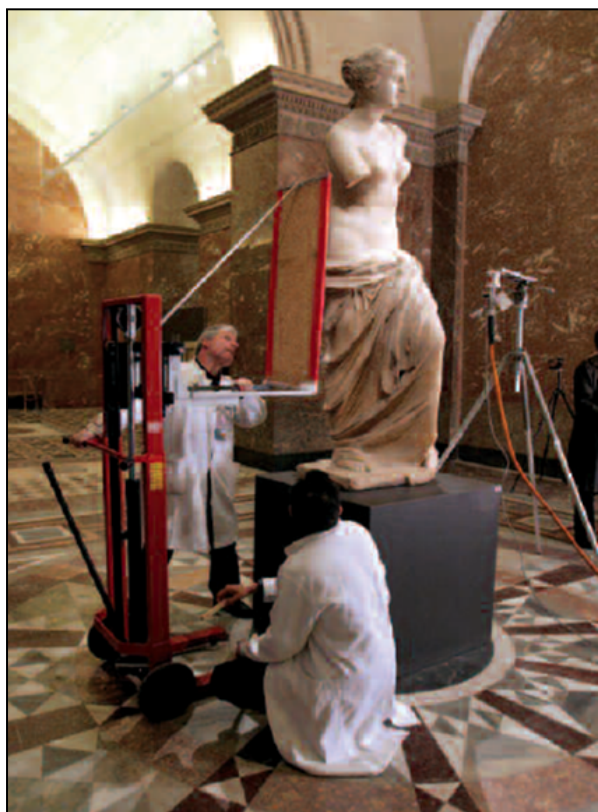


UTILISATION DES RAYONNEMENTS IONISANTS DANS L'INDUSTRIE ET LA RECHERCHE

RÉSUMÉ

L'industrie et la recherche utilisent des sources de rayonnements ionisants dans une grande variété d'applications et de lieux d'utilisation. Ces sources de rayonnements sont produites soit par des radioéléments – essentiellement artificiels – en sources scellées ou non, soit par des générateurs électriques.

Parmi les principales utilisations des sources radioactives scellées, on peut citer les suivantes.



Utilisation de rayonnements ionisants pour la restauration d'objets d'art

L'irradiation industrielle

Elle est mise en œuvre pour la stérilisation de dispositifs médicaux, de produits pharmaceutiques ou cosmétiques, la conservation de produits alimentaires, le traitement d'objets d'art, l'irradiation de produits sanguins ...

Le contrôle non destructif Ces techniques de contrôle utilisant des appareils de gammagraphie permettent d'apprécier des défauts d'homogénéité dans le métal, et en particulier dans les cordons de soudure. Ces appareils comportent le plus souvent un dispositif mobile pouvant être déplacé d'un chantier à l'autre et ne nécessitant aucune source d'alimentation électrique.

Le contrôle de paramètres

Le principe de fonctionnement de ces appareils est l'atténuation du signal émis : la différence entre le signal émis et le signal reçu permet d'évaluer la grandeur recherchée. Les sources ionisantes sont utilisées à des fins de :

- mesure d'empoussièrement de l'atmosphère
- mesure de grammage de papier, de niveau de liquide
- mesure de densité et d'humidité des sols ou gamma-densimétrie, en particulier dans l'agriculture et les travaux publics
- diagraphie permettant d'étudier les propriétés géologiques des sous-sols

Les sources radioactives non scellées

Elles sont le plus généralement employées comme traceurs et à des fins d'étalonnage ou d'enseignement. L'utilisation de traceurs radioactifs incorporés à des molécules est très courante en recherche biologique. Ils sont ainsi un outil puissant d'investigation en biologie cellulaire et moléculaire. Les sources non scellées servent également de traceurs pour des mesures d'usure, de recherche de fuites, de frottement, de construction de modèles hydrodynamiques, ainsi qu'en hydrologie.

Les accélérateurs de particules

Enfin, certaines applications nécessitent d'avoir recours à des accélérateurs de particules produisant, suivant les cas, des faisceaux de photons ou d'électrons. Ces dispositifs sont utilisés dans des domaines très variés comme la chimie (vulcanisation de matériaux plastiques et d'emballages alimentaires), l'alimentation (désinfection et stérilisation d'aliments), la santé (stérilisation des matériel à usage médical), l'environnement (désinfection de résidus de l'industrie), ...

Dispositifs de détection de matières illicites

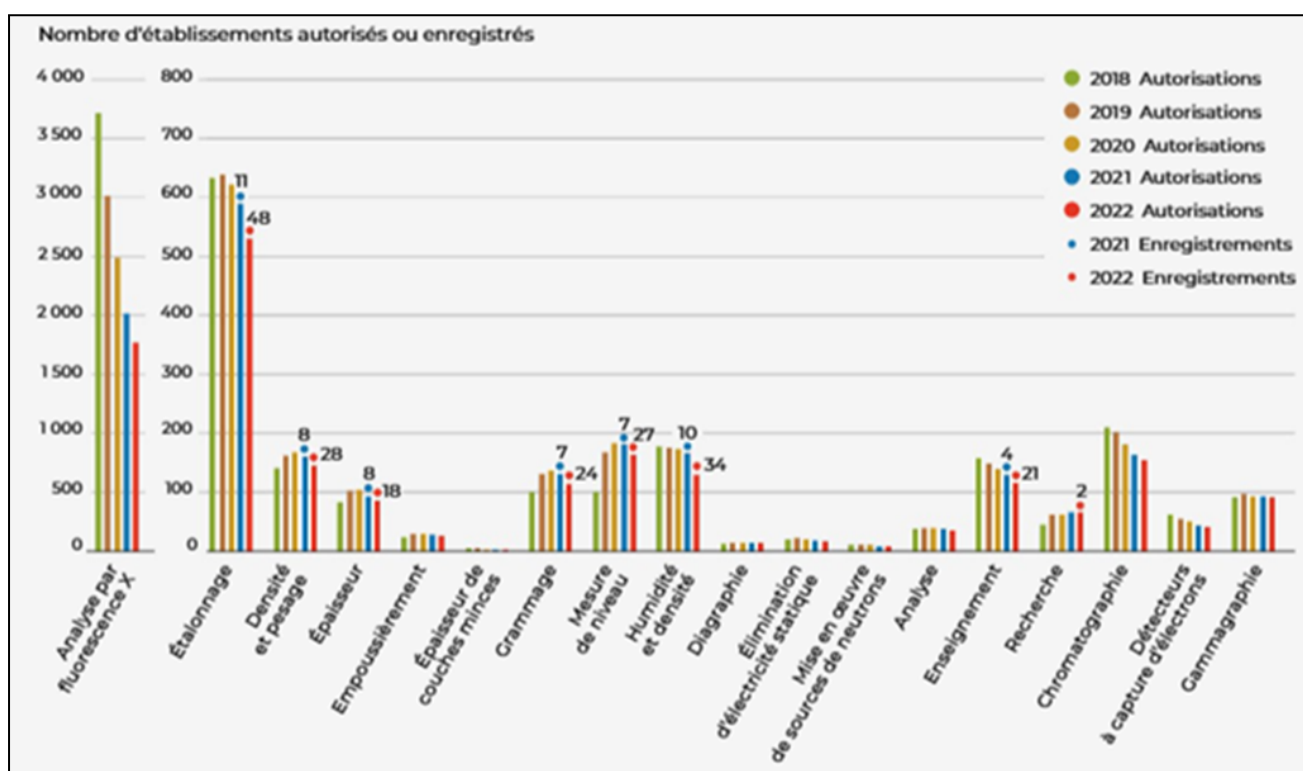
Il s'agit de techniques d'imagerie utilisées pour la détection de menaces terroristes dans les bagages, conteneurs de transport en vue d'identifier des explosifs, drogues, agents chimiques, ou matières nucléaires à différents stades de la chaîne de sécurité (lieux publics, ports, aéroports, frontières ...).

Ces diverses applications sont détaillées dans la présente fiche.

1. GÉNÉRALITÉS

L'industrie utilise de longue date des sources de rayonnements ionisants¹ dans une grande variété d'applications et de lieux d'utilisation. Ces rayonnements sont produits soit par des radioéléments – essentiellement artificiels – en sources scellées ou non, soit par des générateurs électriques. On peut citer par exemple :

- l'irradiation industrielle en vue de la stérilisation de dispositifs médicaux ou de la conservation des aliments.
- la radiographie industrielle : technique de contrôle non destructif, essentiellement la gammagraphie, qui permet le contrôle des défauts d'homogénéité dans le métal et en particulier dans les cordons de soudure.
- le contrôle de paramètres physiques (empoussièrement de l'air, grammage du papier, niveau de liquide, densité ou humidité des sols, diagraphie...).
- l'utilisation de traceurs radioactifs notamment dans le domaine de la recherche où l'incorporation à des molécules, outil courant d'investigation en biologie cellulaire et moléculaire.
- l'utilisation de générateurs électriques de rayons X pour le contrôle de containers de marchandises ou dans des programmes de radiographie d'explosions.
- les mesures d'usure, de recherche de fuites, de frottement, de construction de modèles hydrodynamiques, ainsi qu'en hydrologie.



Les applications des sources radioactives dans l'industrie sont multiples comme le montre le nombre d'établissements autorisés à utiliser des sources radioactives scellées en fonction du type d'application. Il convient de noter que les gros utilisateurs (CEA, ORANO, EDF) disposent d'une autorisation unique par établissement, ce qui explique que ce tableau ne reflète pas la réalité du nombre de sources en usage.

La ventilation des sources radioactives scellées pour une année de référence et en fonction du type d'utilisation est donnée en annexe 1. Source ASN [Réf. 10]

Figure 1 : Répartition des autorisations ou des enregistrements de sources radioactives scellées par finalités

En outre, des radio-isotopes à courte période sont largement utilisés en **médecine à des fins de diagnostic**, mais ceux-ci ne présentent qu'un danger minime et n'entrent pas dans le cadre du présent document.

L'**industrie nucléaire** est également grosse utilisatrice de sources radioactives (extraction, fabrication, utilisation et retraitement du combustible, stockage et traitement des déchets...).

Les applications médicales des sources de rayonnements ne font pas l'objet de la présente fiche. Elles sont largement développées dans la [Fiche argumentaire GAENA "Exposition médicales aux rayonnements ionisants"](#).

¹ **Source** : Tout ce qui provoque une exposition à des rayonnements, par exemple par émission de rayonnements ionisants ou libération de substances ou de matières radioactives. (**Origine** : Document cité en Réf. 1).

2. IRRADIATION DE PRODUITS À DES FINS MÉDICALES

Des sources et des dispositifs radioactifs sont utilisés aux fins suivantes dans le domaine du traitement des matériaux :

- Traitement par irradiation de matériaux pour en modifier les propriétés
- Traitement par irradiation de nuisibles (mouches, par exemple) pour les empêcher de se reproduire
- Irradiation des aliments afin d'en assurer la conservation
- Irradiation de produits sanguins
- Stérilisation

2.1. MODIFICATION DE LA STRUCTURE DES MATÉRIAUX PAR IRRADIATION

Une irradiation peut modifier considérablement la structure des matériaux. L'industrie a intégré de nombreux procédés pour créer des matières utilisées ensuite dans des objets de notre vie quotidienne :

- **Polymérisation** : Afin d'obtenir des protections ayant les caractéristiques de polymères (matériau rigide mais assez souple pour rester positionnable et absorber les chocs). L'irradiation permet de relier des monomères entre eux afin de former des polymères (protection des câbles électriques, application de couches de protection sur du parquet, ruban adhésif, lentilles de contact, etc.).
- **Vulcanisation** : L'irradiation peut remplacer le procédé totalement chimique de vulcanisation qui consiste à ajouter du soufre pour obtenir une meilleure élasticité du caoutchouc.
- **Expansion sous forme lisse** : Le produit irradié augmente en volume, mais conserve une surface totalement lisse, évitant ainsi des étapes coûteuses de finition (casques pour motos, pare-chocs, etc.).
- **Tissus à plis permanents** : Application de polymère sur la surface d'un tissu ce qui permet ensuite de le presser à volonté pour marquer un pli définitif (uniformes, rideaux, etc.).
- **Application de peintures** : Une fine couche de peinture électrostatique est apposée sur une surface et l'irradiation permet de la fixer définitivement en la liant avec le support. La tenue est ainsi améliorée dans le temps.
- **Durcissement de bois** : L'échantillon à traiter est imprégné d'une couche de résine qui est polymérisée par ionisation. Ce traitement initie la réticulation des molécules de styrène qui diffusent peu à peu au sein du matériau.

Cette technique est appelée consolidation par densification. Elle est utilisée pour la restauration d'objets d'art. De nombreux autres procédés existent et bien d'autres seront utilisés car l'irradiation limite les polluants chimiques nécessaires et garantit une meilleure intégration des éléments.



Irradiateur de matériaux

© Source AIEA



Polymérisation de gaines rétractables

© Source Ionisos

2.2. DOPAGE DE SILICIUM PAR TRANSMUTATION

Le dopage de silicium par transmutation est réalisé dans un réacteur nucléaire expérimental.

Le dopant est obtenu par réaction de capture de l'isotope ^{30}Si (présent à environ 3 % dans le silicium). L'isotope ^{31}Si ainsi créé décroît ensuite vers le ^{31}P par radioactivité β^- . Un atome dopant de phosphore (dopage "N") est ainsi introduit de façon très précise dans le réseau cristallin du silicium et assure ainsi une homogénéité inégalée.

Les semi-conducteurs ainsi créés sont employés dans les applications d'électronique de puissance notamment les commandes de moteurs électriques de tramway, de TGV ou encore de voitures électriques/hybrides.

2.3. STÉRILISATION DE DISPOSITIFS MÉDICAUX, PHARMACEUTIQUES ET COSMÉTIQUES

S'agissant de la stérilisation, les produits à traiter (matériel médical, pansements chirurgicaux, gants chirurgicaux, aiguilles, compresses, implants, poches pour solution intraveineuses, cathéters...) sont exposés à un rayonnement de haute intensité.

La dose de rayonnement est soigneusement contrôlée de manière à tuer toute bactérie qui aurait pu pénétrer par accident dans l'emballage au cours du processus de fabrication.



La stérilisation du matériel médico chirurgical à usage unique et des articles de laboratoire se fait au travers les emballages hermétiquement clos ; au stade du produit conditionné sur palette.

Elle ne laisse aucun résidu toxique dans les matériaux ionisés et permet de ce fait, l'utilisation immédiate du matériel après stérilisation.

Les biberons utilisés dans un grand nombre d'unités de prématurés sont ionisés pour éliminer tout risque d'infection à cette étape cruciale de la vie d'un prématuré.

➡ Stérilisation de dispositifs chirurgicaux

Les prothèses (de hanche artificielles par exemple) sont stérilisées pour réduire le risque d'infection et les complications opératoires. La même opération s'applique à certains médicaments pour garantir leur innocuité bactérienne. On traite ainsi des emballages pharmaceutiques ou alimentaires, des enzymes industrielles, des cosmétiques...

2.4. IRRADIATION DE PRODUITS SANGUINS

L'irradiation de produits sanguins est pratiquée pour prévenir des réactions post-transfusionnelles chez les patients recevant une transfusion sanguine. L'irradiation délivre à la poche de sang une dose d'environ 20 à 35 grays. Cette irradiation est opérée à l'aide d'un appareil autoprotégé permettant ainsi son installation dans un local ne nécessitant pas de renfort de protection.

Selon les modèles, les irradiateurs sont équipés soit de sources radioactives : 1, 2 ou 3 sources de ¹³⁷Cs présentant une activité unitaire d'environ 60 TBq, soit de générateurs électriques de rayons X.

La politique engagée en 2009, de remplacement progressif des irradiateurs à sources par des générateurs de rayons X à amené à inverser la composition de parc qui comprend désormais plus de générateurs que d'irradiateurs à sources radioactives.



Irradiateurs de poches de sang

© Source ASN

2.5. IRRADIATION DE PRODUITS AGROALIMENTAIRES

L'irradiation des aliments est un procédé de conservation et d'assainissement. Les produits ionisés offrent :

- une qualité microbienne excellente qui permet une meilleure réponse aux exigences sanitaires, une réduction des contrôles bactériologiques lors de la fabrication.
- la prolongation de la durée de vie en conservant les qualités organoleptiques et nutritives des produits ?

À faible dose, l'irradiation sert à inhiber la germination (pommes de terre, oignons, ail, gingembre), à désinsectiser et déparasiter les céréales, les plantes légumineuses, les fruits frais et secs, les poissons et viandes, à ralentir le processus physiologique de décomposition des fruits et légumes frais.

À dose moyenne, l'ionisation par irradiation permet la prolongation de la conservation des poissons frais, des fraises, l'élimination des agents d'altération et des micro-organismes pathogènes sur les fruits de mer, les volailles et viandes (produits frais ou congelés), et l'amélioration technique des aliments, par exemple l'augmentation du rendement en jus du raisin ou la diminution de la durée de cuisson des légumes déshydratés.

À forte dose, l'ionisation permet la stérilisation industrielle des viandes, volailles et fruits de mer, des aliments prêts à l'emploi, des rations hospitalières, et la décontamination de certains additifs et ingrédients alimentaires comme les épices, les gommes, les préparations d'enzymes.

Ces techniques d'irradiation de produits de consommation peuvent être autorisées car, à l'issue de leur traitement, ces produits ne présentent aucune radioactivité artificielle ajoutée. L'annexe 2 présente la liste des produits agroalimentaires dont le traitement par ionisation est autorisé en France. La [Fiche argumentaire GAENA "Conservation des aliments par irradiation"](#) détaille ces procédés d'irradiation.



Les techniques nucléaires apportent des contributions dans la **production agricole et la consommation**. Elles sont utiles pour mettre au point de nouvelles variétés de plantes par mutation qui répondent aux besoins des populations et présentent une résistance notamment à la salinité des sols et aux insectes ravageurs. Des marqueurs isotopiques permettent aussi de suivre l'évolution des nutriments dans les écosystèmes agricoles, d'évaluer leur disponibilité dans le sol, de mesurer l'humidité...

Autre utilisation particulièrement bénéfique pour les populations : la lutte contre les mouches tsé-tsé, vectrices de la maladie du sommeil en Amérique centrale et au Panama. Les rayons gamma rendent infertiles les jeunes mouches mâles élevées en masse. Avec le temps, la population des mouches est pratiquement éliminée et l'utilisation de pesticides réduite. On peut également irradier des semences afin d'obtenir leur germination précoce ou d'en accroître la résistance aux maladies.

2.6. IRRADIATION PAR RAYONNEMENTS IONISANTS DANS LE DOMAINE DE LA SCIENCE

2.6.1. Préservation du patrimoine culturel

La désinsectisation curative des bois anciens et des papiers rongés par les insectes xylophages. Depuis longtemps déjà, les centres de restauration d'œuvres d'art, des restaurateurs et des musées utilisent cette prestation pour traiter des meubles, des portes et des fenêtres, des statues, des peintures, des icônes, des parquets, des objets ethnographiques, des archives, des herbiers, etc. C'est la gammagraphie qui a mis en évidence les consolidations de la statue en marbre exposée au musée du Louvre, Aphrodite. La momie de Ramsès II, infestée de larves et de champignons, a été sauvée par irradiation en 1977.

L'accélérateur Aglaé (Accélérateur Grand Louvre pour l'analyse élémentaire) installé au musée du Louvre détermine les compositions chimiques et isotopiques des matériaux. Ainsi l'analyse par PIXE (émission de rayons X) des yeux et du nombril de la statue de la déesse Ishtar a révélé qu'ils étaient faits d'un rubis provenant de Birmanie.

2.6.2. Restauration d'objets d'art



Des appareils portables permettent de réaliser des examens in situ d'œuvres non transportables. Ces procédés sont utilisés pour mieux connaître les œuvres et détecter les faux.

On pratique également (à dose beaucoup plus faible) des radiographies de statues à l'aide de rayons X et gamma. Les rayons gamma offrent l'avantage de voir à l'intérieur d'objets épais et absorbants et de savoir, par exemple, si une statue a fait l'objet de restaurations.

➡ **Irradiation d'une momie, du musée des beaux-arts de Grenoble en préalable de l'irradiation de la momie de Ramsès II** © ARC-Nucléart

2.6.3. Consolidation par irradiation et imprégnation de résines



La consolidation par irradiation gamma donne de bons résultats pour des objets ayant longtemps séjournés sous l'eau, qui supportent mal d'en sortir.

On a ainsi pu traiter un certain nombre d'objets récupérés autour de l'épave du Titanic ainsi qu'une épave romaine en bois découverte à Arles.

Ces techniques sont détaillées dans [l'article N° 47 du GAENA](#).

➡ **Irradiation de matériel ethnographique** @Source Art-Nucléart

L'irradiation par les rayons gamma permet, non seulement la désinfection des objets du patrimoine, mais leur consolidation. Il est possible d'arrêter les causes de dégradation et de renforcer, par imprégnation, la structure des pièces les plus dégradées.

La polymérisation à cœur provoque la réticulation et le durcissement de la résine et consolide l'objet. Il peut alors supporter des travaux de restauration que son état de fragilité interdirait et permet donc des sauvetages de statues et de meubles très altérés.

Radiographie gamma @Source ARC-Nucléart ➡



2.6.4. Datation par le carbone 14

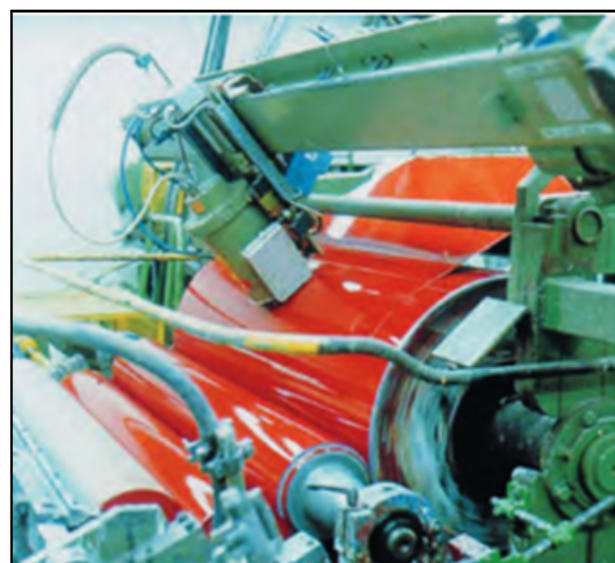
La datation par le carbone 14 est une méthode de datation radiométrique basée sur la mesure de l'activité radiologique du carbone 14 contenu dans de la matière organique dont on souhaite connaître l'âge absolu, à savoir le temps écoulé depuis la mort de ce support organique. Cette technique permet de témoigner de l'âge d'un vestige ancien. Le principe de la méthode est décrit dans [l'article N° 17 du GAENA](#).

3. CONTRÔLE DE PARAMÈTRES PHYSIQUES PAR JAUGES RADIOMÉTRIQUES

Cette technologie recouvre des dispositifs de mesure d'empoussièrement de l'air, de grammage de papier, de niveau de liquides, de densité ou d'humidité de sols, de diagraphie.... Le principe de fonctionnement de ces appareils, encore appelés jauges radiométriques, est l'atténuation du signal émis : la différence entre le signal émis et le signal reçu permet d'évaluer la grandeur recherchée.

Ces jauges radiométriques sont utilisées à des fins de :

- **Mesure d'empoussièrement de l'atmosphère** : l'air est filtré en permanence sur un ruban défilant à vitesse contrôlée, interposé entre la source et le détecteur. L'intensité du rayonnement reçu par le détecteur est fonction du taux d'empoussièrement du filtre, ce qui permet de déterminer ce taux.
- **Mesure de niveau d'un liquide**. L'atténuation du signal détecté permet de connaître le niveau de remplissage du récipient et de déclencher automatiquement certaines opérations (arrêt/poursuite du remplissage, alarme, etc.).
- **Mesure de grammage de papier** : un faisceau de rayonnement bêta traverse le papier et est reçu sur un détecteur situé en vis-à-vis. L'atténuation du signal sur ce détecteur permet de connaître la densité du papier et donc le grammage.
- **Mesure d'épaisseur** de matériaux comme le papier, le tissu, le plastique, ou des tôles, des plaques métalliques selon un principe similaire à l'aide de jauges à radioéléments.



Mesure de grammage par rétrodiffusion
© Source UARGA

- **Mesure de densité** et de pesage, toujours selon un principe similaire.
- **Mesure de densité et d'humidité des sols** ou gamma-densimétrie, employés en particulier dans l'agriculture – mesure de la densité du blé dans les trémies de moissonneuse batteuse ou les silos à grains – et les travaux publics. Ces techniques combinent le plus souvent des sources gamma et neutroniques.
- **Diagraphie** permettant d'étudier les propriétés géologiques des sous-sols par introduction d'une sonde de mesure comportant une source de ^{60}Co , de ^{137}Cs , d'Am-Be ou de ^{252}Cf .
- **Détection des molécules et leur dosage** par analyse dans les chromatographes en phase gazeuse, par utilisation de sources de nickel 63 ou de tritium pour des produits comme les pesticides, les explosifs ou les drogues.

Jauge de mesure de densité en position sur des canalisations
Source AIEA →



4. RADIOGRAPHIE INDUSTRIELLE – GAMMAGRAPHIE ET GÉNÉRATEURS DE RAYONS X

La radiographie industrielle est une méthode de contrôle non destructif par émission de rayonnements gamma ou X. Elle vise à détecter les éventuels défauts des pièces industrielles et ouvrages, en particulier des cordons de soudure, lors de leur fabrication ou lors d'opérations de maintenance. Elle est employée dans des secteurs industriels variés : chaudronnerie, pétrochimie, aéronautique, installations nucléaires, ouvrages d'art, travaux publics, constructions navales, armement...



Appareil de gammagraphie
© Source Cegelec

Ces examens radiographiques consistent, comme en médecine, à enregistrer l'image de la perturbation d'un faisceau de rayonnements X (ou gamma) provoquée par l'objet à contrôler. Ils permettent sans détruire le matériau de repérer les défauts. Les rayonnements X servent aussi à visualiser les objets contenus à l'intérieur des bagages dans les aéroports.

Cette technique utilise en général des sources d'iridium 192 et de cobalt 60, dont l'activité ne dépasse pas une vingtaine de terabecquerels. Le gammagraphe est le plus souvent un appareil mobile pouvant être déplacé d'un chantier à l'autre.

On donne ci-après quelques applications particulières de la radiographie industrielle et ne nécessitant aucune source d'alimentation électrique.

• Dispositifs d'inspection interne de canalisation par radiographie, « Crawlers »

Ces dispositifs servent à radiographier les soudures sur des canalisations fermées de grande longueur lorsque la source doit être exposée à un endroit précis par rapport à la soudure. Des batteries leur fournissent l'énergie nécessaire pour se déplacer à l'intérieur des canalisations.

Un film radiographique placé autour du cordon de soudure à l'extérieur de la canalisation est impressionné par les rayons gamma émis par la source qui traversent la paroi. L'image ainsi obtenue fait apparaître les différences de densité de la partie radiographiée.

Ces dispositifs sont utilisés dans des situations où il est nécessaire de contrôler la qualité de canalisations qui viennent d'être construites ou de surveiller la détérioration de canalisations anciennes (industries de transformation, pétrochimie, réseaux de distribution du gaz).



Gamma crawlers
© Source JME-Advanced Inspection Systems

- **La radiographie industrielle appliquée à des ouvrages bétonnés**



Examen d'une structure de pont par radiographie gamma © Source Intercontrole

L'application de la radiographie industrielle dans le domaine du génie civil concerne toutes les structures en béton, béton armé, béton précontraint, pierre, mortier, métal sur lesquelles la technique est applicable.

Elle n'est limitée que par les possibilités de la physique : pouvoir pénétrant du rayonnement en fonction de sa nature et du matériau traversé d'une part, activité et débit d'exposition de l'émetteur d'autre part et les conditions de radioprotection sur les sites où elle est appliquée.

Cette technique permet d'observer selon le cas : l'existence de cavités dans le matériau, la présence de coulis de ciment ou des craquelures, la position des câbles de précontrainte et des aciers passifs et leur diamètre, l'adhérence du béton sur les conduits, les reprises de bétonnage, hétérogénéités et fissures dans le béton, les discontinuités de matière au droit des joints de construction.

- **Machines d'inspection en service de cuves**

La MIS (machine d'inspection en service) est un robot de haute technologie qui permet de vérifier l'état de la cuve d'un réacteur nucléaire lors des visites décennales.

Cette machine permet de contrôler l'étanchéité de la cuve d'un réacteur nucléaire, vérifier son état de revêtement, l'état des soudures et des tubulures d'arrivée et de sortie de l'eau ainsi que la d'éventuels défauts dans le volume de la cuve.

Elle est utilisée dans le cadre des visites décennales pour inspecter l'état de la cuve, quand le réacteur est à l'arrêt. Mais la MIS est également utilisée lors de la visite initiale, juste avant la mise en service d'un réacteur, mais également au cours de la première visite complète qui a lieu au plus tard 30 mois suite à la mise en service.



Machine d'inspection en service (MIS)
©Source Intercontrôle

- **Portique de contrôle de marchandises**

Ce procédé industriel est identique à la gammagraphie, mais adapté à des volumes plus grands et mobiles. Il permet notamment de vérifier sans les ouvrir le contenu des camions de marchandises, des conteneurs et des wagons.

5. AUTRES APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES RAYONNEMENTS IONISANTS

5.1. FLUORESCENCE X

- **La détection par appareil à fluorescence X**

L'analyse par fluorescence X est un exemple de méthode d'analyse élémentaire des matériaux. Si l'on dirige des faisceaux de rayonnement gamma ayant une énergie spécifique sur un alliage métallique, ceux-ci interagissent de différentes manières avec les différents éléments constitutifs de cet alliage et un rayonnement secondaire caractéristique (photon X) est émis ; d'où le nom de fluorescence X.



L'analyse du spectre du rayonnement réfléchi permet d'identifier les éléments constitutifs et de déterminer leurs proportions relatives. Cette technique trouve son utilisation en particulier dans la détection du plomb dans les peintures et dans la recherche de métaux. Elle permet d'identifier des constituants du matériau examiné.

Les appareils portatifs utilisent des sources de cadmium 109 (période 464 jours) ou de cobalt 57 (période 270 jours). L'activité de ces sources est d'environ 400 MBq.

◀ **Appareil portatif d'analyse par fluorescence X** © Source AIEA

5.2. ÉTALONNAGE D'APPAREILS DE RADIOPROTECTION (MÉTROLOGIE)

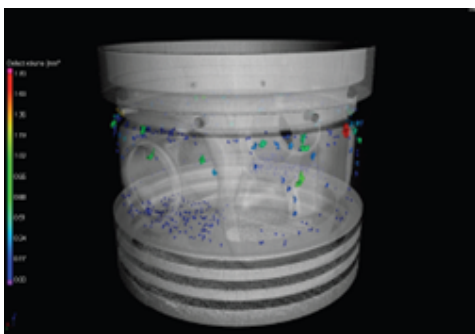
Les appareils de radioprotection doivent être étalonnés périodiquement de façon à connaître précisément leurs réponses par rapport aux champs de rayonnements auxquels ils sont soumis, pour donner une réponse en équivalent de dose (micro-Sievert, milli-Sievert,...).

Ces étalonnages se font selon des procédures bien précises qui tiennent compte du type de rayonnement (gamma, neutrons) et de leur énergie en particules.

5.3. IMAGERIE RADIOGRAPHIQUE – TOMOGRAPHIQUE (également appelé scanner dans le langage courant)

5.3.1. Tomographie par rayons X

La tomographie par absorption de rayons X est une technique non destructive qui permet la reconstitution d'images « en coupe » d'un objet à 3 dimensions. Son principe repose sur l'analyse multidirectionnelle de l'interaction d'un faisceau de rayons X avec la matière, par enregistrement par des détecteurs du rayonnement transmis après traversée d'un objet. Les données acquises lors de la prise de mesure sont collectées suivant des orientations multiples dont le nombre et le pas sont fonction du type d'appareil et de la finesse de résolution.



Caractérisation de porosité dans une pièce de fonderie par tomographie à rayons X

© Source CETIM

À l'aide de ces données, une image numérique est calculée et reconstruite mathématiquement en niveaux de couleur dont chaque traduit point par point le coefficient d'atténuation local du faisceau incident. Celui-ci, après calibration et étalonnage, peut être traduit en échelle de densité.

La tomographie à rayons X permet d'accéder au cœur de la matière pour en apprécier les variations d'absorption radiologique et les différences de composition.

La tomographie à rayons X trouve son application dans divers domaines tels que la médecine, les géosciences et la prospection minière, la physique des matériaux, le contrôle de bagages dans les aéroports....

5.3.2. Gamma tomographie

Son principe est celui de la tomographie par transmission. Elle est souvent dénommée tomographie active. La source est une source de cobalt 60 collimatée émettant un faisceau plat en éventail. L'énergie associée de 1 MeV permet de traverser jusqu'à 600 mm de béton. Cette technique est utilisée pour le contrôle de fût de déchets radioactifs enrobés dans de la résine polymère, béton ou bitume.

5.3.3. Tomographie par neutrons ou neutronographie

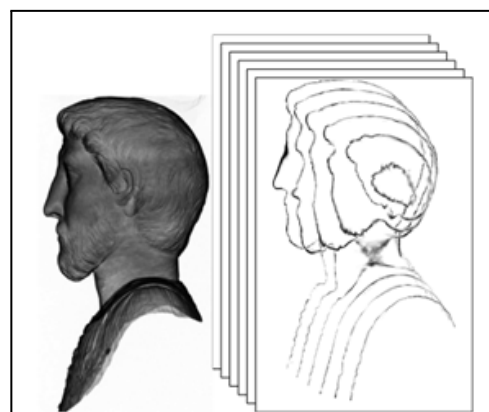
Il s'agit d'un procédé de radiographie à l'aide d'un flux de neutron au lieu de rayons X. Cette méthode permet de visualiser des éléments qui ne sont pas visibles sur une radiographie X comme les éléments organiques qui interagissent fortement avec les neutrons. D'autres matières comme le plomb ou l'acier interagissent peu quant à eux et sont transparents aux neutrons, alors qu'ils arrêtent les rayons X.

Cette méthode a de nombreuses applications telles que la visualisation de composés organiques contenant des atomes d'hydrogène, le contrôle de niveau d'huile, d'isolants, de joints de colle dans les matériaux composites et des revêtements de surface.

Elle permet de voir l'arrangement et la continuité d'une poudre explosive à travers une paroi en acier. Loin d'être concurrents, la radiographie X et la neutronographie sont complémentaires

Image par tomographie neutronique du buste en or de l'empereur Marc AURELLE, du Musée Romain d'Avenches (Suisse).

© Source CETIM



5.4. APPLICATIONS EN VOIE DE DISPARITION, NON JUSTIFIÉES OU INTERDITES

Plusieurs activités tendent à disparaître, du fait notamment de l'évolution des techniques. C'est le cas :

- de la production d'électricité au moyen de générateurs thermoélectriques radio-isotopiques
- des détecteurs de fumée
- des panneaux auto lumineux
- des lunettes de visée pour armes à feu
- de l'élimination de l'électricité statique
- des paratonnerre

Cas des détecteurs de fumée contenant une source d'américium

Dans les années quatre-vingt, la seule technologie efficace de détection de fumées économiquement acceptable pour répondre aux importants volumes de détecteurs à implanter dans les lieux publics reposait sur l'utilisation de sources scellées d'américium 241 qui présentait l'intérêt d'émettre une faible énergie en rayonnement gamma et un rayonnement alpha limité à la chambre d'analyse du détecteur. Les produits ainsi fabriqués ont toujours été reconnus comme efficaces et sans danger dans les conditions normales d'utilisation.

Depuis 2002, la nouvelle réglementation interdisait toute addition de radionucléides artificiels ou naturel, sauf si elle est justifiée par les avantages qu'elle procure, les fabricants se sont orientés vers de nouvelles technologies de détection sans source radioactive, avec des performances similaires et à des coûts comparables ; il s'agit de la détection optique.

Compte tenu du très grand nombre de détecteurs de fumée (versus source radioactive) installés, un plan de retrait progressif a été établi en 2017 ; en accord avec l'ASN. Ce plan prévoit le retrait progressif du parc des quelque 7 millions de détecteurs ioniques de fumées répartis sur environ 300.000 sites.

Détecteur de fumée à source d'américium ►



6. PRODUCTION DE RAYONNEMENTS ET RECHERCHE

Il existe une grande variété d'installations de recherche produisant des rayonnements ionisants, avec des finalités différentes. La plupart de ces grands instruments utilisent les sources de rayonnements à des fins d'études sur les matériaux, des irradiations technologiques, de la recherche fondamentale.... Citons les principaux :

• Les synchrotrons

Le terme **synchrotron** désigne un grand instrument électromagnétique destiné à l'accélération à haute énergie de particules élémentaires. Deux types d'appareils existent en France : l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) à Grenoble et le synchrotron SOLEIL à Lure, Gif-sur-Yvette. Leurs domaines d'action vont de la recherche fondamentale (physique, chimie, sciences des matériaux et du vivant) où ils offrent l'utilisation de méthodes spectroscopiques de l'infra rouge aux rayons X, et de méthodes en diffraction et diffusion, à la recherche appliquée dans des domaines divers (médical, archéologie, nucléaire, chimie, environnement, micromécanique, microélectronique, nanotechnologie...).

L'article [GAENA N° 5](#) détaille les missions du synchrotron SOLEIL.

• Les accélérateurs de particules

Les accélérateurs ont des applications aussi variées que la physique nucléaire pour la recherche fondamentale sur les particules élémentaires des hautes énergies, le domaine médical, pour le traitement des cancers par radiothérapie et le domaine militaire, en particulier pour la simulation des armes nucléaires.

Cas du GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds) : GANIL produit des faisceaux d'ions très énergétiques qui permettent l'exploration en physique des matériaux et en radiobiologie. Les faisceaux d'ions du GANIL sont accélérés au moyen de 3 cyclotrons en cascade. Ils couvrent ainsi une gamme d'énergie assez large, permettant de sonder la matière à différentes échelles : de la surface à l'intérieur des matériaux à basse et moyenne énergie jusqu'au contenu du noyau atomique pour les énergies les plus grandes.

Plate forme AIFIRA (Applications interdisciplinaires des faisceaux d'ions en Région Aquitaine) au Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan (CENBG) : Cet accélérateur permet la mise en œuvre diverses techniques d'analyse par faisceaux d'ions.

Ces techniques sont utilisées pour des études liées au cycle électronucléaire, pour l'analyse de matériaux, d'objets du patrimoine ou encore pour cartographier et quantifier la distribution des éléments chimiques dans les cellules ou les tissus biologiques.

AIFIRA dispose d'un accélérateur de dernière génération (Singletron HVEE) capable de délivrer des faisceaux continus d'ions légers d'hydrogène (H⁺), de deutérium (D⁺) et d'hélium (He⁺).



Accélérateur AIFIRA - Vue de la salle machine
© CENBG

- **Les réacteurs de recherche**

Au CEA il existe plusieurs familles de réacteurs expérimentaux destinés à étudier et à qualifier le comportement sous irradiation des matériaux, encore appelés « réacteurs d'irradiation technologique ». Ils sont au nombre de trois :

- ★ le réacteur ORPHÉE, qui est destiné à la réalisation d'applications orientées vers l'industrie et la médecine. Ce réacteur émet un faisceau de neutrons de forte énergie permettant d'assurer des contrôles non destructifs par neutronographie. Grâce à la technique de diffusion et de diffraction des neutrons, ORPHÉE constitue un outil d'exploration de la matière de premier ordre.
- ★ le réacteur OSIRIS, qui sera remplacé à l'horizon 2020 par le réacteur RJH, est destiné à la production de radioéléments à usage médical et industriel ainsi que le dopage de silicium. Outre cette production d'isotopes, ils sont également dédiés à l'irradiation de matériaux divers et des analyses d'échantillons par activation.
- ★ le RES (Réacteur d'essais), dont la mission est de qualifier des concepts technologiques innovants et d'offrir des capacités d'irradiation technologiques.

- **L'installation AIRIX (Accélérateur à Induction de Radiographie pour l'imagerie X)**

AIRIX est une machine à rayons X, permettant de valider les modèles relatifs à la phase dite mécanique (non nucléaire) de mise en condition par explosif chimique (phénomènes pyrotechniques + hydrodynamiques). Pour cela AIRIX génère des rayons X extrêmement pénétrants (50.000 fois l'énergie d'une radio pulmonaire) qui permettent d'obtenir des radiographies d'une grande finesse spatiale et temporelle de la matière en cours de compression. Le résultat est analogue à celui d'une radiographie médicale.

Cette installation est particulièrement adaptée à la tomographie dynamique des rayons X. En effet, grâce à des temps d'acquisition extrêmement courts, compatibles avec les vitesses de certains phénomènes physiques (vitesses comprises entre 2000 à 3000 m/s), cette technique peut conduire à des mesures dynamiques permettant de suivre l'évolution d'un matériau soumis à des contraintes. Pour plus de détails, voir la [Fiche argumentaire GAENA "Simulation et dissuasion nucléaire"](#).

7. DÉTECTION DE MATIÈRES ILLICITES

Il existe une grande variété d'installations de recherche produisant des rayonnements ionisants, avec des finalités différentes. La plupart de ces grands instruments utilisent les sources de rayonnements à des fins d'études sur les matériaux, des irradiations technologiques, de la recherche fondamentale....

7.1. TECHNIQUES TRADITIONNELLES

Les techniques traditionnelles sont basées sur des générateurs électriques de rayons X. Ce procédé industriel est identique à la gammagraphie, mais adapté à des volumes plus grands et mobiles. Il permet notamment de vérifier sans les ouvrir le contenu exact des camions, conteneurs et des wagons. Elles sont également très répandues dans le contrôle de bagages dans les aéroports.

Cas particulier des scanners à rayons X pour les contrôles de sécurité

Cette finalité d'utilisation est donnée à titre indicatif puisque l'utilisation de scanners à rayons X sur les personnes pour des contrôles de sécurité est interdite en France (en application de la l'article I.1333-1 du code la Santé publique).

Les expérimentations menées en France sont fondées sur des technologies d'imageries non ionisantes (ondes millimétriques).



Contrôle de chargement par scanner à rayons X ➡

7.2. TECHNIQUES AVANCÉES

Depuis une dizaine d'années, les techniques non intrusives, basées sur des rayonnements gamma ou neutroniques très pénétrants, largement utilisées pour le contrôle de procédé, la caractérisation des déchets radioactifs et le contrôle des matières nucléaires ont été adaptées à la détection des menaces dites « NRBC-E » (nucléaires, radiologiques, bactériologiques, chimiques – explosifs).

Les mesures actives, basées sur une source de rayonnement interrogateur, sont moins répandues mais plus sensibles. La plus utilisée, l'imagerie photonique, γ ou X, n'est pas une mesure directe des menaces mais elle permet d'identifier rapidement, en contrôle de premier niveau, la présence d'éléments suspects dans les objets inspectés : bagages, conteneurs de transport aériens ou maritimes.

L'interrogation neutronique peut apporter, en analyse de deuxième niveau car elle nécessite un temps de mesure de quelques minutes, une détection des menaces N, C et E. Parmi les différentes techniques d'interrogation neutronique, celle dite de la « particule associée »² permet de focaliser spatialement l'inspection sur une zone suspecte repérée par imagerie photonique, ce qui la rend plus sensible.*

8. MODALITÉS DE CONTRÔLE DES SOURCES RADIOACTIVES EN FRANCE

En France, c'est l'ASN qui est responsable du contrôle des sources radioactives et des installations produisant des rayonnements ionisants. L'utilisation des sources radioactives est soumise à un régime d'autorisation ou de déclaration. Ces régimes s'appliquent indistinctement aux entreprises ou établissements qui détiennent des radionucléides, mais aussi à ceux qui font le commerce ou les utilisent sans les détenir directement.

❖ Régime d'autorisation

Le régime d'autorisation est le régime destiné à encadrer les activités nucléaire présentant les enjeux de radioprotection les plus importants, pour lesquels l'ASN vérifie, lors de l'instruction de la demande, que les risques ont bien été identifiés par le demandeur et que les barrières, destinées à en limiter les effets, sont appropriées.

❖ Régime déclaratif

La déclaration est une procédure simple, qui ne nécessite aucune transmission de documents justificatifs. Elle est particulièrement adaptée au nucléaire présentant les risques les plus faibles pour les personnes et l'environnement. Depuis 2018, l'ASN a étendu le champ des activités soumises à déclaration. L'extension au régime déclaratif devrait concerner à terme environ 6.000 dossiers jusqu'alors soumis au régime d'autorisation.

L'ASN est chargée de délivrer ces autorisations ; cela concerne pour ces domaines :

- l'importation, la distribution de radionucléides et de dispositifs en contenant.

² La technique de la particule associée est une méthode d'interrogation avec des neutrons rapides de 14 MeV permettant une caractérisation élémentaire de matériaux potentiellement massifs et offrant une information sur la localisation spatiale des éléments interrogés. Cela en fait une technique complémentaire de second niveau, suite à l'imagerie X utilisée couramment comme contrôle de premier niveau pour la détection des menaces terroristes dans les bagages et conteneurs de transport.

- la fabrication, la détention et l'utilisation de radionucléides, de produits ou dispositifs en contenant, d'appareils émettant des rayonnements ionisants, l'emploi d'accélérateurs et l'irradiation de produits de quelque nature que ce soit, y compris de denrées alimentaires.
- les irradiateurs faisant appel à des sources radioactives.

À noter que l'irradiation de produits sanguins, réalisées avec des générateurs de rayons X est également soumise depuis 2015 au régime de déclaration.

9. RÉFÉRENCES

- [1] Normes Fondamentales Internationales de Protection contre les Rayonnements Ionisants et de Sûreté des Sources de Rayonnements. Collection Sécurité N° 115. AIEA.1997.
- [2] Orientations techniques – Manuel de référence – Collection sécurité nucléaire de l'AIEA N° 5 – Identification des sources et des dispositifs radioactifs. 2009.
- [3] Technique de l'Ingénieur – Détection neutronique de matériels illicites avec la technique de la particule associée. Bernard PERROT, Guillaume SANNIE. Février 2015.
- [4] Techniques de l'ingénieur – Tomographie à rayons X. Jean-Louis GERSTENMAYER, Christian THIERY, 2013. Décembre 2013.
- [5] Revue Contrôle N° 173, de l'ASN : « *L'utilisation de sources radioactives dans l'industrie et la recherche* », décembre 2006 ».
- [6] Bilan 2014 de la sûreté et la radioprotection de l'ASN.
- [7] Sites internet des sociétés IONISOS, INTERCONTROLE, CEGELEC, CETIM, ARC Nucléart
- [8] Sites internet du CEA, de la SFEN, de l'UARGA, de l'ASN, de l'IRSN, de l'ESRF, du CENBG
- [9] Site Wikipédia, Site « Laradioactivité.com »
- [10] Rapport ASN : « *La sûreté et la radioprotection France en 2022* » <https://www.asn.fr>

Annexe 1 : Répartition des sources radioactives scellées par type d'utilisation

Utilisations	Nombre de sources
Gammagraphie	140
Mesure de densité et pesage	289
Mesure d'épaisseur	156
Mesure d'empoussièrement	70
Mesure d'épaisseur des couches minces	20
Détermination de grammage	204
Mesure de niveau	289
Mesure d'humidité et de densité	269
Diagraphie	13
Elimination d'électricité statique	21
Détecteur de fumée	2
Mise en œuvre de sources de neutrons	38
Analyse	80
Etalonnage	806
Enseignement	133
Recherche	19
Chromatographie	450
Détecteurs à capture d'électrons	56
Analyse par fluorescence X	1848

Annexe 2 : Liste des produits agroalimentaires autorisés en France Secs – Frais – Congelés

Produits	Objectif	Dose maximale autorisée (kGy)	Date
Aliments pour animaux de laboratoires	Stérilisation	25 - 40	17/10/75
Epices et aromates	Débactérisation	11	01/09/82
Aux, Oignons et échalotes	Anti-germination	0,15	21/06/84
Viande et volaille	Décontamination (élimination des bactéries pathogènes)	5	06/02/85
Légumes déshydratés	Débactérisation	10	17/05/85
Gomme et arabiques	Débactérisation	9	17/05/85
Flocons et germes de céréales	Débactérisation	10	17/05/85
Emballages « Bag in box »	Aseptiser	10	12/08/86
Emballages « Bag in box »	Débactérisation	25	12/08/86
Sang plasma cruor déshydraté	Débactérisation	10	19/11/86
Légumes et fruits secs	Désinfection	1	06/01/88
Cuisse de grenouilles congelées	Décontamination (élimination des bactéries pathogènes)	4	03/05/88
Farine de riz	Débactérisation	5	04/11/88
Fraises	Prolongation de la conservation	3	29/12/88
Herbes aromatiques surgelées	Débactérisation	10	15/05/88
Viande de volaille hachée broyée ou morcelée	Décontamination (élimination des bactéries pathogènes)	5	27/08/90
Blanc d'œuf liquide déshydraté ou congelé	Décontamination (élimination des bactéries pathogènes)	4	01/10/90
Crevettes décortiquées ou étêtées congelées	Décontamination (élimination des bactéries pathogènes)	5	02/10/90
Caséine et caséinate	Débactérisation	6	17/07/91
Fruits secs (abricots, figues, raisins, dattes)	Débactérisation	6	17/07/91
Colostrum bovin congelé	Débactérisation	10	09/01/92