouraline.com [consultée le 28 mai 2012]. <http://www.ouraline.com/>

Portalis, Charlotte. « La différence entre fluorescence et phosphorescence ? » [En ligne] *L'Internaute Science*, Janvier 2008 [11 avril 2012].

<http://www.linternaute.com/science/magazine/expliquez-moi/phosphorescnece-fluorescnece/phospho-fluo.shtml>

PNUE, 1988

Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). *Irradiation : les doses, les effets, les risques*. ADECO, Londres, 1988

RADVANY, 1998

Radvanyi, Pierre. « Nouveaux rayonnements, nouvelles physiques, nouvelles applications ». IN Bordry, Monique et Boudia, Soraya (dir.). *Les rayons de la vie : Une histoire des applications médicales des rayons X et de la radioactivité en France entre 1895 et 1930*. Institut Curie, Paris, 1998, p.6-20.

SCHNEIDER, 2001

*Schneider, S et al. *Systematic Radiological Assessment of Exemptions for Source and Byproduct Materials*. US Nuclear Regulatory Commission, Washington, 2001.

UNION MINIÈRE BELGE

Union Minière Belge. *Radium : appareillage*. Brochure non datée.

UNIVERSALIS [EN LIGNE]

Silvestre-Brac, Bernard. *La radioactivité*. Universalis [En ligne] [Consulté le 7 mai 2012]
<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/radioactivite/>

SDR

*Ordonnance relative au transport des marchandises dangereuses par route. Suisse, 29 novembre 2002.
http://www.admin.ch/ch/f/rs/c741_621.html

SOUCHÈRE, 2005

*Souchère, Marie-Christine. *La radioactivité : mécanismes et applications*. Ellipses, Paris, 2005.

SUVA, 2008

Suva. *Radioprotection lors de l'utilisation (sans manipulation) de sources radioactives de faible activité et d'installations générant des radiations ionisantes avec dispositif de protection totale*. Cours de formation, non publié, 2008.

ZERBIB, 1989

Zerbib, J.C. « Pour un réexamen des données qui fondent la protection des travailleurs contre les rayonnements ». IN Conseil Général de Tarn & Garonne. *Actes du Colloque nucléaire : santé – sécurité, Montauban, 21-22-23 janvier 1988*. Conseil Général de Tarn & Garonne, 1989, p.307-325.

ZÜRCHER, 2009

*Zürcher, M. *Radioactivité dans le matériel de valeur historique et les constructions de l'armée suisse*. DDPS, Suisse, 2009.

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 : Principe de l'expérience de Röntgen. ©Bimbot, 2006, p.6	18
Fig. 2 : Première radiographie de l'Histoire représentant la main de Mme Röntgen. ©Souchère, 2005.....	18
Fig. 3 : Sulfate double d'uranyle et de potassium ayant servi à la découverte de la radioactivité. ©St-Hilaire	19
Fig. 4 : La silhouette de la croix de Malte placée entre la plaque photographique et les sels d'uranium. ©Archives Curie et Joliot-Curie.....	19
Fig. 5 : Les rayons X ont suscité beaucoup d'intérêt et de curiosité auprès des médecins mais aussi du grand public. ©Bimbot, 2006	20
Fig. 6 : Dispositif expérimental utilisé par Pierre et Marie Curie. ©Bimbot, 2006.....	20
Fig. 7 : Frédéric et Irène Joliot-Curie juste après leur découverte en 1934. ©Bordry, 1984	21
Fig. 8 : Publicité pour les bains thermaux d'Evaux-les-Bains, en France. ©Philippe Giraud.	22
Fig. 9 : Appareil Mund en 1929 ©AC & JC	23
Fig. 10 : Appareil d'inhalation de radon. ©Institut Curie	23
Fig. 11 : Flacon de radithor. ©Oak Ridge Associated Universities	24
Fig. 12 : L'affiche la plus connue et la plus réussie de Tho-Radia de Tony Burnand et le modèle, Jacqueline Donny, Miss France 1948, Miss Europe 1949 et ambassadrice de la marque. ©Musée Curie, Institut Curie.	25
Fig. 13 : Montre Glycine aux aiguilles radioluminescentes, 1931. ©MIH.....	26
Fig. 14 : Caricature dénonçant le scandale des Radium Girls. ©swisswatchblog.ch.....	26
Fig. 15 : Publicité de Monnier Radium, entreprise de posage de radium et représentant de Merz & Benteli. ©La fédération horlogère suisse, 1935	27
Fig. 16 : Schéma d'une aiguille à radium avec 1, 2 ou 3 cellules. ©Union Minière Belge	28
Fig. 17 : Boîte à aiguilles et tubes au radium. ©Andra	28
Fig. 18 : Bombe au radium, 1930. ©Musée Curie, Institut Curie.....	28
Fig. 19 : Catelle en céramique. La glaçure noir est en oxyde d'uranium. La photo témoigne de l'activité de cette décoration. ©OFSP	29
Fig. 20 : Verres pour service à digestif en semi-cristal moulé ouraline de la fin du XIX ^{ème} . ©Ouraline	30
Fig. 21 : Lentille Aero Ektar. ©De Vries, 2006	30
Fig. 22 : Lampe à gaz avec manchon aux oxydes de thorium. ©SHAM	31
Fig. 23 : Schéma d'un détecteur de fumée à ionisation. ©CNA.....	31
Fig. 24 : Cigogne perchée sur un parad de la marque Helita. La dégradation de ces appareils pose un problème environnemental. ©INPR	32
Fig. 25 : Rayonnements cosmiques selon l'altitude. ©PNUE, 1988.....	33
Fig. 26 : Doses annuelles de rayonnements résultant des essais nucléaires.....	34
Fig. 27 : Diagramme de stabilité. ©Universalis.....	36
Fig. 28 : Désintégration Alpha ©Souchère, 2005	37

Fig. 29 : Chambre à brouillard de Wilson où est illustré le parcours défini (11.5 cm) des particules alpha de 9 MeV. ©IN2P3.....	37
Fig. 30 : Désintégration Béta moins ©Souchère, 2005.....	37
Fig. 31 : Désintégration Gamma ©Souchère, 2005.....	38
Fig. 32 : Décroissance de l'activité. ©OFSP.....	38
Fig. 33 : Mémorial à Hambourg portant cette inscription "Aux Röntgenologues et radiologues de tous les pays qui ont donné leur vie dans la lutte contre les maux de l'humanité". Inauguré en 1936. ©Futura-Science.....	39
Fig. 34 : Action d'un rayonnement sur une cellule. ©AEN, 1997, p.57.	41
Fig. 35 : Effet d'angle solide. Plus on est proche de la source, plus on a de chances d'être exposé à un rayon. Au contraire, plus on s'éloigne, moins on court de risque d'être exposé. ©HECR Arc, 2012	44
Fig. 36 : Les écrans de blindage des différents rayonnements. ©IN2P3.....	45
Fig. 37 : Compteur Geiger-Müller ©HECR Arc, 2012	57
Fig. 38 : Radiamètre ©HECR Arc, 2012	57
Fig. 39 : Réserve de la collection de lampes et lanternes ©SHAM.....	68
Fig. 40 : Boussole Recta 1 et boussole Recta 2 ©HECR Arc, 2012	70
Fig. 41 : Boussole 7 fermée et ouverte ©HECR Arc, 2012.....	70
Fig. 42 : Boussole 832 ©HECR Arc, 2012.....	70
Fig. 43 : Anémomètre dans sa boîte ©HECR Arc, 2012.....	71
Fig. 44 : Perte de matière au fond de la boîte ©HECR Arc, 2012.....	71
Fig. 45 : Prise de mesures avec le radiamètre. ©HECR Arc, 2012.....	71
Fig. 46 : Le spectromètre gamma. ©HECR Arc, 2012	72
Fig. 47 : Boussole 6 dans le spectromètre ©HECR Arc, 2012	72
Fig. 48 : Frottis fourni par l'IRA ©HECR Arc, 2012.....	73
Fig. 49 : Couvercle de la boîte de l'anémomètre. Le soutien est en contact avec le cadran radioluminescent. ©HECR Arc, 2012	73
Fig. 50 : Atelier de décontamination des cadrans et aiguilles de montres ©RC TRITEC, 2012	74
Fig. 51 : Boussole non traitée à gauche et boussole traitée par RC TRITEC à droite ©HECR Arc, 2012	75
Fig. 52 : Effet photoélectrique. ©IN2P3.....	103
Fig. 53 : Effet Compton. ©IN2P3	103
Fig. 54 : Les quatre chaînes de désintégration ©Wikipédia	104
Fig. 55 : Utilisation d'un statif et d'une noix pour réaliser des mesures comparables ©HECR Arc, 2012 ..	121
Fig. 56 : Frottis fourni par le laboratoire qui réalise l'analyse ©HECR Arc, 2012.....	122
Fig. 57 : Spectrométrie gamma de la boussole 6 ©OFSP, 2012.....	131
Fig. 58 : Affiche publicitaire pour un soda. ©PLS.....	133
Fig. 59 : Fourrage pour animaux de ferme. ©AC & JC	133
Fig. 60 : Boîte de préservatifs Nutex. ©Oak ridge associated Universities	133
Fig. 61 : Boîte de cigarettes. ©Oak ridge associated Universities.....	133
Fig. 62 : Publicité pour des gaines amincissantes. ©AC & JC.....	133

Fig. 63 : Publicité pour la laine IRADIA ©Infonucléaire	133
Fig. 64 : Deux fontaines à radium françaises avec leur certificat d'origine. Les sources se trouvent sur le haut des appareils. ©Musée Curie, Institut Curie.....	134
Fig. 65 : Jarre en carnotite (minerai d'uranium) utilisé comme fontaine à radium aux USA, fin 1920 - début 1930. 0.1 µSv/h ©Radium History Mosaic.....	134
Fig. 66 : Fontaine à radium "Revigators" en céramique dont la glaçure comprend des oxydes d'uranium, 1925-1930. 0.35 µSv/h ©Oak ridge associated Universities.	134
Fig. 67 : Petite fontaine au radium suisse. ©RC TRITEC	134
Fig. 68 : Système de Radium Life pour activer l'eau en radon, 1930-1935. 0.2 µSv/h © Oak ridge associated Universities.....	134
Fig. 69 : Verre d'urane. 1) lumière ambiante. 2) lumière UV. A partie de 1930 ©Oak ridge associated Universities.	135
Fig. 70 : Décoration en verre d'urane, années 1930. 1400 CPS. ©Hayter.....	135
Fig. 71 : Flacon de la cristallerie de Bayel, années 1920. ©Ouraline.com	135
Fig. 72 : Collier en perle de verre d'urane, années 1930. 2750 CPS. ©Hayter	135
Fig. 73 : Collier en perle de verre d'urane, années 1930. 6800 CPS. ©Hayter	135
Fig. 74 : Réveil Bayard, français, dont les aiguilles et le cadran sont peints aux sels de radium. ©Musée Curie, Institut Curie.	136
Fig. 75 : Montre de gousset aux aiguilles et aux chiffres peints aux sels de radium, du type de celles peintes par les Radium girls. ©Musée Curie, Institut Curie.....	136
Fig. 76 : Panneaux militaires de direction radioluminescents. ©Zürcher, 2009.....	136
Fig. 77 : Un appât radioluminescent "Glowboy", années 1920. ©Oak ridge associated Universities.....	136
Fig. 78 : Kit de retouche d'aiguilles et cadrans, de Suisse, 1940-1950. © Oak ridge associated Universities.	136

LISTE DES TABLEAUX

Tab. 1 : Description des couleurs principales pour glaçure à base de minerais d'uranium. ©Matthes, 2002	29
Tab. 2 : Exposition globale d'un individu pour une année.....	35
Tab. 3 : Lésions précoces consécutives à une irradiation globale aiguë ©SUVA, 2008.....	42
Tab. 4 : Les radioéléments susceptibles d'être retrouvés dans les objets patrimoniaux sont en gras. Dans le groupe 1 se trouve que des émetteurs α alors que les autres groupes recensent des émetteurs β et γ . ©IN2P3/CIPR	43
Tab. 5 : W_R pour différents types de rayonnements.....	105
Tab. 6 : W_T pour différents tissus ou organes.....	106
Tab. 7 : Extrait du tableau 2.2.7.2.2.1 de l'ADR.....	126

Annexes

Annexe 1 - CONTACTS

<u>OFSP</u> Division Radioprotection CH-3003 Berne Bureau : Schwarzenburgstr. 165 CH-3097 Liebefeld	Tel : +41 31 322 96 14 E-mail : str@bag.admin.ch Site : http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/index.html?lang=fr
<u>SUVA</u> Physique – Radioprotection Rösslimattstrasse 39 CH-6002 Lucerne	Tel : +41 41 419 61 33 E-mail : physik@suva.ch Site : http://www.suva.ch/fr/
<u>Laboratoire de Spiez</u> Centre de compétences Radioprotection M. Markus Zürcher Ausstrasse CH-3700 Spiez	Tel : +41 33 228 16 43 E-mail : markus.zuercher@babs.admin.ch Site : http://www.labor-spiez.ch/fr/the/st/index.htm
<u>Institut de radiophysique</u> Rue du Grand-Pré 1 CH-1007 Lausanne	Tel : +41 21 31 48 068 E-mail : ira.info@chuv.ch Site : http://www.chuv.ch/ira/
<u>NAGRA</u> Hardstrasse 73 CH-5430 Wettingen	Tel : +41 56 437 11 11 E-mail : info@nagra.ch Site : http://www.nagra.ch/

<u>PSI</u> CH-5232 Villigen	Tel : +41 56 310 21 11 E-mail : info@psi.ch Site : http://www.psi.ch/
<u>ANDRA</u> 1/7, rue Jean Monnet Parc de la Croix-Blanche 92298 Châtenay-Malabry cedex	Tel : +33 01 46 11 83 27 E-mail : collecte-dechets@andra.fr Site : http://www.andra.fr/pages/fr/menu1/l-andra/nos-missions/collecter-les-objets-radioactifs-1107.html
<u>Monyco SA</u> Allée du Quartz 11 CH-2300 La Chaux-de-Fonds	Tel : +41 32 925 97 77 E-mail : info@monyco.ch Site : http://www.monyco.ch/
<u>RC TRITEC AG</u> Speicherstrasse 60A CH-9053 Teufen	Tel : +41 71 335 73 73 Site : http://www.rctrtec.com/

Annexe 2 - FICHES TECHNIQUES DES RADIONUCLÉIDES

Les fiches ci-dessous recensent plusieurs données afin de réunir les informations les plus importantes et utilisées par le personnel de musée par radionucléide. Ceux qui sont décrit ci-dessous sont les plus couramment rencontrés dans les collections de musées. Ces fiches s'inspirent du *guide pratique des radionucléides et radioprotection*¹⁶⁰ qui les a établis pour les travailleurs du nucléaire. Elles ont été simplifiées ou complétées par d'autres informations pour un usage dans les milieux muséaux. Elles sont structurées de la sorte :

- Données physiques
 - Demi-vie du radionucléide.
 - Descendant direct, radionucléide fils.
 - Emetteur des types de rayonnements.
 - Niveau de radiotoxicité selon le *guide pratique des radionucléides et radioprotection*.
 - Activité massique, le nombre de désintégration par unité de temps et par unité de masse.
- Données législatives
 - LA, la limite d'autorisation et LE limite d'exemption selon l'ORaP, annexe 3, colonne 9 et 10.
 - h_{10} et $h_{0,07}$, grandeurs d'appréciation selon l'ORaP, annexe 3, colonne 6 et 7, utilisées comme coefficient dans l'évaluation du débit de dose.
 - A1, valeur de l'activité de matières radioactives sous forme spéciale, et A2, valeur de l'activité de matières radioactives sous forme autre que spéciale, selon l'ADR, utilisées pour le transport des matières dangereuse classe 7.
- Données de radioprotection
 - Source ponctuelle à 30 cm, dose superficielle du rayonnement β et du rayonnement γ .
 - Exposition corporelle, dose superficielle sur une main d'une contamination uniforme ou localisée.
 - Parcours β maximum dans le verre et le plexiglas.
 - e_{inh} et e_{ing} , coefficients selon l'ORaP, annexe 3, colonne 4 et 5, utilisés pour l'évaluation de la dose ingérée.
 - Organes exposés lors de l'inhalation ou de l'ingestion du radionucléide.
- Autres données
 - Utilisation, brèves informations historiques sur l'utilisation du radionucléide dans des objets.

¹⁶⁰ Delacroix, 2006

<i>Demi-vie</i> : 12.3 ans	Tritium ${}^3_1\text{H}$	FAIBLE RADIOTOXICITE
<i>Descendant</i> : -		<i>Activité massique</i> : $3.59 \cdot 10^{14}$ Bq/g
<i>Emetteur</i> : β		
ORaP		ADR
LA : 1 E+08 Bq	h_{10} : <0.001 (mSv/h)/GBq	A1 : 1 E+11 Bq
LE : 2 E+05 Bq	$h_{0.07}$: <1 (mSv/h)/GBq	A2 : 2 E+10 Bq
Exposition externe en Sv/h et pour une activité de 1 Bq		Parcours β max.
<u>Source ponctuelle à 30 cm</u>	<u>Exposition corporelle</u>	<i>Verre</i> : < 0.1 mm
β : 0	Dépôt uniforme (1 Bq/cm ²) : 0	<i>Plexiglas</i> : < 0.1 mm
γ : -	Goutte de 0.05 ml : 0	
Exposition interne en Sv/Bq		
$e_{\text{inhalation}}$: 4.1 E-11	<u>Organes exposés</u>	
$e_{\text{ingestion}}$: 4.2 E-11	Organisme entier ou estomac	
Utilisation		
Peinture luminescente à partir de 1960, interdit d'utilisation à partir 2007 mais emploi abandonné par les industriels dans les années 1990.		

<i>Demi-vie</i> : 29.1 ans	Strontium 90 ${}^{90}_{38}\text{Sr}$	HAUTE RADIOTOXICITE
<i>Descendant</i> : Y-90		<i>Activité massique</i> : $5.21 \cdot 10^{12}$ Bq/g
<i>Emetteur</i> : β		
ORaP		ADR
LA : 6 E+04 Bq	h_{10} : < 0.001 (mSv/h)/GBq	A1 : 3 E+011 Bq
LE : 4 E+02 Bq	$h_{0.07}$: 1000 (mSv/h)/GBq	A2 : 3 E+11 Bq
Exposition externe en Sv/h et pour une activité de 1 Bq		Parcours β max.
<u>Source ponctuelle à 30 cm</u>	<u>Exposition corporelle</u>	<i>Verre</i> : 4.9 mm
β : 2.0 E-04	Dépôt uniforme (1 Bq/cm ²) : 3.5 E-06	<i>Plexiglas</i> : 9.2 mm
γ : -	Goutte de 0.05 ml : 2.0 E-06	
Exposition interne en Sv/Bq		
$e_{\text{inhalation}}$: 7.7 E-08	<u>Organes exposés</u>	
$e_{\text{ingestion}}$: 2.8 E-08	Surfaces osseuses, Poumons, côlon	
Utilisation		
Peinture luminescente entre 1960 et 1990.		

<i>Demi-vie</i> : 1600 ans	Radium 226 $^{226}_{88}\text{Ra}$	HAUTE RADIOTOXICITE
<i>Descendant</i> : Rn-222		<i>Activité massique</i> : $3.30 \cdot 10^{11}$ Bq/g
<i>Emetteur</i> : α , β , γ		
ORaP		ADR
LA : 2 E+03 Bq	h_{10} : 0.001 (mSv/h)/GBq	A1 : 2 E+011 Bq
LE : 4 E+01 Bq	$h_{0.07}$: 50 (mSv/h)/GBq	A2 : 3 E+09 Bq
Exposition externe en Sv/h et pour une activité de 1 Bq		Parcours β max.
<u>Source ponctuelle à 30 cm</u>	<u>Exposition corporelle</u>	<i>Verre</i> : 8.5 mm
β : 2.6 E-10	Dépôt uniforme (1 Bq/cm ²) : 6 E-06	<i>Plexiglas</i> : 15.3 mm
γ : 6.4 E-12	Goutte de 0.05 ml : 3.6 E-06	
Exposition interne en Sv/Bq		
$e_{\text{inhalation}}$: 2.2 E-06	<u>Organes exposés</u>	
$e_{\text{ingestion}}$: 2.8 E-07	Surfaces osseuses, Poumons	
Utilisation		
Peinture luminescente d'avant 1960, matériel médical d'avant 1960, fontaine à radium 1920-1930, paratonnerre d'avant 1990.		

<i>Demi-vie</i> : $1.4 \cdot 10^{10}$ ans	Thorium 232 $^{232}_{90}\text{Th}$	HAUTE RADIOTOXICITE
<i>Descendant</i> : Ra-228		<i>Activité massique</i> : $4.07 \cdot 10^3$ Bq/g
<i>Emetteur</i> : α , β		
ORaP		ADR
LA : 2 E+02 Bq	h_{10} : 0.001 (mSv/h)/GBq	A1 : illimité
LE : 5 E+01 Bq	$h_{0.07}$: 3 (mSv/h)/GBq	A2 : illimité
Exposition externe en Sv/h et pour une activité de 1 Bq		Parcours β max.
<u>Source ponctuelle à 30 cm</u>	<u>Exposition corporelle</u>	<i>Verre</i> : < 0.1 mm
β : 0	Dépôt uniforme (1 Bq/cm ²) : 5.7 E-09	<i>Plexiglas</i> : < 0.1 mm
γ : 1.2 E-13	Goutte de 0.05 ml : 2.1 E-09	
Exposition interne en Sv/Bq		
$e_{\text{inhalation}}$: 2.9 E-05	<u>Organes exposés</u>	
$e_{\text{ingestion}}$: 2.2 E-07	Surfaces osseuses	
Utilisation		
Manchon de lampe à gaz		

<i>Demi-vie</i> : 24.1 jours	Thorium 234 $^{234}_{90}\text{Th}$	HAUTE RADIOTOXICITE
<i>Descendant</i> : Pa-234		<i>Activité massique</i> : $1.71 \cdot 10^{15}$ Bq/g
<i>Emetteur</i> : β, γ		
ORaP		ADR
LA : 9 E+05 Bq	h_{10} : 0.008 (mSv/h)/GBq	A1 : 3 E+11 Bq
LE : 3 E+03 Bq	$h_{0.07}$: 1000 (mSv/h)/GBq	A2 : 3 E+11 Bq
Exposition externe en Sv/h et pour une activité de 1 Bq		Parcours β max.
<u>Source ponctuelle à 30 cm</u>	<u>Exposition corporelle</u>	<i>Verre</i> : 5.5 mm
β : 8.6 E-11	Dépôt uniforme (1 Bq/cm ²) : 2.3 E-06	<i>Plexiglas</i> : 9.0 mm
γ : 1.6 E-13	Goutte de 0.05 ml : 1.4 E-06	
Exposition interne en Sv/Bq		
$e_{\text{inhalation}}$: 5.8 E-09	<u>Organes exposés</u>	
$e_{\text{ingestion}}$: 3.4 E-09	Poumons, gros intestin inférieur	
Utilisation		
Manchon de lampe à gaz		

<i>Demi-vie</i> : -	Thorium naturel $^{nat}_{90}\text{Th}$	RADIOTOXICITE MODEREE
<i>Descendant</i> : /		<i>Activité massique</i> : $4.07 \cdot 10^4$ Bq/g
<i>Emetteur</i> : α, β, γ		
ORaP		ADR
LA : 2 E+01 Bq	h_{10} : 0.355 (mSv/h)/GBq	A1 : illimité
LE : 6 E+00 Bq	$h_{0.07}$: 6000 (mSv/h)/GBq	A2 : illimité
Exposition externe en Sv/h et pour une activité de 1 Bq		Parcours β max.
<u>Source ponctuelle à 30 cm</u>	<u>Exposition corporelle</u>	<i>Verre</i> : 5.2 mm
β : 1.0 E-10	Dépôt uniforme (1 Bq/cm ²) : 3.1 E-06	<i>Plexiglas</i> : 9.4 mm
γ : 2.5 E-12	Goutte de 0.05 ml : 1.4 E-06	
Exposition interne en Sv/Bq		
$e_{\text{inhalation}}$: -	<u>Organes exposés</u>	
$e_{\text{ingestion}}$: -	Surfaces osseuses, voies respiratoires supérieures, poumons	
Utilisation		
Manchon de lampe à gaz		

<i>Demi-vie</i> : -	Uranium naturel $^{nat}_{92}\text{U}$	HAUTE RADIOTOXICITE
<i>Descendant</i> : /		<i>Activité massique</i> : $2.54 \cdot 10^4$ Bq/g
<i>Emetteur</i> : α, β, γ		
ORaP		ADR
LA : $4 \text{ E}+02$ Bq	h_{10} : 0.296 (mSv/h)/GBq	A1 : illimité
LE : $4 \text{ E}+02$ Bq	$h_{0.07}$: 6000 (mSv/h)/GBq	A2 : illimité
Exposition externe en Sv/h et pour une activité de 1 Bq		Parcours β max.
<u>Source ponctuelle à 30 cm</u>	<u>Exposition corporelle</u>	<i>Verre</i> : 8.5 mm
β : $2.2 \text{ E}-10$	Dépôt uniforme ($1 \text{ Bq}/\text{cm}^2$) : $4.2 \text{ E}-06$	<i>Plexiglas</i> : 15.3 mm
γ : $2.1 \text{ E}-12$	Goutte de 0.05 ml : $2.4 \text{ E}-06$	
Exposition interne en Sv/Bq		
$e_{\text{inhalation}}$: -	<u>Organes exposés</u>	
$e_{\text{ingestion}}$: -	Surfaces osseuses, voies respiratoires supérieures	
Utilisation		
DéTECTEURS d'incendie à ionisation, pointe de paratonnerre de 1914 à la fin des années 1980, peinture lumineuse jusqu'en 1960.		

<i>Demi-vie</i> : 432.7 ans	Américium 241 $^{241}_{95}\text{Am}$	HAUTE RADIOTOXICITE
<i>Descendant</i> : Np-237		<i>Activité massique</i> : $1.27 \cdot 10^{11}$ Bq/g
<i>Emetteur</i> : α, β		
ORaP		ADR
LA : $2 \text{ E}+02$ Bq	h_{10} : 0.019 (mSv/h)/GBq	A1 : $1 \text{ E}+13$ Bq
LE : $5 \text{ E}+01$ Bq	$h_{0.07}$: 6 (mSv/h)/GBq	A2 : $1 \text{ E}+09$ Bq
Exposition externe en Sv/h et pour une activité de 1 Bq		Parcours β max.
<u>Source ponctuelle à 30 cm</u>	<u>Exposition corporelle</u>	<i>Verre</i> : < 0.1 mm
β : 0	Dépôt uniforme ($1 \text{ Bq}/\text{cm}^2$) : $1.6 \text{ E}-08$	<i>Plexiglas</i> : < 0.1 mm
γ : $5.3 \text{ E}-13$	Goutte de 0.05 ml : $9.2 \text{ E}-09$	
Exposition interne en Sv/Bq		
$e_{\text{inhalation}}$: $2.7 \text{ E}-05$	<u>Organes exposés</u>	
$e_{\text{ingestion}}$: $2.0 \text{ E}-07$	Surfaces osseuses	
Utilisation		
DéTECTEURS d'incendie à ionisation, pointe de paratonnerre de 1930 à la fin des années 1980.		

Annexe 3 - MARQUES DEPOSEES

Les tableaux ci-dessous sont le résultat du travail de Thierry Lefebvre et Cécile Raynal qui ont recensé toutes les marques déposées entre 1927 et 1934 évoquant le radium ou la radioactivité¹⁶¹.

Marque	Numéro	Date	Société
Atomine	201 760	05.12.32	Boize (L.), Alliot (G.)
Bisuradia	143 404	18.01.29	International Chemical C ^o
Calciradiol	142 969	08.01.29	Pinard (Paul)
Coradium	214 004	28.09.33	C ^{ie} française du radium
Crème alpha-radium	234 381	18.12.34	Société Alexandre et Cie
Crème Radio	229 856	27.08.34	Mourgues (Gabriel)
Crème Radio-Thorium	162 627	28.03.30	Curie (Alfred)
Curadia	226 868	25.06.34	Établissement Veracur
Curadon	226 869	25.06.34	Établissement Veracur
Dermoradol	146 779	22.03.29	Kirillow (Vladimir)
Ema-Rad	236 969		Kirillow (Vladimir)
Homéoradia	233 401	30.11.34	Chavanon (Paul)
Iraldone	128 857	27.03.28	Société Benard et Honnorat
Irradinol		30.10.34	Fournier (Henri)
Irradiocal	171 019	28.10.30	Adam (Louis)
Irradiox	150 075	28.05.29	Le Brazidec (Marcel)
Irrasterine	131 707	21.05.28	Établissement Byla
Irridia	220 722	28.02.34	Prd. radio-actifs de beauté
J'irridie ! Je vivifie ! Je guéris !	233 457		Marcoul (Pierre)
L'Irradiol	135 341	01.08.28	Comte de Grauwe (René)
Laboradium	146 778	22.03.29	Kirillow (Vladimir)
Microradium	189 290	04.02.32	Félix-Guillard-Bribes
Oporadol	122 712	15.12.27	Elmelik (Germaine)
Oxyradio	226 914	27.06.34	Battistini (Timoléon)
Pansements Radiex	194 700	07.06.32	Soc. languedoc. d'articles
Racine " radium "	168 563	19.08.30	Policar accessoires de pêche
Radesia	241 258		Raoult (Paul)
Radia	121 500	23.11.27	Defer (Gaston)
Radia	200 235	09.11.32	Gurlain (Hughes)
Radia	179 245	11.05.31	Hambourger, Buelens et Cie
Radia	141 377	03.12.28	Leyssenne (Félix)
Radia, pharmacie Lamoricières	141 996	11.12.28	Lemoine (Henri)
Radiacetyl	177 568	10.04.31	Toraude (LG)
Radiacure du Dr Simonnet	243 568		Pech (Henri)
Radialba	234 682		Faudernay (Pierre)
Radialgine	146 308	13.03.29	Moreau (Eugène)
Radianimal	136 505	21.08.28	Merkel (Victor)
Radiarsenyl	234 684		Faudernay (Pierre)
Radiatex	228 400	31.07.34	Koch (Léa Michèle)
Radiations	156 540	08.11.29	Prenet SA

¹⁶¹ Lefebvre, 2002, p.477-479.

Radicafirina	165 831	06.08.30	Laboratoires L.G. Toraude
Radio Émanateur Donnet	129 574	30.12.27	Donnet (Louis)
Radio Germe	168 185	06.08.30	Parfumerie Montpelas Steinfels
Radiobalnex	233 926	27.11.34	Institut français du radium
Radiobleu	116 866	26.07.27	Chibret (Henry)
Radiobust	212 003	11.08.33	Echenoz (Maurice)
Radio-Calciline	144 402	05.02.29	Watelet (Abel)
Radiocalcine	135 082	26.07.28	Lacarrère (Pierre)
Radio-Calcium	131 018	09.05.28	Pinard (Pierre)
Radiocarbone	205 741	16.03.33	Pansements brevetés Corbière
Radiodone	218 450	16.01.34	Haas et Masmann (Labo Ely)
Radiofluide	142 822	31.12.28	Rozsavolgui (Aimery)
Radiofor	163 287	10.04.30	Firme Sainte-Anne
Radiogastrol	171 765	21.11.30	Estachy (Joseph Casimir)
Radiogen	185 579	05.11.31	Pregel (Boris)
Radiogut	249 371		Breard (Paul)
Radiogyl	258 232		Fonteneau (Blanche)
Radiol	173 025	20.12.30	Cofman-Nicoresti (Jules)
Radio-lithines du Dr Thiery	171 517	27.08.30	Thiery (Jean)
Radio-Magnésium	138 992	24.10.28	Société française d'énergie...
Radiomalt	146 814	21.03.29	British Drug Houses
Radiomine	126 672	28.02.28	Poulain de Marceval (M.)
Radionine	169 107	05.09.30	Établissement Bernheim
Radio-Osseine	229 640	25.08.34	Fornier (Paul Joseph)
Radiopaque	113 476	19.05.29	Heudebert (Charles)
Radiophos	160 052	25.01.30	Labo. galéniques Vernin
Radioplasme Lysiane	212 356	13.06.33	Benoît (Antoine)
Radioplexol	121 151	16.11.27	Goislard (Georges)
Radioresinol	226 912	27.06.34	Battistini (Timoléon)
Radio-Rinnes	183 823	16.09.31	De Rahlejev (Marie)
Radio-Salil	186 091	20.11.31	Vinas Dordal (Pedro)
Radiosan	229 440	21.08.34	Godfrain (Armand)
Radiosels	159 209	09.01.30	Lauriat et Cie
Radiosels-Vichy	159 210	09.01.30	Lauriat et Cie
Radiosels-Vichy-Étoile	159 211	09.01.30	Lauriat et Cie
Radioseptol	167 893	28.07.30	Labo Oxy
Radioskin	188 010	30.12.31	Echenoz (Maurice)
Radioskin	195 703	04.07.32	Saulny (André)
Radiostol	146 815	21.03.29	British Drug Houses
Radios-Ultra	147 278	28.03.29	Sulblé (Henri)
Radio-Titane	213 296	22.09.33	Deschamps (Pierre)

Radiotropine	154 123	06.09.29	Kirillow (Vladimir)
Radioviva	234 235	21.08.34	Soc. fr. des eaux radioactives...
Radiozol	197 286	18.08.32	Valty (Louis)
Radiozone	197 737	30.08.32	Antonoff (Wladimir), Lang (P.)
Radium Cure	193 015	26.04.32	C ^{ie} fr. des appl. du radium
Radium Vichy-Radium	124 389	14.01.28	Société Vichy-Radium
Radiviril	190 332	26.02.32	SA pour l'ext. des marques
Radiwol	113 217	10.05.27	Blombery Axel Rudolph
Rathoplasm	130 516	02.05.28	SA du radium (SARAD)
Rhodania	118 095	25.08.27	Thoniel (Emmanuel)
Sachet radio-actif Fillais	255 920		Moreau (E.), Cortambert (G.)
Sanguine irradiée	163 551	11.04.30	Riethe (Gaston)
Seléradol	146 780	22.03.29	Kirillow (Vladimir)
Sels radifères de Contrexeville	228 993		Thiery (Jean)
Tho-Radia	201 120	29.11.32	Curie (Alfred)
Toradon	127 270	27.03.28	Toraude (LG)
Tricalirradia	259 999		Perraudin (Eugène)
Uradiol	146 781	22.03.29	Kirillow (Vladimir)
Vichy-Radium	126 660	14.01.28	Société Vichy-Radium
Vita-Ray	181 211	30.06.31	The Ayer Company

Annexe 4 - PRECISIONS EN RADIOPHYSIQUE

LE NOYAU

Rappel

Un atome est composé d'électrons et d'un noyau atomique. Ce dernier est lui-même constitué de protons et de neutrons (les nucléons). Les électrons sont de charge négative, les protons de charge positive et les neutrons de charge neutre. Le noyau est caractérisé par son nombre de protons (Z) et peut ainsi être classifié dans une case du tableau de Mendeleïev. Un nucléide est un noyau d'atome caractérisé par son nombre de protons et de neutrons (N). Il s'écrit avec son symbole chimique X, son numéro atomique Z (le nombre de proton) et sa masse atomique A (la masse ou nombre des nucléons, donc $A = N + Z$) comme ceci¹⁶² : ${}^A_Z X$. Deux atomes au même numéro atomique mais au nombre de neutrons différents sont des isotopes. Ils ont de ce fait les mêmes caractéristiques chimiques mais pas physiques¹⁶³.

Précisions

Ce noyau est constitué uniquement de charges positives et neutres. En effet, les charges positives se repoussent par la force électromagnétique. Si cette force était la seule en jeu au niveau nucléaire, le noyau devrait exploser sans jamais pouvoir se former. Dans ce cas, la matière n'existerait tout simplement pas. Au niveau atomique, une autre force permet à ces nucléons, protons et neutrons, de rester ensemble : l'interaction nucléaire forte. Ainsi, pour les protons, la force de répulsion électrostatique est compensée par la force forte. Les neutrons, sans charge électrique, ne font que s'attirer. Il s'agit d'une force qui opère sur une très courte distance, 10^{-15} m. L'interaction nucléaire forte n'est pas encore totalement comprise et a des caractéristiques étranges. En effet, *"lorsqu'un noyau contient trop ou trop peu de neutrons par rapport au nombre de protons, la force nucléaire est affaiblie"*¹⁶⁴. Ces noyaux affaiblis sont dits instables et sont radioactifs. A cette échelle atomique, les masses sont exprimées en unité d'énergie, l'électronvolt (eV) dont 1 eV est égal à $1.6 \cdot 10^{-19}$ J (joule). Cette unité est définie par « l'énergie acquise par un corpuscule doté d'une charge électrique élémentaire sous l'effet d'une différence de potentiel de 1 volt »¹⁶⁵.

LES RAYONNEMENTS

Alpha

Avec une émission de particule α , le noyau père perd deux protons et se transforme par conséquence en un autre noyau d'un autre élément (on parle de noyau fils) : ${}^A_Z X_N \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} X_{N-2} + {}^4_2 \text{He}$. Cette transformation

¹⁶² Fisher, 1980, p.14-15.

¹⁶³ Sylvestre-Brac, Bernard, Universalis [En ligne].

¹⁶⁴ Giancoli, 2004, p.359.

¹⁶⁵ La radioactivité.com [En ligne].

d'un noyau à un autre est une transmutation¹⁶⁶. L'énergie dégagée par cette transmutation est particulière et unique pour chaque radionucléide et peut être considérée comme une signature de ce dernier¹⁶⁷, appelée spectre énergétique.

Un exemple est la transmutation du radium 226 en radon 222 comme ceci : ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + \frac{4}{2}\text{He}$.

Bêta

Les radioéléments émettant du rayonnement β^- ont un surplus de neutrons. Le radionucléide transforme alors un neutron en proton et afin de conserver la charge électrique initiale, l'énergie libérée est émise du noyau sous la forme d'un électron afin de compenser la charge positive supplémentaire. Cette émission est également accompagnée de celle d'une petite particule neutre de masse infinitésimale, l'antineutrino (Fig. 30)¹⁶⁸ : $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$. Il s'agit ici aussi d'une transmutation puisque le radionucléide change d'élément. Comme le nombre de protons (Z) change mais pas le nombre de nucléons (A), on parle d'isobare¹⁶⁹.

Un exemple est la transmutation du carbone 14 en azote : ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}$.

Pour la radioactivité β^+ , il s'agit des radionucléides qui ont trop de protons. Il s'y passe alors le processus inverse. Un proton se transforme en neutron et un électron de charge positive¹⁷⁰, appelé positron ou positon ou bien encore antiélectron, est émis avec un neutrino¹⁷¹ : $p \rightarrow n + e^+ + \nu$.

Un exemple de radioactivité β^+ est la transmutation du néon 19 en fer 19 : ${}^{19}_{10}\text{Ne} \rightarrow {}^{19}_9\text{F} + e^+ + \nu$

Gamma

Le noyau fils, après une transmutation, est parfois encore à l'état excité et contient trop d'énergie. Il l'expulse sous forme de photons de très haute énergie (Fig. 31). Cela permet au noyau de se réarranger. Cette forme de rayonnement n'a pas de charge et ne modifie donc pas le nombre respectif de nucléons. Cette décharge d'énergie permet au nucléide de retourner à l'état énergétique fondamental¹⁷². Les rayons γ sont très différents des particules α ou β car *"ils ne produisent aucun effet avant d'interagir avec un noyau ou un électron. Quand ils interagissent, ils mettent en mouvement des particules chargées. Ce sont elles qui déposeront l'énergie dans la matière."*¹⁷³. Il y a deux façons pour qu'un rayon γ interagisse. Si son énergie est similaire à celle de l'énergie de liaison, le rayon γ arrache un électron de cœur à l'atome.

¹⁶⁶ Souchère, 2005, p.23-24.

¹⁶⁷ Sylvestre-Brac, Bernard, Universalis [En ligne].

¹⁶⁸ Souchère, 2005, p.24.

¹⁶⁹ Fisher, 1980, p.22.

¹⁷⁰ Cela peut paraître surprenant, mais il s'agit bien d'un électron positif caractéristique de ce rayonnement.

¹⁷¹ Giancoli, 2004, p.364.

¹⁷² Giancoli, 2004, p.365.

¹⁷³ La radioactivite.com [En ligne].

Par "cascades" successives, les électrons des couches supérieures retombent dans la couche laissée libre et l'atome excité émet des photons de fluorescence qui sont généralement des rayons X. Il s'agit dans ce cas de l'effet photoélectrique (Fig. 52). L'effet Compton se passe lorsque l'énergie du rayon γ est supérieure à celle de l'énergie de liaison. Le rayon γ percute un électron qui s'extrait du cortège électronique et qui possède les mêmes caractéristiques qu'un électron β^- . L'autre partie de l'énergie est retransmise sous la forme d'un deuxième rayon γ (Fig. 53).

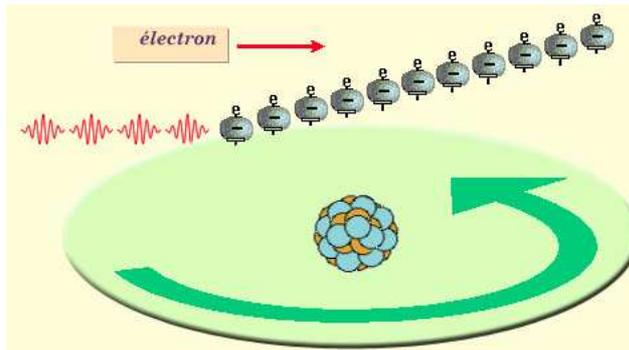


Fig. 52 : Effet photoélectrique. ©IN2P3

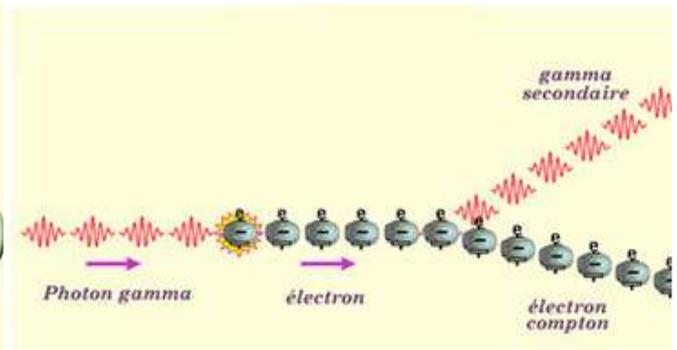


Fig. 53 : Effet Compton. ©IN2P3

Annexe 5 - CHAINES DE DESINTEGRATION

Les différents radionucléides présentés sur le diagramme sont les principaux rencontrés dans les chaînes. En réalité, il existe des ramifications diverses mais qui ne peuvent exister que de façon artificielle. Naturellement, il existe aussi des chaînes beaucoup plus courtes comme celle du carbone-14, mais la majorité des radionucléides artificiels sont créés en laboratoire depuis l'une de ces quatre chaînes principales.

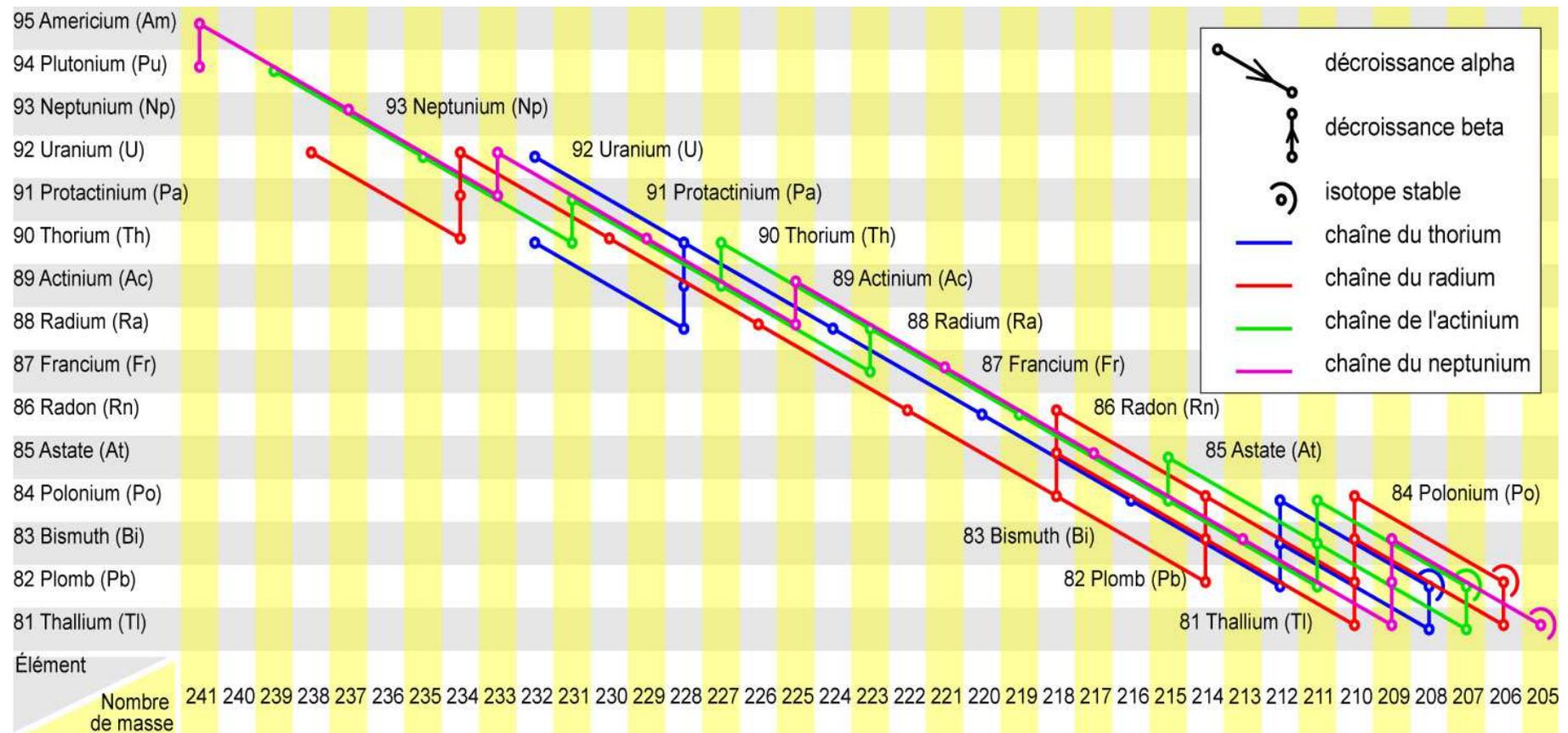


Fig. 54 : Les quatre chaînes de désintégration ©Wikipédia

Annexe 6 - DEFINITIONS DES DIFFERENTES DOSES

DOSE ABSORBEE

Un rayonnement traversant la matière y dépose une partie ou la totalité de son énergie. Avant d'atteindre l'échantillon, le rayonnement est absorbé par l'air, les écrans de protection et autres matériaux sur son chemin. Ainsi, les rayonnements α et β sont très rapidement arrêtés par l'air ou des matériaux fins (papier, polymère), ce qui n'est pas le cas du rayonnement γ . La dose absorbée s'exprime en gray (Gy)* et dont un gray équivaut à un joule par kilogramme de matière (J/kg). L'ancienne unité est le rad (1 Gy = 100 rad). Il est possible de calculer cette dose en prenant en compte ces divers facteurs mais dans les faits, un dosimètre est utilisé pour la mesurer¹⁷⁴.

DOSE EQUIVALENTE

Il s'agit d'une amélioration de la dose absorbée qui prend en compte la nature du rayonnement. De façon empirique, les scientifiques se sont rendu compte que *"pour une même valeur de la dose absorbée, les photons, les neutrons ou les particules alpha n'ont pas la même efficacité biologique"*¹⁷⁶. Pour une même dose équivalente, l'effet du rayonnement sur un organe est toujours identique, indépendamment du type de radionucléide ou du type d'irradiation (interne ou externe)¹⁷⁷.

Le calcul s'écrit ainsi : $H_T (Sv) = W_R \cdot D_{TR} (Gy)$ où H_T est la dose équivalente pour un tissu ou un organe (le H fait référence à l'Homme, le T au tissu ou organe), W_R est la pondération selon le rayonnement (Tab. 5) et D est *"l'énergie déposée par kg de tissu par le rayonnement R"*¹⁷⁸. Si plusieurs rayonnements entrent en compte : $H_T (Sv) = \sum_R (W_R \cdot D_{TR}) (Gy)$.

Types de rayonnements et énergies		W_R
X, γ (toutes énergies)		1
β^-, β^+ et électrons		1
	< 10 keV	5
	de 10 à 100 keV	10
	de 100 keV à 2 MeV	20
	de 2 MeV à 20 MeV	10
Neutrons	> 20 MeV	5
Protons (autres que protons de recul)	> 2 MeV	5
α , fragments de fission, noyaux lourds		20

Tab. 5 : W_R pour différents types de rayonnements¹⁷⁵.

¹⁷⁴ La radioactivité.com [en ligne] <http://www.laradioactivite.com/fr/site/pages/lesdosesabsorbees.htm>

¹⁷⁵ Delacroix, 2006, p.8.

¹⁷⁶ Delacroix, 2006, p.8.

¹⁷⁷ Bonche, 2002, p.42.

¹⁷⁸ Bonche, 2002, p.42.

DOSE EFFICACE

La dose efficace permet de calculer l'effet des rayonnements sur l'ensemble de l'organisme vivant selon la nature du rayonnement et de l'endroit où les doses sont absorbées en tenant compte de la sensibilité des tissus. Il s'agit donc de l'impact de la somme des doses équivalentes sur l'organisme entier selon la sensibilité de l'organe.

Le calcul s'écrit ainsi : $E(Sv) = \sum_T (W_T \cdot H_T) (Sv)$ où E est égal à la dose efficace, W_T est la sensibilité selon l'organe ou le tissu et H_T est la dose équivalente¹⁷⁹.

Tissus ou organe	W_T
Gonades	0.2
Moelle osseuse (rouge)	0.12
Colon	0.12
Poumons	0.12
Estomac	0.12
Vessie	0.05
Sein	0.05
Foie	0.05
Œsophage	0.05
Thyroïde	0.05
Peau	0.01
Surface des os	0.01
Autres	0.05

Tab. 6 : W_T pour différents tissus ou organes¹⁸⁰.

¹⁷⁹ Bonche, 2002, p.42.

¹⁸⁰ Delacroix, 2006, p.8.

Annexe 7 - FORMULES

AGE D'UNE SOURCE SELON SON ACTIVITE

En connaissant l'activité initiale d'une source, il est possible de calculer son activité selon son âge actuel ou inversement : $A = \frac{1}{2^n} \cdot A_0$ où A est l'activité du moment t, A_0 est l'activité initiale et n est le nombre de périodes.

EVALUATION DU DEBIT DE DOSE

Il est possible d'estimer le débit de dose d'une substance selon son activité et un coefficient donné en colonne 6, annexe 3 de l'ORaP. Ou inversement, l'activité peut être estimée si le débit de dose est connu.

$$\dot{H} = \frac{A \cdot h_{10}}{d^2}$$

\dot{H} = débit de dose en mSv/h	h_{10} = constante du débit de dose en mSv/h par GBq à 1 m de distance, soit $\frac{mSv \cdot m^2}{h \cdot GBq}$
A = Activité en GBq	<i>peut être remplacé par :</i>
d = distance entre la mesure et la source en m	$h_{0.07}$ = constante du débit de dose en mSv/h par GBq à 0.1 m de distance, soit $\frac{mSv \cdot m^2}{h \cdot GBq}$

LOI DU CARRE DE LA DISTANCE

Le rayonnement radioactif perd de son intensité selon la distance dont l'expression mathématique est la suivante :

$$d_1^2 \cdot \dot{H}_1 = d_2^2 \cdot \dot{H}_2$$

d_1 = distance entre la source et \dot{H}_1 en m	\dot{H}_1 = débit de dose à la distance d_1 en Sv/h
d_2 = distance entre la source et \dot{H}_2 en m	\dot{H}_2 = débit de dose à la distance d_2 en Sv/h

IRRADIATION INTERNE

L'irradiation interne peut avoir lieu lors de l'ingestion d'un radionucléide. Il est possible de définir la dose effective ingérée en Sv.

$E_{50} = A \cdot e_{ing}$	E_{50} = dose effective engagée en Sv	e_{ing} = Coefficient de dose pour l'ingestion selon la colonne 5 de l'annexe 3 de l'ORap
$E_{50} = A \cdot e_{inh}$	A = Activité incorporée en Bq	e_{inh} = Coefficient de dose pour l'inhalation selon la colonne 4 de l'annexe 3 de l'ORap

Annexe 8 - EXTRAITS DE LA REGLEMENTATION

Il n'a pas été choisi de placer dans ce document l'intégralité des textes car le nombre de pages est trop élevé et parce que les textes sont réédités régulièrement. Nous conseillons vivement de se procurer à chaque fois la dernière version des textes légaux qui peuvent être trouvés sur le site internet des autorités fédérales de la Confédération suisse. Il a donc été choisi de présenter seulement les extraits directement utiles à la position du musée vis-à-vis des bases légales sur la radioactivité.

LRAP / ORAP

Les extraits retranscrits proviennent de la Loi sur la Radioprotection (LRaP) du 22 mars 1991 (Etat le 1^{er} janvier 2007) et de l'Ordonnance sur la Radioprotection (ORaP) du 22 juin 1994 (Etat le 1^{er} janvier 2012).

LRaP : http://www.admin.ch/ch/f/rs/c814_50.html

ORaP : http://www.admin.ch/ch/f/rs/c814_501.html

Bases légales de la définition

LRaP Art. 2 Champ d'application

¹ La présente loi s'applique à toutes les activités, à toutes les installations, à tous les événements et à toutes les situations qui peuvent présenter un danger lié à des rayonnements ionisants, notamment:

- a. à la manipulation de substances radioactives ainsi que d'appareils, installations et objets contenant des substances radioactives ou pouvant émettre des rayonnements ionisants;
- b. aux événements qui peuvent provoquer une augmentation de la radioactivité de l'environnement.

² Par manipulation, on entend la production, la fabrication, le traitement, la commercialisation, le montage, l'utilisation, l'entreposage, le transport, l'évacuation, l'importation, l'exportation, le transit ainsi que toute autre forme de remise à un tiers.

⁴ Le Conseil fédéral peut prévoir des dérogations à la présente loi pour les substances faiblement radioactives.

ORaP Art. 1 Champ d'application

¹ La présente ordonnance s'applique aux substances, objets et déchets dont l'activité, la concentration, la contamination, le débit de dose ou la masse excèdent les valeurs indiquées à l'annexe 2¹⁸¹.

¹⁸¹ Voir p.113.

ORaP Art. 2 Exceptions

- ¹ La présente ordonnance ne s'applique pas à la manipulation de matières premières d'origine et de composition de nucléides naturelles qui ne sont pas mentionnées à l'annexe 2 et délivrant une dose inférieure à 1 mSv par an.
- ² Elle ne s'applique pas aux substances d'une activité spécifique inférieure à la limite d'exemption selon l'annexe 3, colonne 9, et d'un débit de dose ambiante, à 10 cm de la surface, après déduction du bruit de fond, supérieur à 0,1 µSv par heure, lorsque la preuve a été fournie à l'autorité de surveillance que personne n'accumulera jamais une dose effective supérieure à 10 µSv par année.

Basés légales sur les autorisations

LRaP Art. 6 Qualification du personnel

- ¹ Les activités pouvant présenter un danger lié à des rayonnements ionisants ne doivent être confiées qu'à des personnes qualifiées.
- ² Le Conseil fédéral fixe les exigences relatives aux qualifications du personnel.

LRAP Art. 16 Responsabilité au sein des entreprises

- ¹ Le détenteur de l'autorisation ou les personnes dirigeant une entreprise répondent de l'observation des prescriptions en matière de radioprotection. Elles engagent à cet effet un nombre approprié d'experts et leur donnent les attributions et les moyens requis.
- ² Toutes les personnes occupées au sein d'une entreprise sont tenues de seconder la direction de l'exploitation et les experts dans l'application des mesures de radioprotection.

LRaP Art. 28 Régime de l'autorisation

Doit être titulaire d'une autorisation celui qui :

- a. manipule des substances radioactives ou des appareils et objets contenant de telles substances.

LRaP Art. 31 Conditions

L'autorisation est délivrée lorsque:

- a. le requérant ou un expert mandaté par lui (art. 16) possède les qualifications nécessaires

ORaP Art. 18 Experts

- ¹ Les experts visés à l'art. 16 LRaP doivent justifier d'une formation en radioprotection sanctionnée par un examen, reconnue par l'autorité de surveillance et adaptée à leur activité et à leurs responsabilités, ainsi que de bonnes connaissances de la législation sur la radioprotection.

ORaP Art. 132 Devoirs ayant trait à l'organisation

¹ Le titulaire de l'autorisation doit établir pour son entreprise des instructions sur les méthodes de travail et les mesures de protection à prendre et surveiller leur application.

ORaP Art. 10 Principe sur les qualifications

¹ Les personnes utilisant des rayonnements ionisants doivent avoir une formation en matière de radioprotection et suivre des cours de perfectionnement correspondant à leur activité et à leur responsabilité.

² La formation doit garantir que ces personnes :

- a. connaissent bien les règles de base de la radioprotection ;
- b. possèdent une technique de travail appropriée ;
- c. sont à même d'appliquer les prescriptions en matière de radioprotection se rapportant à leur activité ;
- d. connaissent les risques que peut impliquer une exposition aux rayonnements due à un comportement inapproprié ;
- e. sont informées des dangers pour la santé qu'implique leur travail avec des rayonnements ionisants.

Bases légales sur le stockage

ORaP Art. 58 Zones contrôlées

¹ Le titulaire de l'autorisation doit établir des zones contrôlées aux fins de limiter et de contrôler l'exposition aux rayonnements.

² Les zones contrôlées doivent être délimitées de manière distincte et marquées conformément à l'annexe 6.

³ Le titulaire de l'autorisation doit contrôler l'accès aux zones contrôlées et le séjour dans celles-ci.

ORaP Art. 59 Blindage

¹ Le local ou la zone dans lesquels sont utilisées ou entreposées des installations fixes ou des sources radioactives doivent être conçus ou blindés de façon que, compte tenu de la fréquence d'exploitation:

- a. à aucun endroit situé dans l'enceinte de l'entreprise, mais en dehors des zones contrôlées, et où peuvent séjourner des personnes exposées aux rayonnements dans des circonstances non liées à l'exercice de leur profession, la dose ambiante n'excède 0,02 mSv par semaine; cette valeur peut être dépassée jusqu'à cinq fois dans les endroits où personne ne séjourne durablement.
- b. à aucun endroit situé en dehors de l'enceinte de l'entreprise, les valeurs limites d'émissions précisées à l'art. 102 ne soient dépassées.

² Avec l'assentiment de l'autorité de surveillance, le débit de dose peut atteindre localement jusqu'à 0,0025 mSv par heure dans des endroits rarement fréquentés, situés en dehors des zones contrôlées comprises dans l'enceinte d'une entreprise sous surveillance constante, dans lesquels le dépassement de la valeur limite de dose selon l'art. 37 est empêché par des mesures appropriées.

ORaP Art. 75 Stockage

¹ Les sources radioactives dont l'activité excède la limite d'autorisation indiquée à l'annexe 3, colonne 10, doivent être stockées de manière à n'être accessibles qu'aux personnes habilitées à les utiliser.

Bases légales sur les déchets radioactifs

LRaP Art. 25 Définitions, principes

¹ Par déchets radioactifs on entend les substances radioactives et les matières contaminées par elles qui ne seront pas réutilisées.

² Les substances radioactives doivent être manipulées de manière à produire le moins possible de déchets radioactifs.

LRaP Art. 26 Manipulation des déchets radioactifs dans l'entreprise et rejet dans l'environnement

¹ Dans l'entreprise, les déchets radioactifs doivent être traités et entreposés de manière à dégager le moins possible de substances radioactives dans l'environnement.

² Le Conseil fédéral fixe les conditions auxquelles des déchets radioactifs de faible activité peuvent être rejetés dans l'environnement.

³ Lorsqu'il n'est pas permis de les rejeter dans l'environnement, les déchets radioactifs doivent être retenus d'une manière appropriée ou confinés de manière sûre, et au besoin être solidifiés, collectés et entreposés dans un endroit approuvé par l'autorité de surveillance jusqu'à leur livraison ou à leur exportation.

LRaP Art. 27 Livraison

¹ Celui qui produit des déchets radioactifs ne provenant pas de l'utilisation de l'énergie nucléaire doit les livrer en un lieu désigné par l'autorité compétente.

² Il supporte les frais d'évacuation.

³ Le Conseil fédéral règle le traitement des déchets dans l'exploitation et leur livraison.

ORaP Art. 79 Rejet dans l'environnement

¹ Les déchets radioactifs ne peuvent être rejetés dans l'environnement qu'avec une autorisation et sous le contrôle du titulaire de l'autorisation.

² Seuls les déchets faiblement radioactifs peuvent être rejetés dans l'environnement.

Base légales pour l'expédition de matières radioactives

LRaP Art. 2 Champ d'application

² Par manipulation, on entend la production, la fabrication, le traitement, la commercialisation, le montage, l'utilisation, l'entreposage, le transport, l'évacuation, l'importation, l'exportation, le transit ainsi que toute autre forme de remise à un tiers.

ORaP Art. 125 Régime de l'autorisation

³ Sont soustraits au régime de l'autorisation :

- a. les travaux avec des substances radioactives dont l'activité appliquée ou utilisée par jour ne dépasse pas la limite d'autorisation indiquée à l'annexe 3, colonne 10 ;
- b. la commercialisation, l'utilisation, le stockage, le transport, l'élimination, l'importation, l'exportation et le transit de montres prêtes à l'usage contenant des substances radioactives, si elles satisfont aux normes ISO109 3157110 et 4168111, et de 1000 composants de montres au plus contenant de la peinture luminescente radioactive ;
- c. le transport de substances radioactives dans des colis exceptés (numéros UN 2908, 2909, 2910 et 2911, selon annexe A, al. 3.2.1, tab. A ADR113/SDR114, RID/RSD115, RTA116, O du 10 janv. 1973 sur le transport de marchandises dangereuses par mer117, ADN118)

ORaP Art. 76 Transport en dehors de l'enceinte de l'entreprise

¹ La personne qui transporte ou fait transporter des sources radioactives en dehors de l'enceinte de l'entreprise doit respecter les prescriptions fédérales concernant le transport des marchandises dangereuses.

⁵ L'expéditeur et le transporteur doivent s'assurer que les récipients de transport ou les emballages sont conformes aux prescriptions et bien entretenus.

Bases légales pour une intervention

LRaP Art. 8 Justification de l'exposition aux radiations

Une activité par laquelle l'homme ou l'environnement sont exposés à des rayonnements ionisants (exposition aux radiations) ne doit être exercée que si elle se justifie par rapport aux avantages et aux dangers qui y sont liés.

ORaP Art. 63 Instruments de mesure des rayonnements

² Des instruments de mesure appropriés, destinés à contrôler le débit de dose ou la contamination, doivent être en tout temps à disposition dans les locaux ou les zones dans lesquels sont utilisées des sources radioactives.

Annexe 2 de l'ORaP

Radioprotection. O

814.501

*Annexe 2*¹⁵⁸
 (art. 1, al. 1, et 2, al. 1)

Champ d'application

1. Substances et objets

L'ordonnance est applicable lorsque toutes les valeurs figurant sur une ligne au moins sont dépassées pour une substance ou un objet.

Seule la dernière ligne est applicable aux minerais et aux collections de minéraux et de pierres.

Substances, objets	Activité spécifique	Activité absolue, masse	Concentration, contamination, débit de dose
Substances solides	Limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9	Limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9	
Substances solides			Débit de dose ambiante à 10 cm de la surface après déduction du bruit de fond: 0,1 μ Sv par heure
Substances solides			Valeur directrice selon annexe 3, colonne 12
Liquides	Limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9	Limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9	
Eau	1 % de la limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9	Limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9	
Gaz et air (radon inclus)			1/300 de la valeur directrice selon annexe 3, colonne 11
Denrées alimentaires	Valeurs de tolérance et valeurs limites selon l'ordonnance du 26 juin 1995 sur les substances étrangères et les composants ¹⁵⁹		
Objets usuels	1 % de la limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9, pour les radionucléides artificiels	Limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9	
Minerais, collections de minéraux et de pierres	1000 fois la limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9	10 g de thorium nat. et 100 g d'uranium nat.	

¹⁵⁸ Nouvelle teneur selon le ch. II de l'O du 17 nov. 1999, en vigueur depuis le 1^{er} janv. 2000 (RO 2000 107).

¹⁵⁹ RS 817.021.23

814.501

Protection de l'équilibre écologique

2. Déchets et eaux usées

L'ordonnance est applicable aux déchets et aux eaux usées lorsque toutes les valeurs figurant sur une ligne au moins sont dépassées.

L'indication «par mois» se rapporte aux rejets dans l'environnement.

Déchets, eaux usées	Activité spécifique	Activité absolue par autorisation	Contamination, débit de dose
Déchets solides	Limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9	100 fois la limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9, par mois	
Déchets solides			Débit de dose ambiante à 10 cm de la surface après déduction du bruit de fond: 0,1 µSv par heure
Déchets solides			Valeur directrice selon annexe 3, colonne 12
Déchets liquides	Limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9	100 fois la limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9, par mois	
Eaux usées	1 % de la limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9 (en moyenne par semaine dans les eaux usées de la zone de travail)	100 fois la limite d'exemption selon annexe 3, colonne 9, par mois	
Déchets sous forme gazeuse (enfermés)		Limite d'autorisation selon annexe 3, colonne 10	

SDR / ADR

Les extraits retranscrits proviennent de l'ordonnance relative au transport des marchandises dangereuses par route (SDR) du 29 novembre 2002 (Etat le 1^{er} janvier 2011) et de L'accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR) en vigueur le 1^{er} janvier 2011.

SDR http://www.admin.ch/ch/f/rs/c741_621.html

ADR <http://www.unece.org/fr/trans/danger/publi/adr/adr2011/11contentsf.html>

Droit international

SDR Art.4 Droit international

¹Les dispositions de l'ADR sont applicables également au transport des marchandises dangereuses par route dans le trafic national. Les Annexes A et B de l'ADR font partie intégrante de la présente ordonnance.

²L'Office fédéral des routes (OFROU) tient une liste des autres accords internationaux auxquels la Suisse a adhéré dans le cadre de l'ADR.

Classification

ADR 2.2.7 Classe 7 – Matières radioactives

ADR 2.2.7.2.1.1 Dispositions générales

Les matières radioactives doivent être affectées à l'un des numéros ONU spécifiés au tableau 2.2.7.2.1.1.

ADR 2.2.7.2.4 Classification des colis ou des matières non emballées

La quantité de matières radioactives dans un colis ne doit pas dépasser celle des limites pour le type de colis comme indiqué ci-dessous.

Colis exceptés

ADR 2.2.7.2.4.1.1 Classification comme colis excepté si :

- a) Ce sont des emballages vides ayant contenu des matières radioactives ;
- b) Ils contiennent des appareils ou des objets respectant les limites d'activité spécifiées au tableau 2.2.7.2.4.1.2 ;
- c) Ils contiennent des objets manufacturés ou de l'uranium naturel, de l'uranium appauvri ou du thorium appauvri ;

- d) Ils contiennent des matières radioactives en quantités limitées respectant les limites d'activité spécifiées au tableau 2.2.7.2.4.1.2

ADR 2.2.7.2.4.1.2

Un colis contenant des matières radioactives peut être classé en tant que colis excepté à condition que l'intensité de rayonnement en tout point de sa surface externe ne dépasse pas 5 µSv/h

ADR 2.2.7.2.4.1.3

Une matière radioactive qui est enfermée dans un composant ou constitue un composant d'un appareil ou autre objet peut être classée sous le No ONU 2911 MATIERES RADIOACTIVES, APPAREILS OU OBJETS EN COLIS EXCEPTES, seulement si :

- a) L'intensité de rayonnement à 10 cm de tout point de la surface externe de tout appareil ou objet non emballé n'est pas supérieur à 0.1 mSv/h; et
- b) Chaque appareil ou objet manufacturé porte l'indication "RADIOACTIVE" à l'exception :
 - i) Des horloges ou des dispositifs radioluminescents ;
 - ii) Des produits de consommation qui ne dépassent pas individuellement la limite d'activité pour un envoi exempté indiquée au tableau 2.2.7.2.2.1 (colonne 5), sous réserve que ces produits soient transportés dans un colis portant l'indication "RADIOACTIVE" sur une surface interne de façon que la mise en garde concernant la présence de matières radioactives soit visible quand on ouvre le colis ; et
- c) Les limites spécifiées dans les colonnes 2 et 3 du tableau 2.2.7.2.4.1.2 sont respectées pour chaque article et pour chaque colis respectivement.

ADR 2.2.7.2.4.1.4

Les matières radioactives sous des formes autres que celles qui sont spécifiées au 2.2.7.2.4.1.3 et dont l'activité ne dépasse pas les limites indiquées dans la colonne 4 du tableau 2.2.7.2.4.1.2 peuvent être classées sous le No ONU 2910 MATIERES RADIOACTIVES, QUANTITES LIMITEES EN COLIS EXCEPTES, à condition que :

- a) Le colis retienne son contenu radioactif dans les conditions de transport de routine ; et
- b) Le colis porte l'indication "RADIOACTIVE" sur une surface interne, de telle sorte que l'on soit averti de la présence de matières radioactives à l'ouverture du colis.

Emballage

ADR 6.4.4 Prescriptions concernant les colis exceptés

Les colis exceptés doivent être conçus pour satisfaire aux prescriptions énoncées au 6.4.2

ADR 6.4.2 Prescriptions générales à la construction des colis pour les matières de la classe 7

- 6.4.2.2 Le modèle doit être tel qu'aucune prise de levage sur le colis ne se rompe en utilisation prévue et que, en cas de rupture, le colis continue de satisfaire aux autres prescriptions de la présente annexe.
- 6.4.2.3 Les prises et toutes autres aspérités de la surface externe du colis qui pourraient être utilisées pour le levage doivent être conçues pour supporter la masse du colis conformément aux prescriptions énoncées au 6.4.2.2 ou doivent pouvoir être enlevées ou autrement rendues inopérantes pendant le transport.
- 6.4.2.4 Dans la mesure du possible, l'emballage doit être conçu et fini de sorte que les surfaces externes ne présentent aucune saillie et puissent être facilement décontaminées.
- 6.4.2.5 Autant que possible, l'extérieur du colis doit être conçu de façon à éviter que l'eau ne s'accumule et ne soit retenue à la surface.
- 6.4.2.9 Toutes les vannes à travers lesquelles le contenu radioactif pourrait s'échapper doivent être protégées contre toute manipulation non autorisée.

Annexe 9 - DIRECTIVES DDP



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'intérieur DFI
Office fédéral de la santé publique OFSP
Unité de direction Protection des consommateurs

page 1/2

Division Radioprotection
www.str-rad.ch

Référence du document : L-04-04mf.doc
Etabli le : 16.11.2010
Révision n° :

Directive L-04-04 **Matériel historique de l'armée contenant des substances radioactives**

1. But

La présente directive règle la possession et la remise à des tiers de matériel historique de l'armée qui contient des quantités de substances radioactives nécessitant une autorisation.

2. Dispositions légales, régime de l'autorisation

Selon la législation en vigueur [1] [2], la manipulation de substances radioactives présentant une activité supérieure à la limite d'autorisation (annexe 3 de l'ORaP, colonne 10) [2] nécessite une autorisation. Par manipulation, on entend, dans le cas présent, la collecte, l'entreposage, l'exposition, l'utilisation ou la remise à des tiers de matériel historique de l'armée contenant des substances radioactives. Cette problématique concerne principalement les appareils et les instruments équipés de voyants ou de repères lumineux contenant du radium, utilisés dans des engins terrestres ou aériens.

L'Office fédéral de la santé publique (OFSP) peut autoriser la manipulation de rayonnements ionisants lorsque celle-ci se justifie (art. 8 LRaP [1] et art. 5 ORaP [2]) et que les conditions nécessaires à l'obtention d'une autorisation mentionnées à l'art. 31 LRaP [1] sont remplies.

3. Contexte

Le Département fédéral de la défense, de la protection de la population et des sports (DDPS) possède du matériel historique de l'armée qui contient des substances radioactives. Afin d'éviter la dispersion de ces dernières, le DDPS n'est, en principe, plus autorisé à remettre ce type d'objets à des tiers. Avant la remise, les parties radioactives doivent donc être enlevées ou décontaminées par une entreprise dûment autorisée [3], ceci aux frais de l'acquéreur. Cette règle vaut également en cas de remise à des personnes ou des institutions déjà autorisées à manipuler des substances radioactives. Moyennant l'accord de l'OFSP, des exceptions en cas de prêt ou de remise sont possibles lorsque la fonction de l'objet doit être conservée ou lorsque la décontamination ou l'élimination de la peinture luminescente n'est pas possible pour des raisons d'ordre technique. Chaque cas fait toutefois l'objet d'un examen spécifique pour savoir si la manipulation se justifie et si les conditions d'obtention de l'autorisation sont remplies.

4. Conditions de délivrance de l'autorisation

Les personnes ou institutions possédant du matériel de l'armée radioactif doivent disposer d'une autorisation les habilitant à utiliser des rayonnements ionisants. Pour obtenir une telle autorisation de la part de l'OFSP, il est nécessaire de réunir les documents suivants :

- a.) le formulaire de demande prévu à cet effet [4], dûment complété ;
- b.) une attestation de formation en radioprotection ;
- c.) la preuve que les moyens financiers nécessaires à l'élimination ultérieure des objets radioactives sont budgétisés ;
- d.) une directive interne de radioprotection ;
- e.) un inventaire et une description du matériel radioactif.

5. Alternatives au régime de l'autorisation

Pour éviter de devoir demander une autorisation, il est possible de charger une entreprise dûment agréée [3] de ramener la radioactivité des repères lumineux en dessous de la limite d'autorisation et de les remplacer par une peinture luminescente non radioactive. L'OFSP recommande de recourir à cette alternative, étant donné qu'en règle générale, l'élimination de la peinture luminescente coûte moins cher que les frais de demande d'autorisation et d'élimination ultérieure de la source radioactive.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'intérieur DFI
Office fédéral de la santé publique OFSP
Unité de direction Protection des consommateurs

page 2/2

Division Radioprotection
www.str-rad.ch

Référence du document : L-04-04mf.doc
Établi le : 16.11.2010
Révision n° :

A noter qu'il est illégal et interdit de posséder des substances radioactives sans disposer d'une autorisation.

L'entreprise mentionnée ci-après [3] est indiquée à titre d'exemple ; elle assume l'entière responsabilité de ses décisions concernant la faisabilité et le prix des travaux à effectuer. Il faut savoir que seules les entreprises disposant d'une autorisation de l'OFSP sont habilitées à effectuer ce type de travaux.

6. Contacts

Manipulation de substances radioactives : autorisation et surveillance

Office fédéral de la santé publique
Division Radioprotection
3003 Berne
Tél. : 031 322 96 14 / Télécopie : 031 322 83 83
Courriel : reto.linder@bag.admin.ch Site Internet : www.bag.admin.ch

Suva, division Protection de la santé au poste de travail
[Secteur physique](#)
Case postale 4358
6002 Lucerne
Tél. : 041 419 51 29
Courriel : richard.grunder@suva.ch Site Internet : <http://www.suva.ch>

Substances radioactives dans le matériel historique de l'armée

Office fédéral de la protection de la population (OFPP)
Laboratoire de Spiez
Centre de compétences Radioprotection
Austrasse
3700 Spiez
Tél. : 033 228 16 43 / Télécopie : 033 228 14 02
Courriel : markus.zuercher@babs.admin.ch

Armée suisse, Etat-major de l'armée, Office central du matériel historique de l'Armée suisse (ZSHAM)

Armée suisse
Etat-major A Planification
ZSHAM
Papiermühlestr. 20
3003 Berne
www.armee.ch/zsham

7. Liens d'accès aux documents et aux services cités dans le présent document

- [1] Loi du 22 mars 1991 sur la radioprotection (LRaP)
<http://www.admin.ch/ch/f/rs/8/814.50.fr.pdf>
- [2] Ordonnance du 22 juin 1994 sur la radioprotection (ORaP)
<http://www.admin.ch/ch/f/rs/8/814.501.fr.pdf>
- [3] RC TRITEC AG, Speicherstrasse 60A, CH-9053 Teufen. Tél. : 071 335 73 73
<http://www.rcritec.com/>
- [4] Demande d'autorisation pour l'utilisation de radiations ionisantes
http://www.bag-anw.admin.ch/stronline/form/output/Formular_1.pdf

Annexe 10 - RESUME DES DOSES

Ce tableau est tiré du cours de la Suva, 2008, p.34

Résumé des doses

• exposition annuelle moyenne de la population en Suisse aux rayonnements (2003) Irradiations naturelles et artificielles de la population en Suisse	4 mSv par an	
• accident, dose semi-létale (lésions précoces)	4 500 mSv	
Valeurs limites de dose (rayonnements contrôlables)		Art. ORaP
• personnes exposées aux rayonnements dans l'exercice de leur profession		
o à partir de 18 ans	20 mSv par an	Art. 35-1
o exceptionnellement, avec l'accord de l'autorité de surveillance (les cinq dernières années < 100 mSv)	50 mSv par an	Art. 35-2
o valeur limite pour la peau, les mains et les pieds	500 mSv par an	Art. 35-3
o valeur limite pour le cristallin	150 mSv par an	Art. 35-3
• Restrictions pour les personnes exposées aux rayonnements dans l'exercice de leur profession		
o de 16 à 18 ans	5 mSv par an	Art. 36-1
o femmes enceintes (depuis le moment où la grossesse est connue jusqu'à son terme)		
▪ à la surface de l'abdomen	2 mSv	Art. 36-2
▪ par incorporation	1 mSv	Art. 36-2
• personnes non exposées aux rayonnements dans l'exercice de leur profession (population)		
1 mSv par an	Art. 37	
• Doses ambiantes		
o à l'intérieur de l'enceinte de l'entreprise, séjour permanent	0,02 mSv par semaine	Art. 59
o à l'intérieur de l'enceinte de l'entreprise, pas de séjour permanent	0,1 mSv par semaine	Art. 59
o à l'extérieur	0,1 mSv par semaine	Art. 60

Autres valeurs limites dans les articles 38, 39, 49, 68, 94, 96, 102 et 121.

Annexe 11 - PROTOCOLE DE PRISE DE MESURES

PROTOCOLE DE MESURES DU RADIOMETRE

La mesure du débit de dose et des coups par secondes :

1. Préparation

Placer l'appareil loin des sources à mesurer. Allumer l'appareil et attendre l'affichage d'un débit de dose.

2. Mesurer le bruit de fond

Se placer au centre de la pièce le plus loin possible de la source à étudier avec l'appareil allumé. Placer l'appareil à un mètre environ du sol. Le but est de sonder l'espace général de la pièce. Tourner sur 60 secondes sur soi-même pour obtenir le débit de dose ambiant. Observer s'il y a des changements significatifs. Cela peut indiquer une source forte à un endroit particulier de la pièce. Si cela est le cas, se déplacer pour avoir un débit de dose homogène. Noter la moyenne obtenue.

Note 1 : Il est important de réaliser la mesure du bruit de fond à chaque nouvelle mesure si elles sont prises des jours différents. Le débit de dose naturel peut facilement varier d'un jour à l'autre.

Note 2 : Il est possible de réaliser une mesure du bruit de fonds à l'extérieur du bâtiment.

3. Mesure de la source au "contact"

Placer l'appareil contre la source sans la toucher pour éviter une éventuelle contamination, ou envelopper la source dans un plastique (dans ce cas, seul le rayonnement gamma sera mesuré). Plus les chiffres sont petits plus la marge d'erreur est grande. Il est nécessaire d'attendre entre une et deux minutes avant de relever la mesure afin que l'appareil se stabilise.

4. Mesure de la source à 10 cm

Placer l'appareil à 10 cm et répéter l'opération. Afin de réaliser des mesures reproductibles, un support pour l'appareil de mesure peut être monté avec un statif et une noix (Fig. 55).

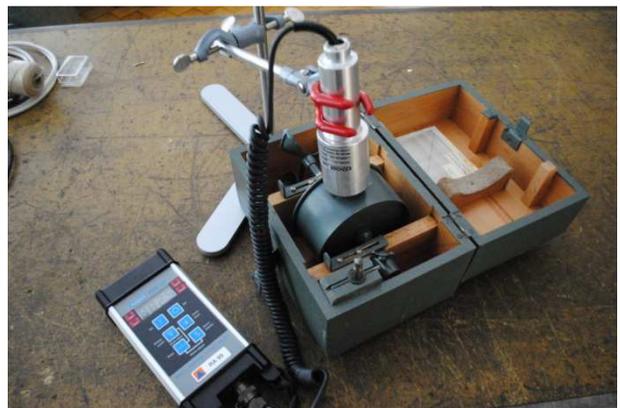


Fig. 55 : Utilisation d'un statif et d'une noix pour réaliser des mesures comparables ©HECR Arc, 2012

PROTOCOLE DE PRISE D'ECHANTILLONS POUR UNE ANALYSE DE CONTAMINATION

Nous avons suivi le protocole demandé par l'IRA.

1. Définir les surfaces de prélèvement en cm² et noter les informations sur l'échantillon (Fig. 56).
2. Décoller le frottis et l'imbiber d'éthanol.
3. Passer le coton sur la surface de prélèvement et recoller le coton.
4. Rabattre le papier et placer l'échantillon dans un minigrip©.

Il est possible de faire un échantillon avant et après dépoussiérage afin de voir si la poussière contenait des particules radioactives.

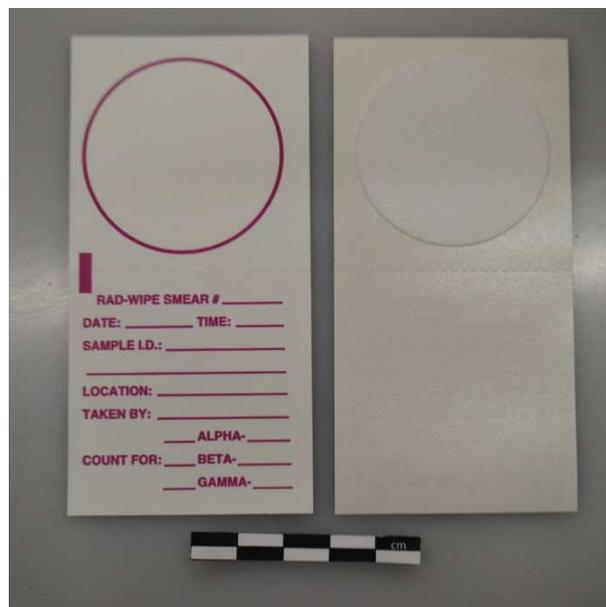


Fig. 56 : Frottis fourni par le laboratoire qui réalise l'analyse ©HECR Arc, 2012.

Annexe 12 - FICHE TECHNIQUE DU RADIAMETRE



RDS-110
Radiamétrie - Radiamètres portables



CARACTERISTIQUES PRINCIPALES

- Large gamme de mesure : débit de dose de 0.05 μ Sv/h jusqu'à 99.99 mSv/h
- Indication claire de la gamme de mesure par LED clignotante
- Sondes externes pour la mesure de la contamination et du débit de dose
- Mesures réglementaires
- Contrôle de la contamination
- Mesure programmée de la dose

RDS-110

Radiamètre multi-fonctions

Le radiamètre multi-fonctions RDS-110 est un appareil de détection polyvalent conçu pour de nombreuses applications dans les différents domaines de la sécurité mais également pour toute opération où existent des niveaux anormaux de radiations.

Ses fonctions permettent la mesure de la dose et du débit de dose ainsi que leur mémorisation jusqu'à 100 mSv/h. Il peut être connecté à un tube GM à fenêtre mince pour le contrôle de la contamination et il peut également être utilisé comme un moniteur d'alarme gamma au moyen d'une sonde externe gamma.

PRELIMINAIRE



health physics

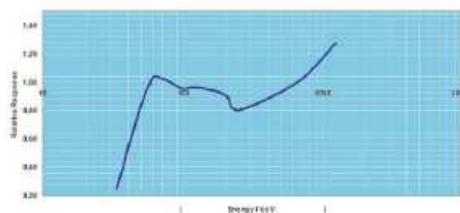
A Mirion Technologies Division

Featuring:

RADOS

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES:	
Caractéristiques physiques	<ul style="list-style-type: none"> rayonnements détectés : gamma et X de 50 keV à 1.3 MeV, bêta avec sonde externe détecteur : un tube GM à énergie compensée réponse en énergie en fonction de l'équivalent de dose ambiant H*(10) étendue de mesure : <ul style="list-style-type: none"> - débit de dose : 0.05 µSv/h à 99.99 mSv/h - dose 0.001 à 999.9 mSv - impulsion de 0,1 à 9999 CPS (détecteur externe) précision de la calibration : ± 5% de la lecture avec une source gamma de 137Cs, à 300µSv/h, +20°C linéarité du débit de dose : ±15 % dans la gamme de 0.1 µSv/h à 100 mSv/h réponse en énergie : ±30 % dans la gamme de 50 keV à 1.3 MeV réponse en fonction de l'angle d'incidence : ± 15 % dans un angle de ± 90° de la source de calibration avec 65 keV d'énergie.
Caractéristiques fonctionnelles	<ul style="list-style-type: none"> affichage de la dose et du débit de dose affichage avec rétro-éclairage indication automatique de l'étendue de mesure par signaux lumineux à LED alarmes sonores : niveaux d'alarme aisément paramétrables pour le débit de dose, la dose cumulée et le débit en CPS alarmes sonores : dose, débit de dose, diagnostics d'erreurs diagnostics d'erreurs : tube GM, électronique, message «dEF» en cas d'erreur Indication de «dépassement»: message «OFL» affiché pendant les dépassements de débit de dose alarme piles : 2 niveaux d'alarme pour batterie faible
Caractéristiques électriques	<ul style="list-style-type: none"> alimentation : 3 piles alcalines IEC LR6/AA (préconisées) des piles sèches ou batteries NiCd rechargeables de même type peuvent avoir une durée de vie plus courte disponible en option adaptateur AC durée de vie des piles : 200 heures avec un bruit de fond normal, au-delà de 400 heures sans buzzer et éclairage de l'afficheur, avec des piles alcalines.
Caractéristiques mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> boîtier : résistant aux chocs, corps en aluminium avec protection en plastique ABS blindé contre les interférences RF et NEMP dimensions: 92 x 199 x 44 mm masse : 580 g sans pile, 650 g avec piles
Caractéristiques environnementales	<ul style="list-style-type: none"> gamme de température : -25 à +55°C en fonctionnement, -40 à +70°C en stockage
Détecteurs externes	<ul style="list-style-type: none"> sonde bêta GMP-11 0 à 10 000 cps sonde bêta "Pancake" GMP-15 0 à 10 000 cps sonde gamma GMP-12 L 0.05 µSv/h à 100 mSv/h sonde gamma GMP-12 H 10 µSv/h à 3 Sv/h

RDS-110 Energy Response



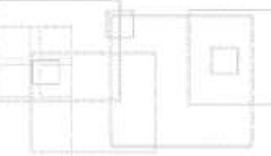
www.mirion.com
 20190035_RDS110_FR_2

Mirion Technologies (MGPI) Inc
 5000 Highlands Parkway
 Suite 150
 Smyrna Georgia 30082
 USA
 T +1.770.432.2744
 F +1.770.432.9179

Mirion Technologies (MGPI) SA
 BP 1
 F-13113 Lamanon
 France
 T +33 (0) 4 90 59 59 59
 F +33 (0) 4 90 59 55 18

Mirion Technologies (RADOS) Oy
 P.O. Box 506
 FIN-20101 Turku
 Finlande
 T +358 2 468 4600
 F +358 2 468 4601

Mirion Technologies (RADOS) GmbH
 Ruhrstrasse 49
 DE-22761 Hambourg
 Allemagne
 T +49 (0) 40 851 93-0
 F +49 (0) 40 851 93 256



Annexe 13 - VALEURS INDICATIVES

Les valeurs présentées sont le résultat d'une étude réalisée par the U.S. Nuclear Regulatory Commission et the Office of Nuclear Regulatory Research en 2001 sur les produits de consommation contenant des substances radioactives. Nous n'avons pas retranscrits la totalité des résultats mais seulement des valeurs indicatives permettant déjà une évaluation des doses reçues. La lecture de l'étude complète est également conseillée pour plus de détails sur les mesures.

	Radionucléide	Doses indicatrices	
Verrerie	Uranium nat.	<i>Externe</i> <u>Pour un verre en ouraline</u> 1 cm : $4.3 \cdot 10^{-1}$ μ Sv/h 30 cm : $9.0 \cdot 10^{-3}$ μ Sv/h	<i>Interne</i> A deux litres de liquide par jour : $1.8 \cdot 10^{-8}$ μ Sv/an
Céramique	Uranium nat.	<i>Externe</i> <u>Pour un plat de 13 cm</u> 1 cm : 0.18 μ Sv/h 30 cm : $6.5 \cdot 10^{-3}$ μ Sv/h <u>Pour une tasse de 4.4 cm</u> 1 cm : 0.41 μ Sv/h 30 cm : $3.7 \cdot 10^{-3}$ μ Sv/h	<i>Interne</i> A deux litres de liquide par jour : 0.4 mSv/an (ingestion de 0.21 g d'uranium)
Appareil photographique	Thorium 232 et 234	<i>Utilisation régulière</i> <u>Pour un appareil photo</u> 7 μ Sv/an <u>Pour une caméra</u> 200 μ Sv/an	
Lampe à gaz	Thorium 232 et 234	<i>Pour campeurs occasionnels</i> <u>En utilisation</u> 0.6 μ Sv/an <u>Changer le manchon</u> 10 μ Sv/an <u>Stockage</u> 0.6 μ Sv/an	
Montre aux aiguilles lumineuses	Tritium	<u>Porter 16h par jour</u> 0.4 μ Sv /an <u>Montre cassée</u> 0.03 mSv / an	

Annexe 14 - COMPLEMENTS POUR LE TRANSPORT

LIMITES D'ACTIVITE POUR LE TRANSPORT

A_1 est la valeur de l'activité de matières radioactives sous forme spéciale (matière radioactive solide non dispersable ou une capsule scellée contenant une matière radioactive). A_2 est la valeur de l'activité de matières radioactives autres que sous forme spéciale.

Ces valeurs se trouvent dans l'ADR au tableau 2.2.7.2.2.1 dont un extrait se trouve ci-dessous regroupant les radionucléides les plus rencontrés dans le milieu muséal.

	H-3	Sr-90	Ra-226	Th-232	Th-234	Th nat.	U nat.	Am-241
A_1 (Bq)	1 E+11	3 E+11	2 E+11	Illimité	3 E+11	Illimité	Illimité	1 E+13
A_2 (Bq)	2 E+10	3 E+11	3 E+09	Illimité	3 E+11	Illimité	Illimité	1 E+09

Tab. 7 : Extrait du tableau 2.2.7.2.2.1 de l'ADR

A_1 et A_2 sont ensuite utilisés pour calculer les limites d'activité par type de colis.

Etat physique du contenu	UN 2910 Matières Limites par colis	UN 2911 Appareils ou objet Limites par article
Solide		
Forme spéciale	$10^{-3} A_1$	$10^{-2} A_1$
Autres formes	$10^{-3} A_2$	$10^{-2} A_2$
Liquides	$10^{-4} A_2$	$10^{-3} A_2$
Gaz		
Tritium	$2 \times 10^{-2} A_2$	$2 \times 10^{-2} A_2$
Forme spéciale	$10^{-3} A_1$	$10^{-3} A_1$
Autres formes	$10^{-3} A_2$	$10^{-3} A_2$

DOCUMENTS DE TRANSPORT

Les documents de transports ci-dessous sont la reproduction des documents de la SUVAPro.

Document de transport pour matières radioactives en colis exceptés

**< Transport ne dépassant pas les limites libres prescrites dans ADR
table 2.2.7.4.1.2 >**

a) **UN2910, APPAREILS OU OBJETS
EN COLIS EXCEPTES
Classe 7 SDR/ADR**

g) Expéditeur :

.....
.....
.....
.....

h) Destinataire :

.....
.....
.....
.....

Date :

Document de transport pour matières radioactives en colis exceptés

**< Transport ne dépassant pas les limites libres prescrites dans ADR
table 2.2.7.4.1.2 >**

a)	UN2911, MATIERES RADIOACTIVES, QUANTITES LIMITEES EN COLIS EXCEPTES Classe 7 SDR/ADR
-----------	--

g) Expéditeur : 	h) Destinataire :
--	--

Date :

Annexe 15 - MESURES DES OBJETS

La mesure du bruit de fonds doit se faire à chaque fois qu'une nouvelle mesure est prise. Les chiffres présentés dans ce tableau montrent la fourchette que nous avons observée durant le temps des mesures.

Bruit de fond de l'atelier	0.10 – 0.11 µSv/h
	0.3 – 0.6 CPS

Bruit de fond des réserves	0.13 – 0.15 µSv/h
	0.5 – 0.7 CPS

Les chiffres présentés dans ce tableau sont les résultats sans bruit de fond

Anémomètre

Appareil	0.5 cm	10 cm
Ouvert	9.26 – 10.4 µSv/h	2.4 – 1.8 µSv/h
	1031 – 1587 CPS	39.6 – 55.3 CPS
Fermée	3.02 – 3.63 µSv/h	0.8 – 1.5 µSv/h
	4.6 – 4.8 CPS	1.2 – 1.6 CPS

Boîte en bois	0.5 cm	10 cm
Intérieur (Fonds)	0.17 – 0.24 µSv/h	0.18 µSv/h
	4.1 – 5.2 CPS	2.7 – 3 CPS
Extérieur	Bdf	Bdf
	1.2 – 1.7 CPS	Bdf

Boussoles

Boussole 1	0.5 cm	10 cm
Ouvert	0.21 – 0.3 µSv/h	Bdf
	2.4 – 3 CPS	1.1 – 1.5 CPS
Fermée	0.18 – 0.20 µSv/h	Bdf
	1.2 CPS	Bdf

Boussole 6	0.5 cm	10 cm
Ouvert	0.43 – 0.46 µSv/h	0.20 µSv/h
	39.1 – 62.3 CPS	5.9 – 7 CPS
Fermée	0.40 – 0.43 µSv/h	Bdf
	5.3 – 6 CPS	3.2 – 3.8 CPS

Boussole 7	0.5 cm	10 cm
Ouvert	1.62 – 1.83 µSv/h	0.10 µSv/h
	27.1 – 30.6 CPS	4.3 – 5.9 CPS
Fermée	1.16 – 1.37 µSv/h	Bdf
	8 – 13 CPS	1.4 – 2.5 CPS

Boussole 832	0.5 cm	10 cm
Ouvert	0.68 – 0.80 µSv/h	Bdf
	5.0 – 7.9 CPS	1.1 – 1.8 CPS

Dimensions des surfaces d'échantillons des frottis			
N° échantillon	Objet	Localisation	Dimension de la zone de prélèvement
11	Anémomètre	Cadran	1 x 3 cm
12		Tissu maintien	2 x 4 cm
13		Plafond	3 x 2 cm
14		Fond	4 x 4 cm
15		Dessus boîte	2 x 3 cm
16	Boussole 6	Cadran	D : 4 cm
17	Boussole 1	Cadran	D : 4 cm
18	Boussole 832	Cadran	D : 2 cm
19	Boussole 7	Couvercle	D: 4 cm
20		Cadran	D : 5 cm

Annexe 16 - SPECTROMETRIE GAMMA

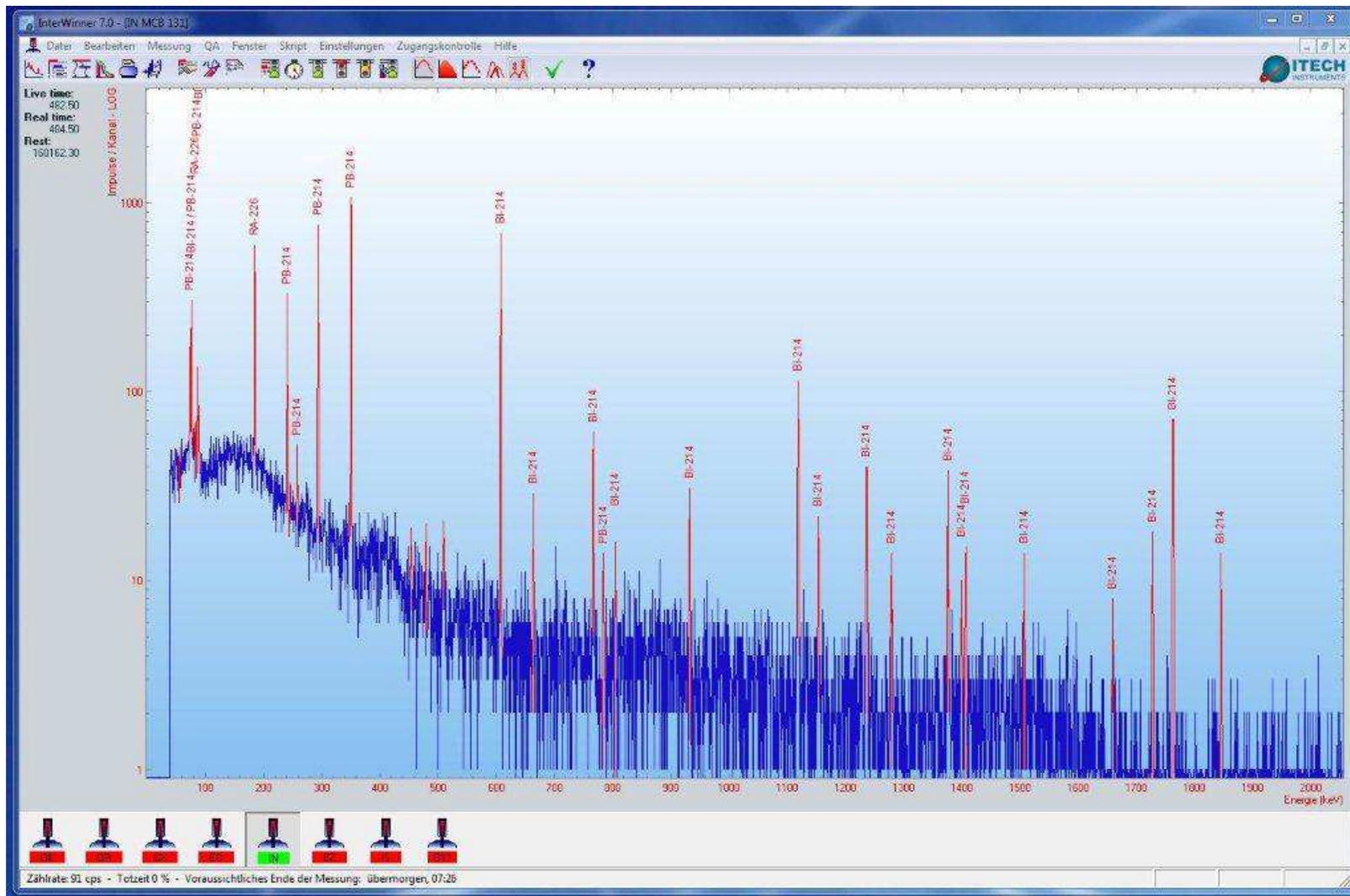


Fig. 57 : Spectrométrie gamma de la boussole 6 ©OFSP, 2012

Annexe 17 - RESULTATS DES ANALYSES DE CONTAMINATION



Institut de
radiophysique
Rue du Grand-Pré 1
CH-1007 Lausanne



S SCHWEIZERISCHER PRÜFSTELLENDIENST
T SERVICE SUISSE D'ESSAI
S SERVIZIO DI PROVA IN SVIZZERA
S SWISS TESTING SERVICE

STS 315

Rapport n°grp120719-01

Page 3/3

RAPPORT DE MESURE D'ACTIVITE

Client : Madame Marion DAVAL
Echantillon analysé : Frottis anémomètre et boussoles
Quantité analysée : échantillon complet
Préparation des échantillons : aucun
Numéro d'échantillon : GRP/12/06/32 à 39 + 51
Méthode de mesure utilisée : spectrométrie γ sur détecteur à semiconducteur HPGe
Durée de la mesure : environ 89 heures (frottis groupés)
Date de la mesure : 29 juin 2012

5. Résultat

Frottis N°	Description	Radionucléide	Activité [Bq/éch]	Incertitude [%]
Anémomètre				
11	Cadran	Ra-226 et ses filles	< 8	--
12	Maintien tissu			
13	Boîte plafond			
14	Boîte fond			
15	Extérieur boîte			
Boussoles				
16	6 - cadran	Ra-226 et ses filles	< 8	--
17	1 - cadran			
18	832 - cadran			
19	7 - couvercle externe			
20	7 - cadran			

6. Remarques

Les mesures individuelles des frottis sur 1 heure (mesure standard) n'ont pas permis de mettre en évidence une contamination au Ra-226.

Le signe < signifie que l'activité est inférieure à la limite de détection du système de mesure.

Les résultats mentionnés dans ce rapport ne concernent que l'échantillon remis à l'IRA.

La date de référence pour les activités est la date de la mesure.

Lausanne, le 19 juillet 2012

Le responsable de la mesure

S. Baechler

Institute of radiation physics



Tél. + 41 21 31 48 068
Fax + 41 21 31 48 299
Mail ira.info@chuv.ch

Annexe 18 - GALERIES D'IMAGES

PUBLICITE DES OBJETS RADIOACTIFS



Fig. 58 : Affiche publicitaire pour un soda. ©PLS

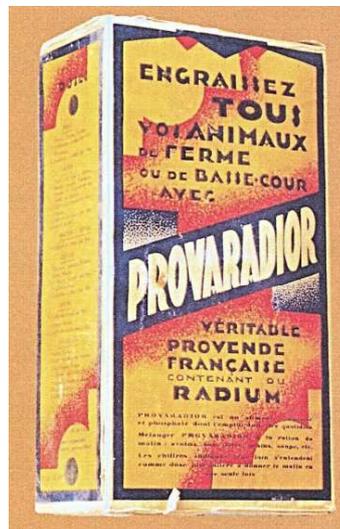


Fig. 59 : Fourrage pour animaux de ferme. ©AC & JC



Fig. 60 : Boîte de préservatifs Nutex. ©Oak ridge associated Universities



Fig. 61 : Boîte de cigarettes. ©Oak ridge associated Universities



Fig. 62 : Publicité pour des gaines amincissantes. ©AC & JC



Fig. 63 : Publicité pour la laine IRADIA ©Infonucléaire

FONTAINES A RADIUM



Fig. 64 : Deux fontaines à radium françaises avec leur certificat d'origine. Les sources se trouvent sur le haut des appareils. ©Musée Curie, Institut Curie.



Fig. 65 : Jarre en carnotite (minerai d'uranium) utilisé comme fontaine à radium aux USA, fin 1920 - début 1930. 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ ©Radium History Mosaic.



Fig. 66 : Fontaine à radium "Revigators" en céramique dont la glaçure comprend des oxydes d'uranium, 1925-1930. 0.35 $\mu\text{Sv/h}$ ©Oak ridge associated Universities.



Fig. 67 : Petite fontaine au radium suisse. ©RC TRITEC



Fig. 68 : Système de Radium Life pour activer l'eau en radon, 1930-1935. 0.2 $\mu\text{Sv/h}$ © Oak ridge associated Universities.

VERRERIE



Fig. 69 : Verre d'urane. 1) lumière ambiante. 2) lumière UV. A partie de 1930 ©Oak ridge associated Universities.



Fig. 70 : Décoration en verre d'urane, années 1930. 1400 CPS. ©Hayter



Fig. 71 : Flacon de la cristallerie de Bayel, années 1920. ©Ouraline.com



Fig. 72 : Collier en perle de verre d'urane, années 1930. 2750 CPS. ©Hayter



Fig. 73 : Collier en perle de verre d'urane, années 1930. 6800 CPS. ©Hayter

PEINTURES RADIOLUMINESCENTES



Fig. 74 : Réveil Bayard, français, dont les aiguilles et le cadran sont peints aux sels de radium. ©Musée Curie, Institut Curie.



Fig. 75 : Montre de gousset aux aiguilles et aux chiffres peints aux sels de radium, du type de celles peintes par les Radium girls. ©Musée Curie, Institut Curie.



Fig. 76 : Panneaux militaires de direction radioluminescents. ©Zürcher, 2009.



Fig. 77 : Un appât radioluminescent "Glowboy", années 1920. ©Oak ridge associated Universities.



Fig. 78 : Kit de retouche d'aiguilles et cadrans, de Suisse, 1940-1950. © Oak ridge associated Universities.

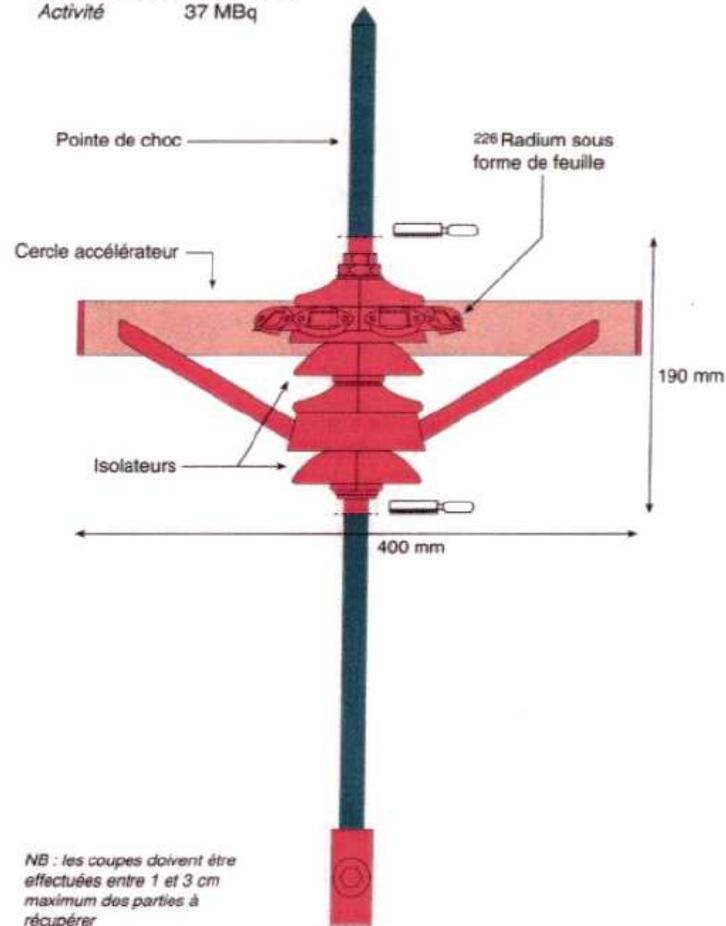


PARATONNERRES RADIOACTIFS

Ces fiches techniques proviennent du site internet *l'inventaire national des paratonnerres radioactifs*.

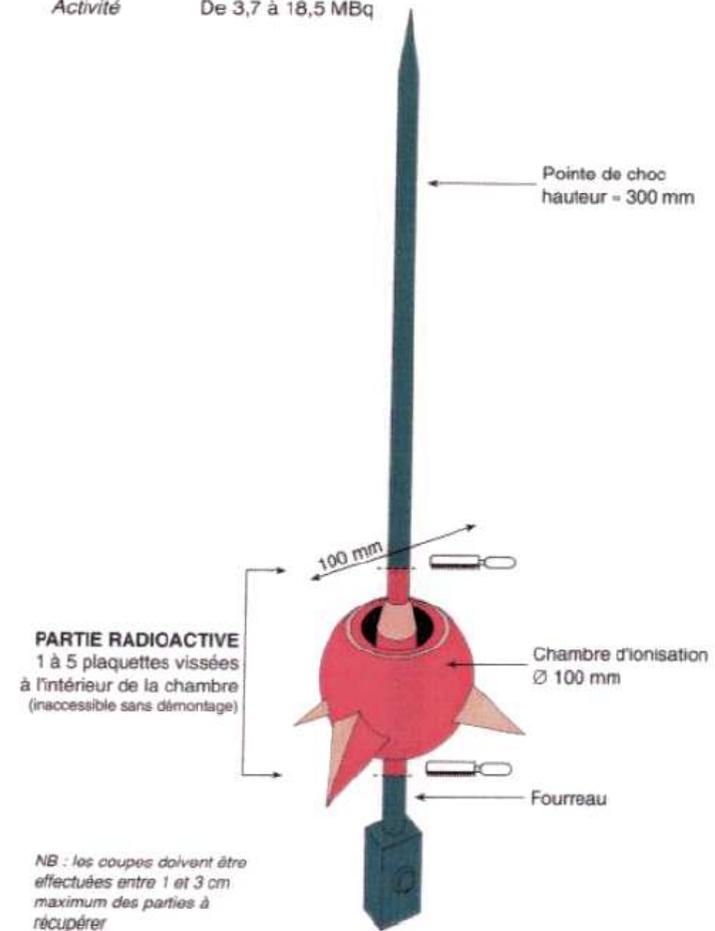
Marque DUVAL MESSIEN
Modèle SAREF
Fabrication De 1945 à 1960
Radioélément Radium 226
Activité 37 MBq

FICHE 1



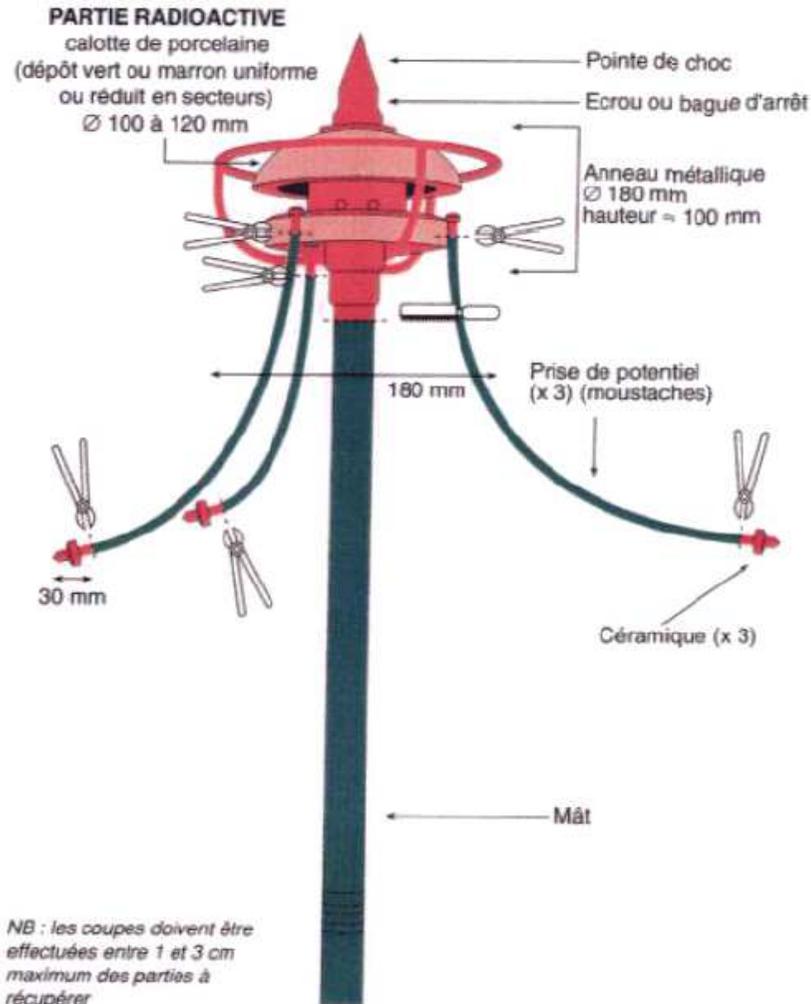
Marque DUVAL MESSIEN
Modèle PARASPHERE
Fabrication Depuis 1960
Radioélément Radium 226
Activité De 3,7 à 18,5 MBq

FICHE 2



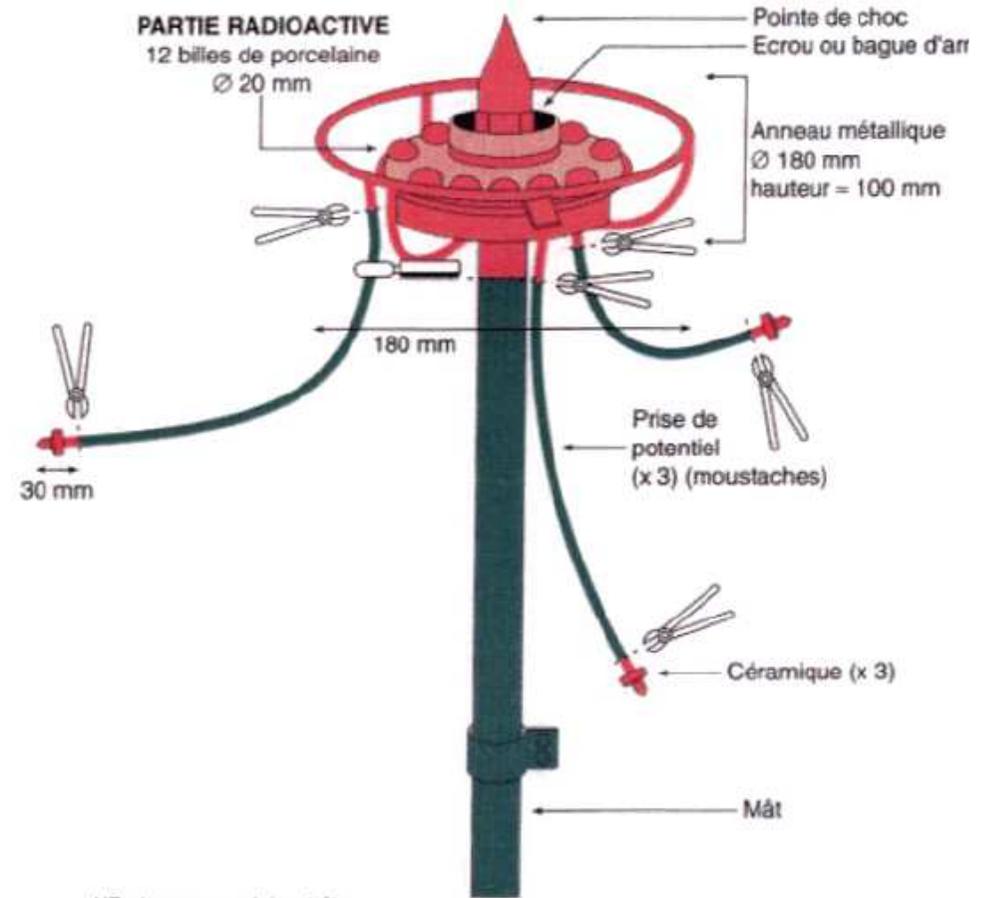
Marque HELITA
Modèle A CALOTTE
Fabrication De 1936 à 1950
Radioélément Radium 226
Activité De 33 à 74 MBq

FICHE 3



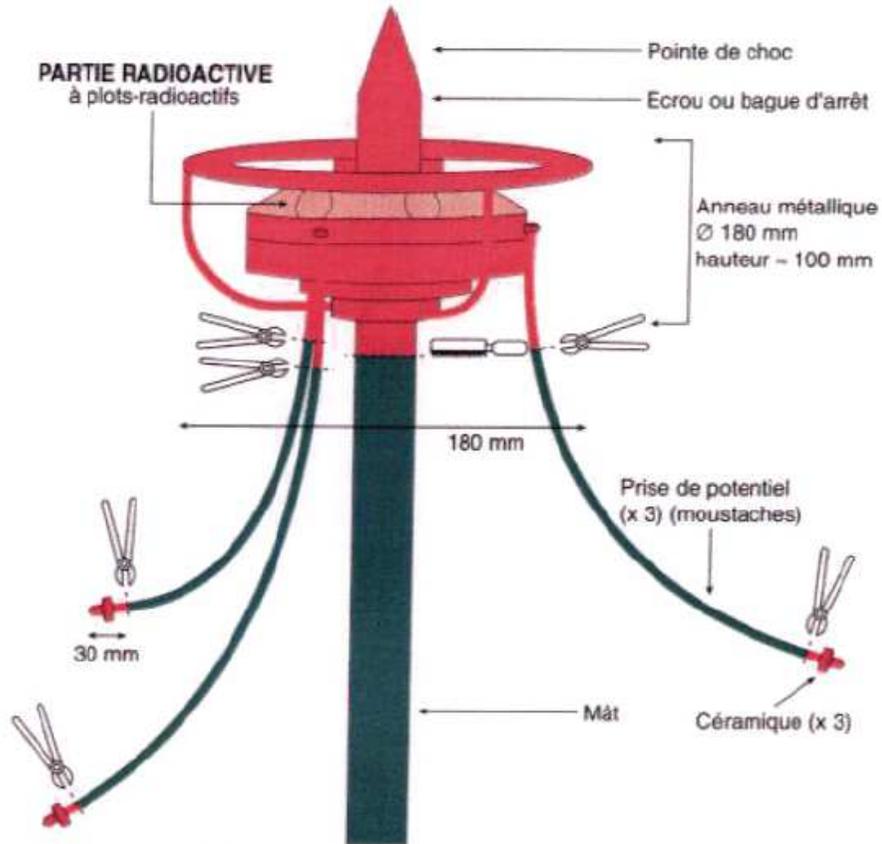
Marque HELITA
Modèle A BILLES
Fabrication De 1950 à 1970
Radioélément Radium 226
Activité De 37 à 74 MBq

FICHE 4



Marque HELITA
Modèle A PLOTS-RADIOACTIFS
Fabrication De 1966 à 1970
Radioélément Radium 226
Activité 74 MBq

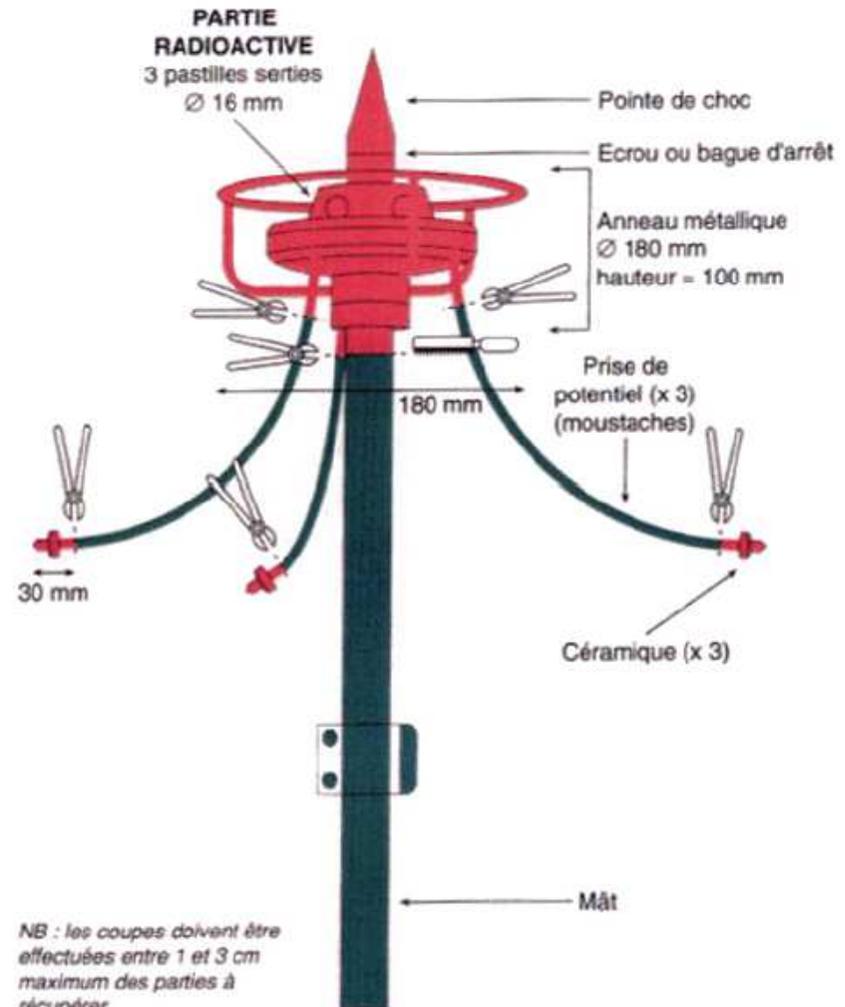
FICHE 5



NB : les coupes doivent être effectuées entre 1 et 3 cm maximum des parties à récupérer

Marque HELITA
Modèle A PASTILLES
Fabrication De 1970 à 1986
Radioélément Américium 241
Activité De 6 à 28 MBq

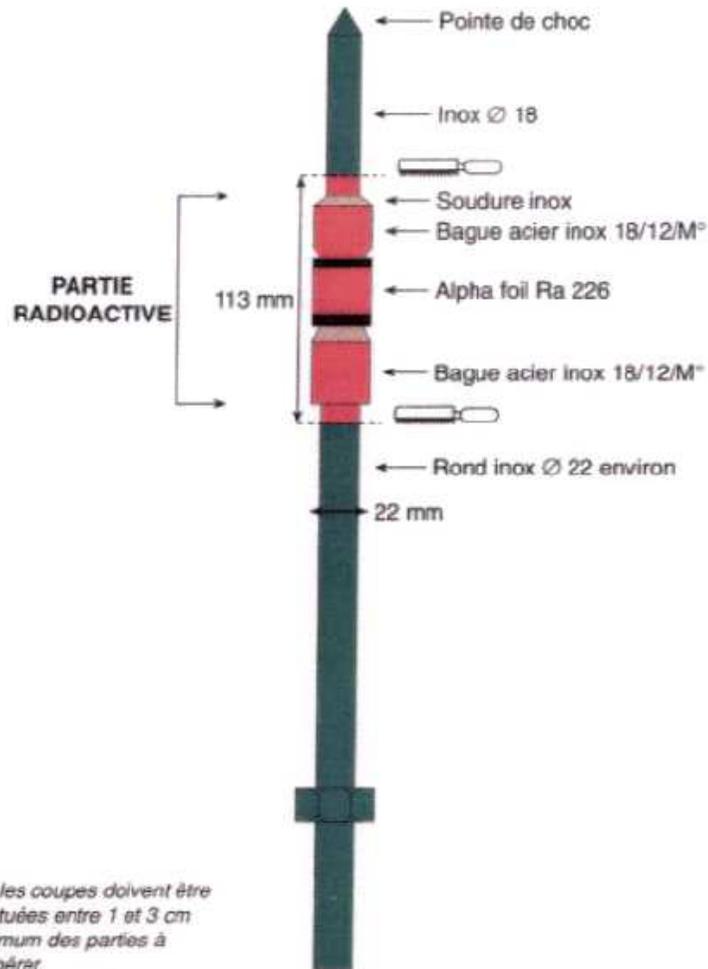
FICHE 6



NB : les coupes doivent être effectuées entre 1 et 3 cm maximum des parties à récupérer

Marque INDELEC
Modèle POINTE ACTIVE TD
Fabrication De 1980 à 1985
Radioélément Radium 226
Activité De 12,85 à 18,5 MBq

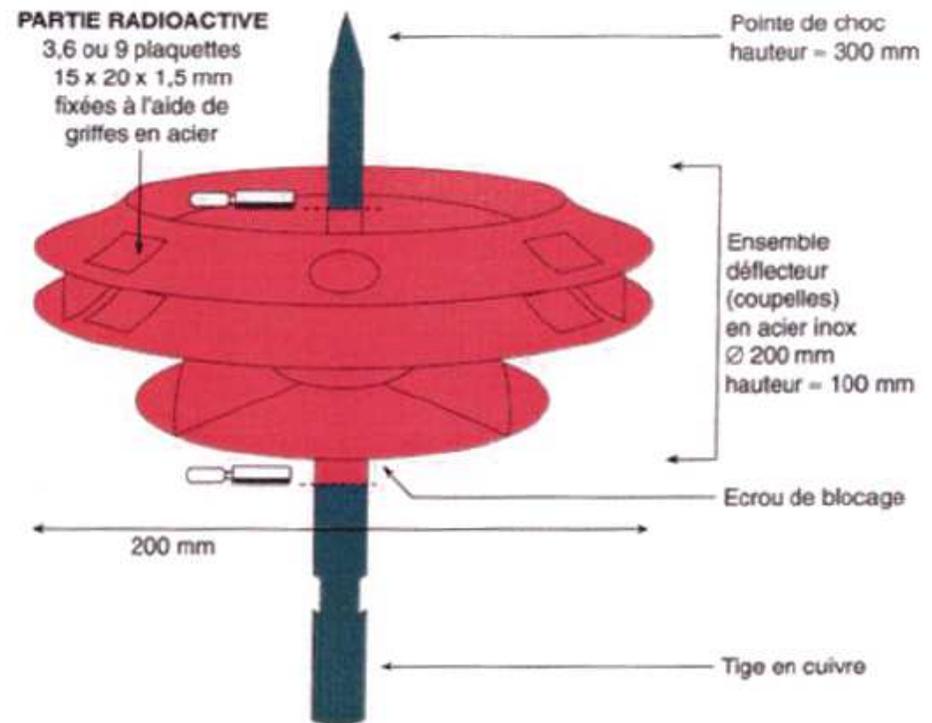
FICHE 7



NB : les coupes doivent être effectuées entre 1 et 3 cm maximum des parties à récupérer

Marque INDELEC
Modèle PREVENTOR
Fabrication De 1960 à 1985
Radioélément Radium 226
Activité De 6 à 27 MBq

FICHE 8



NB : les coupes doivent être effectuées entre 1 et 3 cm maximum des parties à récupérer

Marque FRANKLIN FRANCE
Modèle SAINT ELME
Fabrication Depuis 1981
Radioélément Américium 241
Activité De 11 à 33 MBa

FICHE 9

