HAL
open science

SOLEX : UNE SOURCE X MONOCHROMATIQUE ACCORDABLE ENTRE 1 ET 20 KEV POUR LA METROLOGIE

Christiane Bonnelle, Marie-Christine Lépy, Jean-Michel André, Antoine Avila, Laurent Ferreux, Philippe Jonnard, Daniel Laporte, Johann Plagnard, Jean-Claude Protas, Hugues Ringuenet

To cite this version:

Christiane Bonnelle, Marie-Christine Lépy, Jean-Michel André, Antoine Avila, Laurent Ferreux, et al.. SOLEX : UNE SOURCE X MONOCHROMATIQUE ACCORDABLE ENTRE 1 ET 20 KEV POUR LA METROLOGIE. Bulletin du Bureau National de Métrologie, 2003, 122, pp.11-17. hal-01179262

HAL Id: hal-01179262

https://hal.science/hal-01179262v1

Submitted on 22 Jul 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SOLEX : UNE SOURCE X MONOCHROMATIQUE ACCORDABLE ENTRE 1 ET 20 KEV POUR LA METROLOGIE

SOLEX : A TUNABLE MONOCHROMATIC X-RAY SOURCE FOR METROLOGICAL STUDIES IN THE 1 - 20 KEV ENERGY RANGE

Christiane Bonnelle[1] , Marie-Christine Lépy[a) 2], Jean-Michel André[1], Antoine Avila[1], Laurent Ferreux[2], Philippe Jonnard[1], Daniel Laporte[†1], Johann Plagnard[2], Jean-Claude Protas[2], Hugues Ringuenet[1]

1 - Laboratoire de Chimie Physique Matière et Rayonnement - Université Pierre et Marie Curie, CNRS UMR 7416 - 11, Rue Pierre et Marie Curie - F-75231 PARIS Cedex 05- FRANCE

2 - Bureau National de Métrologie / Laboratoire National Henri Becquerel CEA Saclay - F-91191 GIF-SUR-YVETTE Cedex - FRANCE

[a)] Auteur pour la correspondance : E-mail : marie-christine.lepy@cea.fr

Résumé

Une source de rayons X monochromatique accordable dans le domaine de (1 à 20) keV est décrite. Le rayonnement est produit par un tube à rayons X sans fenêtre, fonctionnant entre (1 et 50) kV. La sélection en énergie est réalisée à l'aide d'un spectromètre à cristal courbé cylindriquement utilisable, soit dans le mode réflexion (géométrie Johann), soit dans le mode transmission (géométrie Cauchois). Le passage de l'une à l'autre de ces géométries se fait par simple rotation du cristal. La direction du faisceau monochromatique est fixe. Cet appareillage est utilisable à la fois comme spectromètre à haute résolution et comme monochromateur. Il a été spécialement conçu pour des études de métrologie, telles que la caractérisation de détecteurs et d'optiques du domaine X.

Abstract

A tunable monochromatic x-ray source covering the (1-20) keV energy range is described. The initial x-ray beam is obtained from a windowless x-ray tube working in the (1-50) kV range. The energy selection is performed through a cylindrically bent crystal, used either in the reflection (Johann geometry) or in the transmission (Cauchois geometry) mode, by rotating the crystal holder by a 90° angle. The outgoing beam is emitted in a constant direction. This setup can be used as a high-resolution spectrometer and as a monochromator. It was specially designed for metrological studies such as characterization of detectors and optic components in the X-ray range.

I. Introduction

La caractérisation des détecteurs de rayonnement X et la mesure de grandeurs, telles que les coefficients de réflexion des systèmes optiques ou les coefficients de transmission des matériaux, nécessitent de disposer d'un faisceau X monochromatique accordable dans une large gamme d'énergie [1-3]. Un tel faisceau peut être obtenu en monochromatisant le rayonnement continu émis par un tube à rayons X (R.X.) ou par une ligne de lumière synchrotron. La forte intensité et la faible divergence du rayonnement synchrotron ont privilégié son emploi au cours de ces dernières années. Ainsi, de nombreuses expériences de métrologie ont été effectuées en utilisant le faisceau monochromatique issu du spectromètre à deux cristaux de la ligne SB3 du LURE (Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique, Orsay - France). Mais le faisceau n'est disponible que pendant de très courtes périodes, définies par des horaires très stricts.

C'est pourquoi il est apparu souhaitable au Laboratoire National Henri Becquerel de disposer d'une source X monochromatique répondant aux critères suivants:
- être accordable dans le domaine compris entre (1 et 20) keV;
- fournir un flux stable de quelques centaines de photons par seconde;
- avoir une direction d'émission constante afin que la position du détecteur reste inchangée quel que soit le domaine spectral;
- être d'un emploi facile et d'une grande souplesse.

Une telle source n'étant pas commercialisée, un appareillage, répondant à ces exigences, a été étudié et réalisé. Il est désigné sous le sigle SOLEX (Source Of Low-Energy X-rays).

II - Présentation de SOLEX

L'appareillage monochromatise le rayonnement issu d'un tube à R.X. à l'aide d'un spectromètre à cristal courbé cylindriquement, utilisé soit dans le mode "réflexion" (géométrie de Johann [4]), soit dans le mode "transmission" (géométrie Cauchois [5]). Le passage d'une géométrie à l'autre se fait par simple rotation du cristal. Dans les montages conventionnels, utilisant ces géométries [6-8], le tube à R.X. est fixe tandis que le cristal et le détecteur tournent simultanément pour satisfaire à la loi de Bragg. Ici, le détecteur reste fixe et ce sont le tube et le cristal qui tournent.

Nous décrirons successivement le tube à R.X., le cristal, le spectromètre proprement dit et la chambre à vide qui contient l'ensemble. Un schéma montrant les principaux éléments du montage est présenté dans la figure 1.

II.1. Le tube à R.X.

Le rayonnement X est produit à l'aide d'un tube à R.X. sans fenêtre, à anode interchangeable, spécialement réalisé par la société OPEA (Laboratoire d'Optique Electronique Appliquée) [9]. Les électrons sont émis par un filament de tungstène. Une haute tension, variable entre (1 et 50) kV, est appliquée entre l'anode et la cathode. Le courant est ajustable entre (0 et 100) mA et stabilisé à 10^{-2}. Le corps du tube et le support de l'anode, en cuivre, sont refroidis par une circulation d'eau. Diverses anodes peuvent être utilisées; ce sont actuellement des anodes massives en cuivre, nues et recouvertes d'un film d'or ou d'une feuille d'Hastelloy C©.

La direction moyenne du rayonnement fait un angle de 6° par rapport à la surface de l'anode. Le rayonnement ne subit aucune absorption durant son trajet jusqu'au détecteur. Il comporte à la fois une composante continue due au *bremsstrahlung* et les raies discrètes caractéristiques de l'anode. Ces raies sont utilisées pour étalonner le spectromètre en énergie et en résolution.

II. 2. Le cristal dispersif

Le rayonnement émis par le tube est dispersé par le cristal; celui-ci est courbé suivant une portion de cylindre de rayon R, égal à 0,4 m. La dispersion en longueur d'onde se fait sur un système de plans réticulaires hkl, convenablement choisi; elle suit la loi de Bragg

$$n\,\lambda = 2\,d_{hkl}\,(1 - T)\,\sin\theta$$

où d_{hkl} est l'espacement des plans réticulaires hkl, n est l'ordre de réflexion et T un terme correctif qui prend en compte l'effet de diffraction à l'ordre n.

Selon le domaine d'énergie des photons analysés, on utilise l'une ou l'autre des deux géométries. Dans la géométrie de Johann (mode réflexion), utilisée aux basses énergies, la réflexion se fait sur les plans hkl parallèles à la surface concave de la lame cristalline. Dans ce cas,

$$T = \frac{4\,d_{hkl}^2}{n^2}\,\frac{\delta}{\lambda^2}$$

où $\delta = 1 - \mu$ et μ est l'indice de réfraction.

Dans la géométrie Cauchois (mode transmission), qui doit être utilisée à haute énergie, les plans réflecteurs sont, soit perpendiculaires aux faces de la lame cristalline, soit

légèrement inclinés par rapport à celles-ci. Le facteur T est, soit nul, soit très petit par rapport à l'unité. Dans les deux cas, il est possible de négliger le terme (1-T).

Le passage de la géométrie Johann à la géométrie Cauchois se fait par simple rotation du support du cristal de 90° par rapport à l'axe du celui-ci. Cet axe est vertical, passe par le centre du cristal et il est parallèle à l'axe du cylindre de focalisation.

Parmi les paramètres qui caractérisent un spectromètre à cristal, citons tout d'abord le pouvoir dispersif, ou dispersion. Il s'obtient en différentiant la loi de Bragg. La dispersion en énergie le long du cercle de focalisation est :

$$\frac{\Delta E}{\Delta l} = \frac{E}{R \tan\theta}$$

où Δl est un élément de longueur. Le pouvoir dispersif augmente avec le rayon R et avec l'angle de Bragg θ, donc avec une diminution de la distance réticulaire d.

La seconde caractéristique importante est le pouvoir de résolution. Il caractérise la possibilité de séparer deux énergies voisines. Il s'écrit $E/\Delta E$, où ΔE est la largeur à mi-hauteur de la raie enregistrée par le spectromètre lorsque la radiation incidente est une raie infiniment étroite d'énergie E. Il dépend:
- des aberrations liées à la diffraction du rayonnement par le cristal dispersif, c'est-à-dire de sa courbe de diffraction, de la pénétration du rayonnement dans le cristal et de ses imperfections,
- des aberrations géométriques liées aux dimensions du cristal, à l'ouverture des fentes d'entrée et de sortie du spectromètre,
- des imprécisions mécaniques.

Le pouvoir de résolution d'un spectromètre à cristal courbé augmente avec le pouvoir dispersif. Lorsque le rayon de courbure est fixé, on améliore la résolution en énergie en utilisant un cristal de distance réticulaire d faible, compatible avec le domaine spectral considéré. Pour un même cristal, le pouvoir de résolution varie le long du domaine spectral car les effets mentionnés ci-dessus varient avec l'énergie.

Une troisième caractéristique importante du cristal est son pouvoir réflecteur. Il définit l'intensité réfléchie et c'est l'un des paramètres qui conditionnent la luminosité de l'instrument.

Différents cristaux ont été sélectionnés pour couvrir l'ensemble du domaine spectral souhaité (Table I). Ils ont été choisis en raison de leurs propriétés cristallographiques et mécaniques. Il est en effet nécessaire de disposer de lames minces, orientées, d'épaisseur convenable, aussi parfaites que possibles et pouvant se courber facilement.

Ces lames doivent posséder des qualités spécifiques telles qu'une bonne résolution en énergie, une haute réflectivité, une grande stabilité sous le bombardement électromagnétique dans les conditions d'utilisation. Pour le quartz et LiF, il est possible d'utiliser une même lame, convenablement orientée, dans les deux géométries, c'est-à-dire en mode réflexion et en mode transmission.

II.3 Le spectromètre

La partie essentielle du spectromètre est le mécanisme qui permet de réaliser la condition de Bragg. Les mouvements simultanés de rotation du cristal (selon un angle θ) et de rotation de la source (selon un angle 2θ) nécessaires pour que cette condition géométrique soit satisfaite sont mécaniquement les même que ceux décrits dans la référence 10. Toutefois, ici c'est le détecteur qui est en position fixe et non la source comme dans le dispositif décrit dans la référence 10. Cette disposition a l'avantage de permettre la comparaison directe des résultats obtenus pour différents détecteurs à une même longueur d'onde.

Une fente ajustable, située sur le cylindre focal, ou cylindre de Rowland, de rayon $R/2$, réduit la divergence du faisceau incident sur le cristal et agit comme une source virtuelle. Une fente ajustable, située sur le cylindre focal dans la direction d'émergence du rayonnement réfléchi par le cristal, donne l'image de la source. Le mouvement simultané de la source X et du cristal est réalisé de la manière suivante. La fente d'entrée, l'axe de rotation du cristal et la fente de sortie du spectromètre sont connectés par trois bras passant par le centre du cercle de Rowland, appelés bras radiaux. La condition de Bragg est réalisée en égalisant les distances entre la fente d'entrée et le cristal d'une part, le cristal et la fente de sortie d'autre part. Ces distances sont égales à $R \sin\theta$, donc proportionnelles à la longueur d'onde. Chacune de ces distances est matérialisée à l'aide d'une vis de précision. La longueur utile des vis varie grâce à des moteurs pas à pas (360 000 pas/révolution). L'ensemble formé par les deux vis entraîne le déplacement des bras radiaux et permet de varier l'angle de Bragg entre 15° et 70°. L'avantage de ce dispositif est que les mouvements de rotation du cristal (θ) et de rotation de la source (2θ) sont réalisés grâce à des mouvements de translation, linéairement proportionnels à la longueur d'onde.

Le cristal peut tourner autour de son axe grâce à un troisième moteur. Ce mouvement, indépendant des précédents, permet de varier l'orientation du cristal (passage du mode réflexion au mode transmission) et d'optimiser la réflectivité.

II.4 La chambre à vide

Le tube à R.X., le spectromètre équipé du cristal et le détecteur sont mis en place dans une chambre à vide circulaire en acier d'un mètre de diamètre, de 0,40 m de hauteur et de 0,01 m d'épaisseur. Cette chambre sert de protection contre le rayonnement. L'utilisation d'un tube à R.X. sans fenêtre nécessite que la pression soit très basse ((10^5 - 10^{-4}) Pa) dans la chambre. Ces conditions sont obtenues à l'aide de deux pompes primaires, relayées par trois pompes turbomoléculaires lorsque la pression devient inférieure à 50 Pa. Les pompes turbomoléculaires sont refroidies à l'eau. La valeur de la pression est contrôlée en permanence. La figure 2 présente une vue de l'intérieur de la chambre.

II.5 L'acquisition des données

L'ensemble de l'expérience est contrôlé par un ordinateur utilisant le logiciel LabVIEW™ : le tableau de commandes régit le pompage, le déplacement du spectromètre, les dispositifs de sécurité (contrôle de la pression, du circuit de refroidissement, de la haute tension). La première étape d'une expérience est le pompage; dès que la pression requise est atteinte, il est possible de mettre en route la haute tension. La haute tension et l'intensité du courant sont ajustées par l'utilisateur. C'est actuellement la seule étape qui est faite manuellement. Lorsque le tube fonctionne, l'unité de contrôle met en marche le mouvement des moteurs et l'acquisition des données par le détecteur. Elle permet de sélectionner une position spécifique ou un domaine de balayage, soit en unités d'incréments moteur, soit directement en unité d'énergie (eV) si le montage a été préalablement étalonné (cf. § III.I). Le nombre d'acquisitions et le temps de comptage sont sélectionnés par l'utilisateur en fonction du type d'expérience. Chaque comptage est automatiquement indiqué sur l'écran de contrôle et l'ensemble de la séquence peut être sauvegardé sur un fichier externe.

III. Performances de la source

Pour les premiers tests, nous avons utilisé des détecteurs à semi-conducteurs conventionnels (Si(Li) et HPGe) ainsi qu'un détecteur au silicium à dérive [11] nécessitant un refroidissement modéré par effet Peltier, ce qui évite les contraintes imposées par l'emploi d'azote liquide. Ces détecteurs peuvent être utilisés, soit en mode comptage, soit en mode dispersion d'énergie. Dans les deux cas, le taux de comptage dépend du domaine spectral, de la haute tension et du courant électronique du tube à R.X., de la luminosité du spectromètre, c'est-à-dire de la réflectivité du cristal et de la largeur de la bande passante, ainsi que du rendement du détecteur. En l'absence de raies caractéristiques, le taux de comptage enregistré est de quelques dizaines à quelques

centaines de coups par seconde, en chaque point du domaine spectral. Il est donc possible de caractériser la fonction de réponse d'un détecteur à une longueur d'onde quelconque en utilisant le *bremsstrahlung*. Lorsqu'on sélectionne une raie X caractéristique, le nombre de coups/seconde atteint plusieurs dizaines de milliers.

III.1 Etalonnage en énergie et en résolution

Pour les étalonnages en énergie et en résolution, le détecteur est utilisé en mode comptage et la distribution d'intensité du rayonnement est obtenue en balayant le domaine spectral choisi. Pour un cristal donné, l'intensité qui arrive sur le détecteur est une fonction de la réflectivité du cristal. Cette fonction ne modifie pas la relation qui existe entre la position du spectromètre et l'étalonnage en énergie, associée à ce cristal. L'étalonnage est obtenu à l'aide de raies X caractéristiques émises par l'anode. Nous avons utilisé les raies L du cuivre au voisinage de 900 eV et les raies K de divers éléments de transition 3d, situées entre (5 et 9) keV. En portant les énergies des raies en électronvolts en fonction de la position du spectromètre en unité de pas moteur, on obtient directement les facteurs de conversion qui sont utilisés pour étalonner la source en électronvolts.

La résolution en énergie de la source caractérise la monochromaticité du rayonnement. Elle est déterminée en comparant la largeur expérimentale d'un pic à sa largeur intrinsèque. Un exemple d'étalonnage en résolution dans le domaine des faibles énergies est présenté dans la figure 3. Le pic à 930 eV est l'émission Lα du cuivre, observée à l'aide d'un cristal de béryl. La largeur totale mesurée à mi-hauteur, L_{obs}, est 3,6 eV; cette valeur inclut la largeur intrinsèque de l'émission, L_{vraie}, estimée à 3,2 eV. Utilisant la formule

$$3/2(\Delta E)^2 = L_{obs}^2 - L_{vraie}^2,$$

valable pour un spectromètre à cristal courbé "parfait" utilisé en mode réflexion [12], nous obtenons une résolution, $E/\Delta E$, égale à 700 dans ce domaine spectral. Il faut noter que l'émission Cu Lα est due aux transitions à partir de la bande de valence 3d. Contrairement aux transitions entre les niveaux de cœur, la forme de cette émission n'est pas lorentzienne et ne sera pas discutée ici.

Dans la figure 4, nous présentons le doublet Cu K$\alpha_{1,\alpha 2}$, à (8048 et 8028) eV, observé avec un quartz $(13\bar{4}0)$. La différence d'énergie mesurée entre les raies Kα_2 et Kα_1 est (20,3 ± 0,1) eV, en accord avec la séparation spin-orbite $2p_{1/2}$-$2p_{3/2}$, dont la valeur théorique est égale à 20,0 eV. Le rapport d'intensité Kα_1/Kα_2 est 1,96 ± 0,01 en accord avec la valeur théorique égale à 1,95. Les largeurs totales à mi-hauteur, L_{obs}, des raies Kα_1 et Kα_2 sont, respectivement, (4,5 et 4,9) eV. Leurs largeurs intrinsèques, L_{vraie},

sont estimées à (2,1 et 2,4) eV. Utilisant la relation ci-dessus, nous obtenons une résolution meilleure que 2000.

Dans le mode réflexion, la fonction instrumentale peut être approximée à un rectangle et les principaux effets d'élargissement sont dus à la courbe de diffraction du cristal "parfait" et aux dimensions du cristal [12]. Ainsi, pour l'émission Cu Lα, la résolution théorique est de l'ordre de 2500. Dans nos conditions expérimentales, la fonction d'élargissement inclut donc un terme supplémentaire, provenant très probablement d'aberrations liées à la courbure du cristal.

Dans le mode transmission, les conditions optimales de résolution sont obtenues lorsque les angles de Bragg sont petits et les plans réflecteurs sont faiblement inclinés par rapport à la normale aux faces du cristal. La forme de la fonction instrumentale est alors assimilable à un rectangle. Lorsque les plans réflecteurs sont perpendiculaires aux faces de la lame cristalline et que l'angle de Bragg est supérieur à 30°, la fonction instrumentale est dominée par l'élargissement dû à l'épaisseur du cristal et sa valeur peut devenir supérieure à la largeur de la fente de sortie du spectromètre. C'est le cas dans nos conditions expérimentales (plans normaux et $\theta \approx 41°$). La largeur de la fonction instrumentale est donc définie par la largeur de la fente et sa forme est proche d'une fonction de Gauss. Ainsi, les raies Cu Kα sont bien représentées par des fonctions de Voigt (Fig. 4). Dans cet ajustement, les largeurs des composantes lorentziennes sont égales aux largeurs naturelles des raies Kα_1 et Kα_2 et les largeurs des composantes gaussiennes sont respectivement (1,5 et 1,6) eV.

III.2 Pureté spectrale

La pureté spectrale du faisceau arrivant sur la fente de sortie du spectromètre a été déterminée à l'aide d'un détecteur travaillant en mode dispersion d'énergie. Cette mesure permet d'évaluer l'intensité du fond continu relativement à celle du pic principal et de détecter la présence d'éventuelles harmoniques et de pic parasites.

Un spectre, émis par une anode de cuivre excitée sous 8 kV, dispersé par un cristal de LiF (200) en mode réflexion, au voisinage de 5 keV et enregistré par un détecteur au germanium de haute pureté, est porté figure 5a. Aucune raie caractéristique n'est présente dans ce domaine spectral. Le pic principal est superposé sur un fond relativement intense; ce fond provient du rayonnement diffusé et non dispersé, qui peut atteindre directement le détecteur. Afin de diminuer les diffusions parasites, le détecteur a été équipé d'un collimateur en plomb. Celui-ci réduit de manière significative la contribution du rayonnement diffusé; mais les raies de fluorescence M du plomb

apparaissent ainsi qu'un pic dû à l'aluminium (Fig. 5b). Ce dernier a été identifié comme provenant du support du cristal. En vue d'améliorer la pureté spectrale, le collimateur en plomb a été remplacé par un collimateur en cuivre et le support du cristal a été recouvert de kapton. Le nouveau spectre est présenté dans la figure 5c. Le rapport pic/fond est alors 130. Ce résultat a été comparé au spectre obtenu à la même énergie avec le monochromateur à deux cristaux du LURE. Avec cet appareillage, équipé d'un petit collimateur et du même détecteur, le rapport pic/fond est égal à 150 (Fig. 5d), donc du même ordre de grandeur que celui obtenu avec SOLEX.

IV. Perspectives offertes par SOLEX en métrologie

Grâce à sa bonne résolution spectrale, SOLEX peut être utilisée comme un spectromètre à haute résolution. La détermination de grandeurs, telles que la distribution en énergie et l'intensité relative d'émissions X, peut donc être menée à bien. La pureté spectrale, estimée à environ 99 %, associée aux qualités intrinsèques de résolution, font de SOLEX une source X monochromatique accordable de bonne qualité. Des études spécifiques nécessitant une bonne sélection en énergie du faisceau primaire peuvent être programmées. Parmi celles-ci, citons la caractérisation de la fonction de réponse des détecteurs, la caractérisation des propriétés réflectrices de composants optiques et la détermination des coefficients d'atténuation des matériaux. Enfin, équipé d'un détecteur de référence, l'appareillage pourra être utilisé pour effectuer l'étalonnage absolu du rendement des détecteurs de rayonnement X.

Les qualités technologiques et la grande souplesse d'utilisation de SOLEX en font une source performante dans le domaine de (1 à 20) keV. Malgré sa faible intensité relative, cette source de laboratoire permettra donc de poursuivre, dans des conditions satisfaisantes, certaines des études de métrologie effectuées précédemment au LURE.

Remerciements
Les auteurs dédient cet article à la mémoire de Daniel Laporte. Ils souhaitent remercier C. Dulieu, I. Jarrige et J. Thirion pour leur participation à certaines expériences. La réalisation de SOLEX n'a été possible que grâce à l'appui financier du Bureau National de Métrologie.

Légendes des figures

Figure 1 : Le mécanisme en mode réflexion: vue de dessus. θ est l'angle de Bragg. C est le centre du cristal; l'axe vertical en C est l'axe de rotation du cristal.

Figure 2 : Photographie de l'appareillage: vue de dessus.

Figure 3 : Emission Lα du cuivre observée en mode réflexion à l'aide d'un cristal de béryl $(10\bar{1}0)$: haute tension = 5 kV, courant = 20 mA, valeur d'un pas en unité d'énergie = 0,1 eV, temps de comptage = 2 s par pas.

Figure 4 : Doublet Kα du cuivre observé en mode transmission à l'aide d'un cristal de quartz $(13\bar{4}0)$ (points); ajustement par deux fonctions de Voigt (lignes continues): haute tension = 15 kV, courant = 70 mA, valeur d'un pas en unité d'énergie = 0,1 eV, temps de comptage = 20 s par pas.

Figure 5 : Spectre d'une anode en cuivre à 5 keV, dispersé en énergie à l'aide d'un cristal LiF (200) utilisé en mode réflexion. a) spectre initial; b) le détecteur est équipé d'un collimateur en plomb; c) le détecteur est équipé d'un collimateur en cuivre et le support du cristal est recouvert de kapton; d) spectre obtenu au LURE sur la ligne SB3.

Références

[1] F. Scholze, et G. Ulm, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **339,** 49 (1994).

[2] M.C. Lépy, J. Plagnard, P. Stemmler, G. Ban, L. Beck, et P. Dhez, *X-Ray Spectrom.* **26**, 195 (1997).

[3] F. Scholze, et M. Procop, *X-Ray Spectrom.* **30**, 69 (2001).

[4] H.-H. Johann, *Z. Phys.* **69**, 185 (1931).

[5] Y. Cauchois, *J. Phys. (Fr.)* VII, **3**, 320 (1932).

[6] C. Bonnelle, F. Vergand, P. Jonnard, J.-M. André, P. Avila, P. Chargelègue, M.-F. Fontaine, D. Laporte, P. Paquier, A. Ringuenet, et B. Rodriguez, *Rev. Sci. Instrum.* **65,** 3466 (1994).

[7] J.M. André, M. Kefi, A. Avila, P. Couillaux, et C. Bonnelle, *Rev. Sci. Instrum.* **58**, 374 (1987).

[8] E. Obaranova, M. M. Stepanenko, et N.R. Pereira, *Rev. Sci. Instrum.* **72**, 1416 (2001).

[9] www.opea.com

[10] C.F. Hague, et D.Laporte, *Rev. Sci. Instrum.* **51,** 621 (1980).

[11] P. Lechner, C. Fiorini, R. Hartmann, J. Kemmer, N. Krause, P. Leutenegger, A. Longoni, H. Soltau, D. Stötter, R. Stötter, et U. Weber, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **458,** 281 (2001).

[12] Y. Cauchois, et C. Bonnelle, Atomic Inner-Shell Processes, Vol. II, *Experimental Approaches and Applications*, édité par B. Crasemann, Academic Press (1975).

Table I : Caractéristiques des cristaux utilisés dans SOLEX. *d* est la distance réticulaire. R et T sont respectivement les modes par réflexion et par transmission.

Cristal	**Plan**	d_{hkl}**(nm)**	**Mode**
Béryl	$(10\bar{1}0)$	0,794	R
InSb	(111)	0,374	R
LiF	(200)	0,201	R, T
Quartz	(0001)	0,180	R
LiF	(220)	0,142	T
Quartz	$(13\bar{4}0)$	0,117	T
LiF	(420)	0,090	T

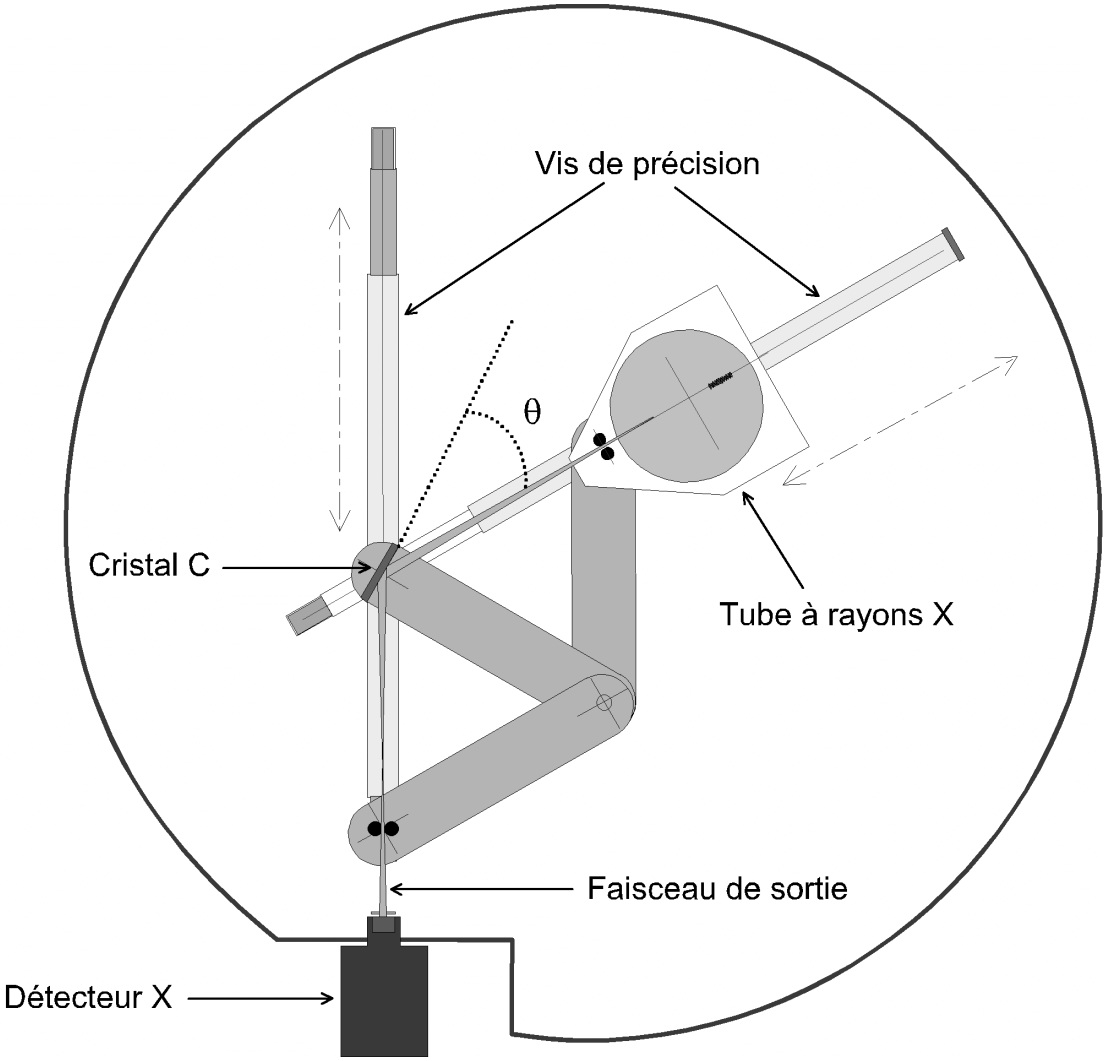


Figure 1 : Le mécanisme en mode réflexion: vue de dessus. θest l'angle de Bragg. C est le centre du cristal; l'axe vertical en C est l'axe de rotation du cristal.

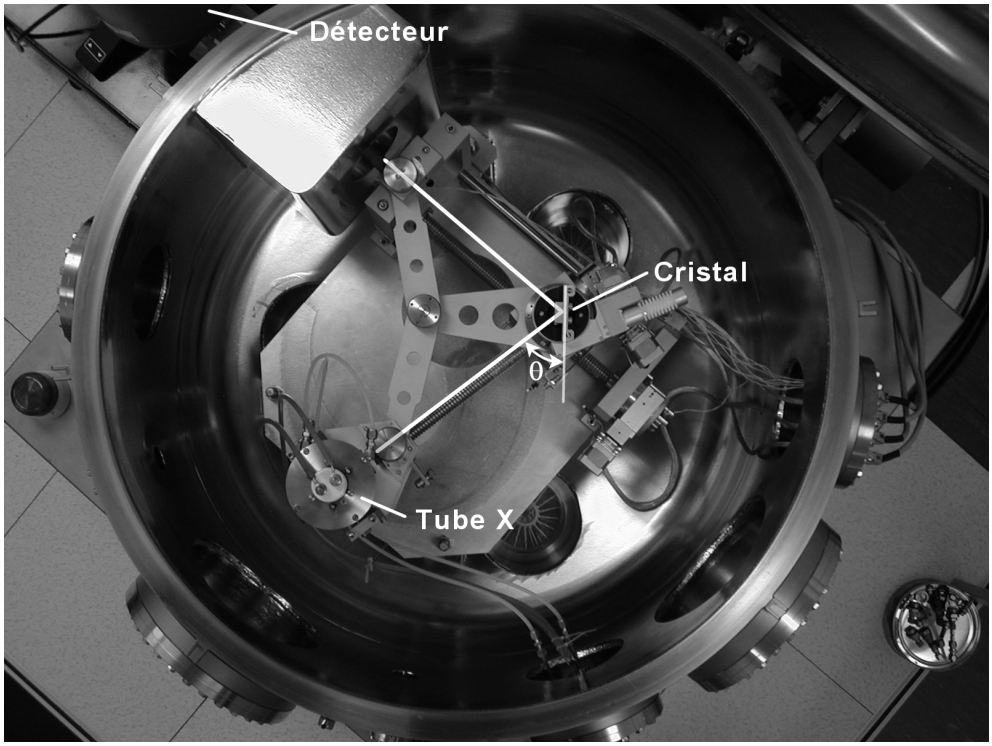


Figure 2 : Photographie de l'appareillage: vue de dessus.

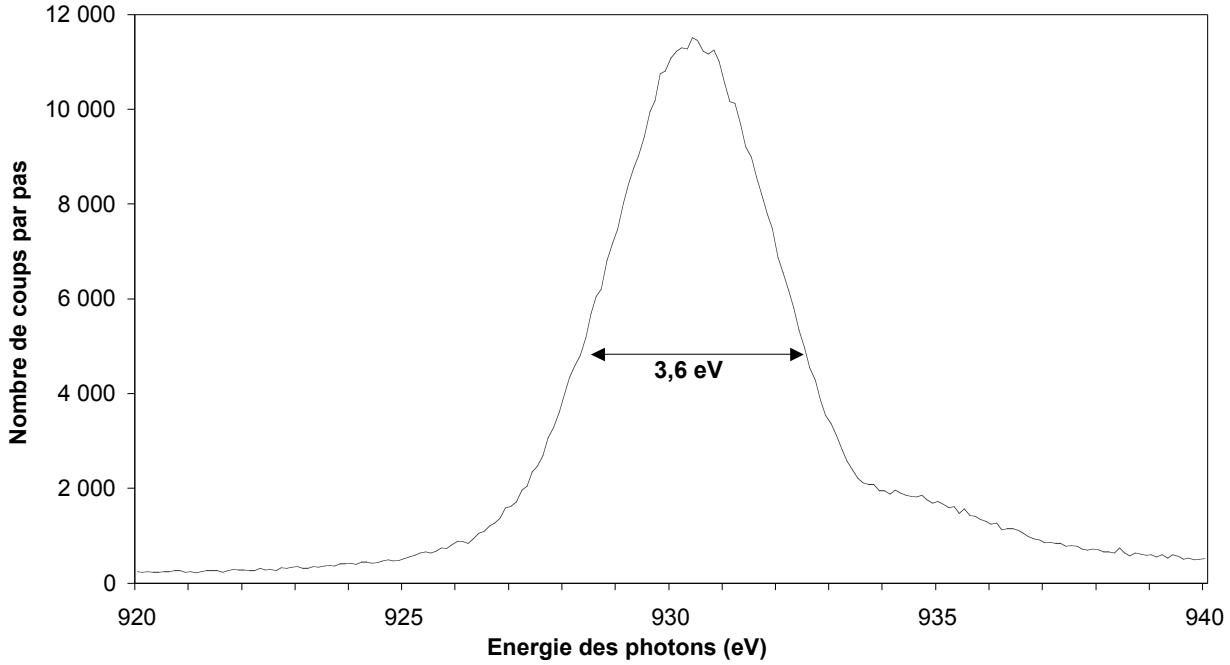


Figure 3 : Emission Lα du cuivre observée en mode réflexion à l'aide d'un cristal de béryl $(10\bar{1}0)$: haute tension = 5 kV, courant = 20 mA, valeur d'un pas en unité d'énergie = 0,1 eV, temps de comptage = 2 s par pas.

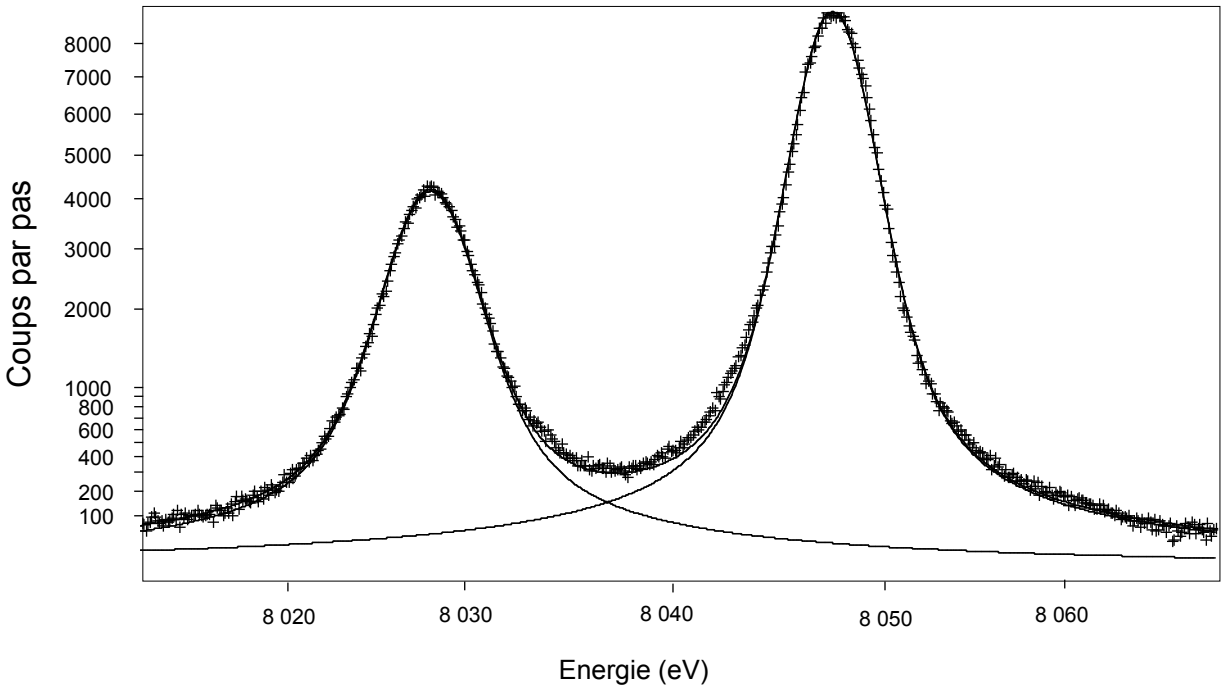
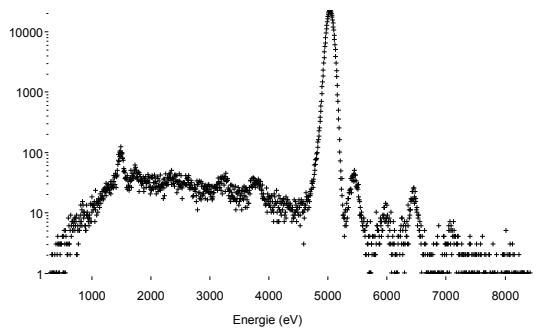
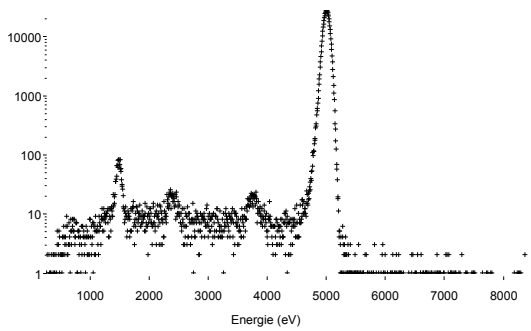


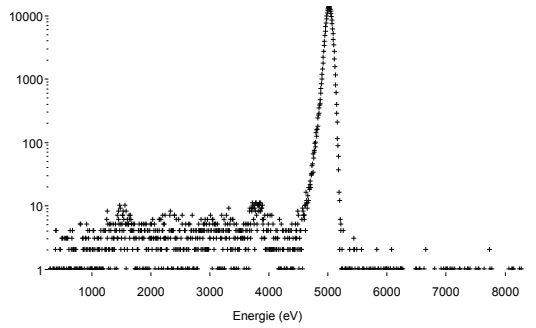
Figure 4 : Doublet Kα du cuivre observé en mode transmission à l'aide d'un cristal de quartz $(13\bar{4}0)$ (points); ajustement par deux fonctions de Voigt (lignes continues): haute tension = 15 kV, courant = 70 mA, valeur d'un pas en unité d'énergie = 0,1 eV, temps de comptage = 20 s par pas.



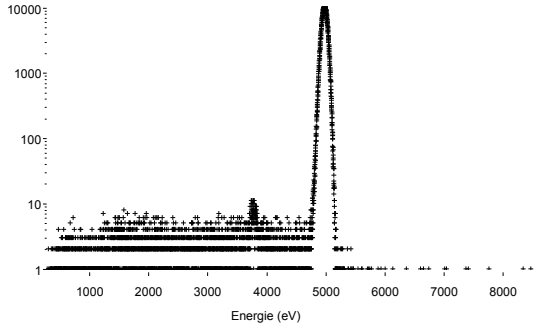
a)



b)



c)



d)

Figure 5 : Spectre d'une anode en cuivre à 5 keV, dispersé en énergie à l'aide d'un cristal LiF (200) utilisé en mode réflexion.
a) spectre initial; b) le détecteur est équipé d'un collimateur en plomb; c) le détecteur est équipé d'un collimateur en cuivre et le support du cristal est recouvert de kapton;
d) spectre obtenu au LURE sur la ligne SB3.