

Le système de mesure 3D portable à bras six axes dans la métrologie des accélérateurs de particules

Un instrument adapté à la mesure de la géométrie du nouveau dispositif expérimental de détection de rayonnements gamma installé au GANIL¹

■ Rémy BEUNARD, ingénieur géomètre DPE

Les méthodes de mesures tridimensionnelles avec ou sans contact avec l'objet demeurent variées, mais le choix du système de mesure doit répondre aux exigences de précision tout en étant adapté au contexte expérimental. Cet article a pour but de présenter le système de mesure 3D portable à bras six axes associé au logiciel de calcul G-Pad[®] utilisé au GANIL lors du mesurage de la mécanique supportant le nouveau dispositif expérimental de détection de rayonnements gamma. Cet instrument permet le relevé de points dans les trois dimensions (XYZ) au moyen d'un capteur à contact. L'incertitude de mesure sur un point unique de l'objet est évaluée à ± 0.2 mm ($k=2$). Notre choix a été motivé d'une part par la géométrie complexe de l'objet et d'autre part par l'environnement très défavorable à la mise en place d'une instrumentation conventionnelle. L'acquisition des informations dimensionnelles de l'objet s'est limitée à la mesure de plans et de cercles.

■ MOTS CLES

Coordonnée tridimensionnelle - écart-type - géométrie - métrologie - palpeur - référentiel - système de mesure 3D

Exogam est le nom du nouveau dispositif expérimental de détection de rayonnements gamma (fig. 1) installé au Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL) à Caen. Il est composé de 16 détecteurs fonctionnant avec des cristaux de germanium hyper purs et assemblés dans une géométrie très compacte (fig. 3). Ce dispositif est dédié à l'étude de la structure des noyaux des atomes, ce qui est l'un des axes de recherche fondamentale du Ganil. Il détecte et mesure l'énergie des photons gamma.

Lorsqu'un noyau projectile du faisceau incident percute un autre noyau appartenant à une cible, le choc s'accompagne d'émission de fragments, de rayonnements et de particules. Pour identifier et/ou étudier les produits de réactions, des détecteurs sont placés autour de la cible (fig. 2).

Une des caractéristiques des détecteurs germanium est leur excellente résolution en énergie ($> 0,2\%$) ce qui permet

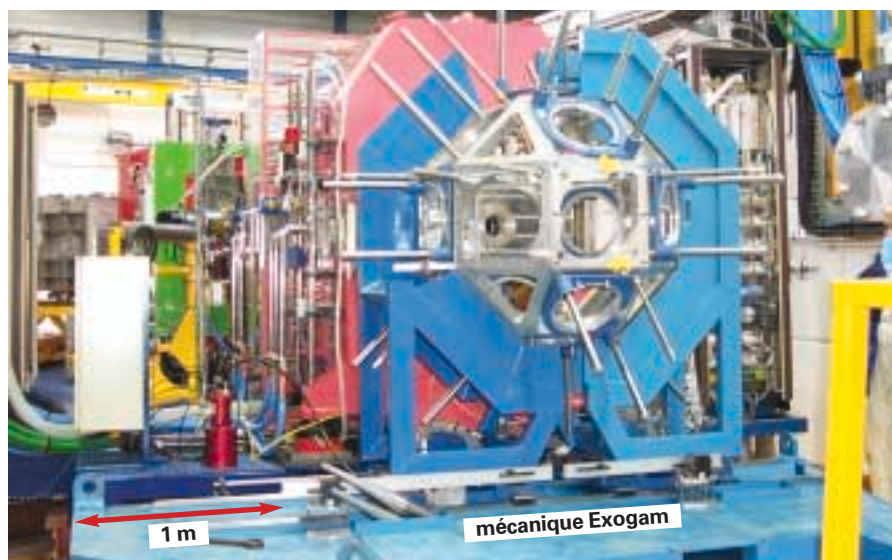


Figure 1 : Mécanique Exogam couplée au spectromètre Vamos

des études détaillées et précises de la structure des noyaux étudiés. Dans certains mécanismes de réaction, la vitesse de recul du noyau émetteur gamma peut être grande (jusqu'à 10 % de la vitesse de la lumière) ce qui induit un effet Doppler important. Les consé-

quences sont de deux ordres :

- une détérioration de la résolution en énergie des rayonnements mesurés (celle-ci dépend de la vitesse de recul et de l'ouverture angulaire des détecteurs) ;
- un déplacement des pics mesurés. ■■■

(1) GANIL : Grand Accélérateur National d'Ions Lourds

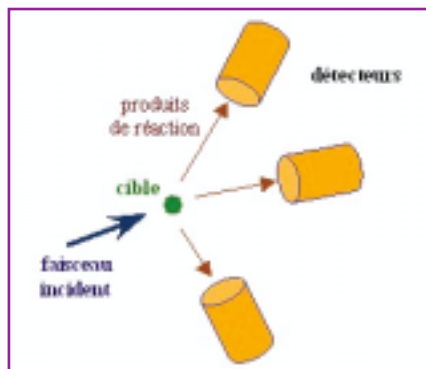


Figure 2 : schéma de principe du système de détection

Pour corriger ce deuxième aspect, il est impératif de connaître avec précision la position angulaire des détecteurs de rayonnements gamma. Cette position est mesurée par le géomètre-métrologue qui fournira les coordonnées tridimensionnelles de chaque détecteur dans un système propre à l'objet. Les méthodes de mesures dimensionnelles avec ou sans contact demeurent variées, mais le choix du système de mesure doit répondre aux exigences de précision tout en étant adapté au contexte expérimental. Après une expertise des moyens existants, nous avons opté pour le système portable à bras de mesure six axes de la société ROMER, associé au logiciel de calcul G-Pad® (fig. 4). Il permet le relevé de points dans les trois dimensions XYZ au moyen d'un capteur à contact. La chaîne de mesure complète a été louée pour un essai. A ce stade, il a été utile d'analyser le coût d'une telle opération de métrologie.

Notre choix a été motivé d'une part par la géométrie complexe de l'objet et d'autre part par l'environnement très défavorable à la mise en place d'une instrumentation conventionnelle.

Problématique

L'objectif à atteindre était l'acquisition des informations dimensionnelles de la structure telle qu'elle a été effectivement réalisée (Tel Que Construit) et en déduire les paramètres géométriques ρ , θ et ϕ des détecteurs germanium implantés autour de la cible (fig. 5). Ces paramètres sont bien évidemment liés à la géométrie de la structure mais dépendent notamment de l'ajustement mécanique des brides mobiles sur les guides (fig. 3).

La situation idéale aurait été d'avoir à

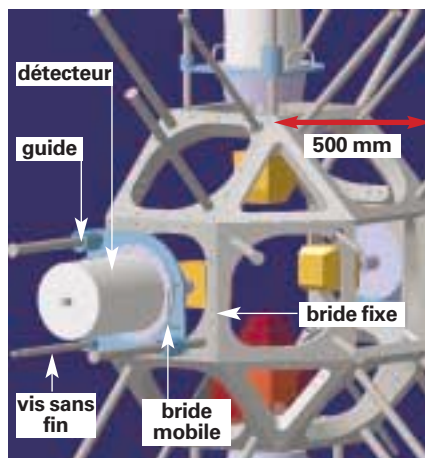


Figure 3 : vue CAO éclatée de la structure équipée de 4 détecteurs

notre disposition tous les détecteurs en place et de les mesurer directement. Mais cette opération n'a pas été réalisable : d'un côté par la disponibilité des détecteurs au moment de la mesure et de l'autre par l'inaccessibilité. Il a été décidé de calculer leur position effective à partir de la connaissance de la géométrie des brides mobiles qui est un des éléments essentiels dans la détermination des coordonnées finales. Au cours d'une expérience, la position du détecteur peut varier linéairement, ainsi deux points seront déterminés sur la normale issue du centre de la bride mobile. Ils correspondent aux deux positions extrêmes d'implantation du détecteur sur le guide.

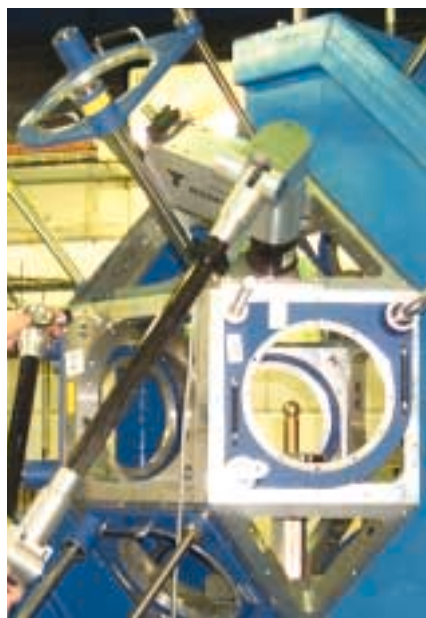


Figure 4 : fixation du bras de mesure 6 axes sur une des brides triangulaires de la structure

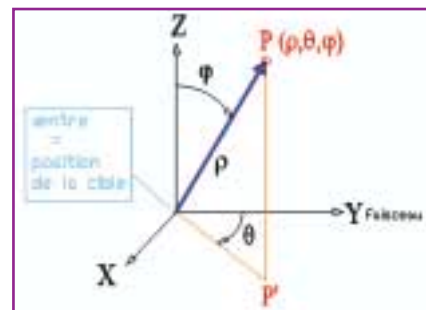


Figure 5 : système de coordonnées utilisé

Le déplacement linéaire du détecteur se fait au moyen d'une vis sans fin.

Le souhait du physicien était avant tout de connaître les angles θ et ϕ des détecteurs par rapport à la cible à $\pm 0.2^\circ$. Une grandeur qui correspond à un angle sous lequel on voit un objet de diamètre 0,7 mm à une distance de 100 mm de la cible. Cette distance coïncide sensiblement avec l'implantation d'un détecteur au plus proche de la cible. A angle constant, le diamètre de cet objet varie proportionnellement en fonction de son éloignement de la cible. Si nous considérons cette grandeur de $\pm 0.2^\circ$ comme l'écart maximal toléré, l'écart type de l'instrument de mesure ne devra pas dépasser : $\pm 0.35 \text{ mm} / 2.66$ (loi normale) soit $\sigma = 0.13 \text{ mm}$.

Principe de mesure des points 3D

Nous ne donnerons pas d'explications techniques sur la conception de cet instrument (fig. 4), qui sortent de nos compétences, mais il nous semble intéressant de le présenter rapidement de manière à faciliter la lecture de cet article. Nous renvoyons le lecteur vers le site Web de la société ROMER à l'adresse électronique suivante : www.romer.fr.

Cette instrumentation est d'une grande adaptabilité. La conception du bras permet une utilisation dans de multiples positions grâce aux six axes de rotation. La mesure peut démarrer sans travaux de géométrie au préalable. L'intérêt du système associé au logiciel est de traiter directement des entités géométriques comme le cylindre, le plan, les facettes, etc. L'extrémité du bras est équipée d'un capteur avec contact donnant directement les coordonnées tridimension-

nelles du point palpé après validation de la mesure. L'originalité du système est la possibilité donnée à l'opérateur de contrôler le pointeur de l'ordinateur. Cela lui permet de commander le clavier virtuel, les différents menus et paramètres du logiciel. L'écart type expérimental donné par le constructeur sur un point unique pour ce bras équipé de codeurs de haute résolution à incrémentation est de 0.07 mm avec une incertitude de mesure évaluée à ± 0.14 mm ($k = 2$).

Mise en œuvre de la chaîne de mesure

La préoccupation principale a été de placer judicieusement le bras de mesure sur la structure de manière à limiter le nombre de stations à deux. Deux brides opposées ont été choisies (fig. 4). Après une initialisation des axes et l'ouverture des fichiers, l'opération de mesure peut démarrer. A ce stade nous pouvions déterminer un référentiel fixe ou quelconque. La deuxième solution a été retenue d'une part par la simplicité de sa mise en œuvre et d'autre part par la possibilité de changer par la suite les paramètres géométriques de ce référentiel. Le déplacement du bras sur la deuxième station est une opération assez délicate dans le sens où il faut rester dans un référentiel unique pour l'ensemble des mesures. Pour ce faire, la méthode consiste à allouer des coordonnées théoriques à un ensemble de points, au moins trois, mesuré précédemment. Le logiciel ajuste les valeurs théoriques à l'ensemble de points mesurés en réduisant l'écart sur tous les points. Si l'écart type est supérieur à la valeur choisie a priori, la mesure est rejetée. Les coordonnées définitives ont été exprimées dans un système propre à l'objet après transformation 3D. La précision atten-

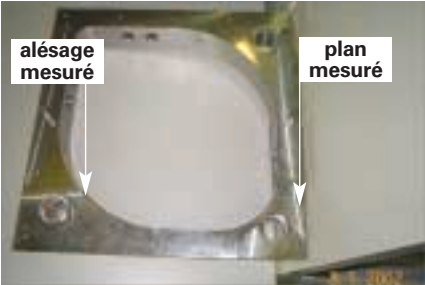


Figure 6 : vue d'une bride fixe (un des éléments composant la structure)

due sur la mesure de chaque point en tenant compte du déplacement du bras a été estimée à $\sigma = 0.10$ mm. Cet écart type qui caractérise la précision est en accord avec le cahier des charges.

L'objet à mesurer

L'objet à mesurer est composé de brides dont nous voulions connaître les paramètres géométriques.

■ Contrôle de la géométrie de la structure

Ce premier contrôle a permis de définir la géométrie de l'objet et de valider l'assemblage des 18 brides de la structure. Afin de définir le centre géométrique d'une bride, il a été nécessaire de relever une série de points (au moins trois) sur la face et à l'intérieur de l'alésage de manière à projeter le centre de celui-ci sur le plan (fig. 6). A tout moment nous avons pu suivre l'évolution de la mesure par l'affichage du sigma et, l'annuler en cas d'anomalie.

La connaissance des coordonnées cartésiennes de deux brides opposées a permis d'évaluer un centre provisoire. Le vrai centre a été fixé en prenant la moyenne arithmétique des coordonnées des huit centres définis précédemment. Le paramètre ρ moyen obtenu est de 483.08 mm pour une valeur théorique de 482.84 mm. Les écarts angulaires

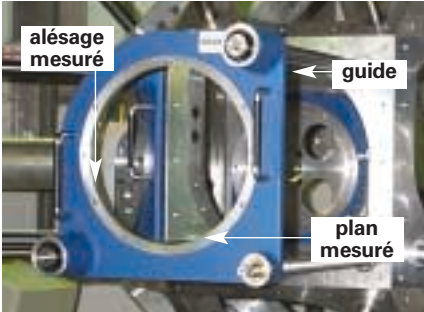


Figure 7 : vue de la bride mobile en position reculée sur son guide

thêta et phi maximum constatés sont respectivement de -0.06° et de $+0.08^\circ$. Ces valeurs indiquent que l'objet construit est proche de sa définition théorique (table 1).

■ Relevé tridimensionnel de l'alésage interne des brides mobiles recevant les détecteurs germanium

La position tridimensionnelle des brides mobiles recevant les détecteurs a été mesurée en deux points correspondant au déplacement extrême du détecteur sur son guide support (fig. 7). Le principe de mesure utilisé au chapitre précédent a été réitéré pour cette opération. Les écarts angulaires thêta et phi maximums constatés au niveau du centre de la bride mobile par rapport aux angles théoriques sont respectivement de $+0.06^\circ$ et de $+0.07^\circ$. Ils se rapprochent des valeurs observées lors du mesurage de la structure. Nous ne présentons pas la table.

■ Calcul de la position tridimensionnelle des détecteurs à partir de la connaissance de la géométrie des brides mobiles

La partie sensible du détecteur correspond à un point calculé sur la normale issue du centre de la bride mobile à une distance de 390 mm. Il faut préciser que les coordonnées de ce point sont provisoires. Elles seront ajustées des erreurs de positionnement du détecteur par rapport à son axe mécanique.

La table 2 (vue partielle) nous présente les coordonnées sphériques de chaque point calculées depuis le centre de la structure. Si les faces des brides mobiles étaient scrupuleusement parallèles aux brides fixes, nous devrions retrouver les mêmes angles thêta et phi que ceux mesurés lors du contrôle de la structure (colinéarité des vecteurs). C'est à ce ■■■

Objet centre bride face extérieure	ρ (m)	θ° (décimal) sens horaire	$d\theta$ P/R au théorique	φ° (décimal)	$d\varphi$ P/R au théorique
Bride 1	0.48302	359.940	- 0.06	44.992	-0.008
Bride 2	0.48299	225.003	+ 0.003	89.996	-0.004
Bride 3	0.48325	134.954	- 0.046	89.977	-0.023
bride 4	0.48295	179.987	- 0.013	44.984	-0.016
bride 5	0.48326	90.000	0	90.000	0
bride ...					

Tableau 1 : résultat des mesures de la position tridimensionnelle des brides composant la structure (table partielle)

■ ■ ■ niveau que nous allons découvrir les défauts d'orientation des brides. L'analyse de l'ensemble des données permet de conclure à une faible rotation des brides mobiles. Cependant, nous remarquons dans la table 2 des écarts plus importants sur les points calculés en position avancée. Après examen, le problème observé a été occasionné par une contrainte mécanique sur la vis sans fin à l'approche du point de contact sur la structure. Cette anomalie sera à corriger.

Récupération des données dans un logiciel de dessin

Les données issues du logiciel G-Pad® ont été exportées vers le logiciel de dessin Autocad®. La figure 8 nous montre un dessin en trois dimensions représentant les objets mesurés.

Conclusion

L'intégration de nouvelles technologies dans nos laboratoires est nécessaire et permet de faire évoluer de façon significative la mesure et par-là même l'expérimentation. L'utilisation de cette chaîne de mesure a permis un gain de temps notoire par rapport à des méthodes de topométrie conventionnelles : angles et distances. L'avantage du procédé est l'utilisation d'un seul instrument, et par conséquent un seul observateur peut procéder aux opérations de mesures. Il faut noter que ce système est limité aux petits objets (<5 m) avec assez peu de points à relever.

Au travers de cet exemple nous avons voulu montrer que les moyens mis en œuvre par des méthodes non habituelles en métrologie des accélérateurs, sont tout à fait adaptés à notre domaine d'intérêt. Nous voyons qu'il est primordial d'associer le géomètre à la réflexion ou à l'étude bien en amont de la mesure dans un souci d'atteindre, *in fine*, la qualité. Il doit donc fournir la solution la mieux adaptée parmi l'ensemble des outils existants dans le laboratoire ou sur le marché. Son rôle de mesureur doit se poursuivre aussi lors de la phase d'analyse et d'exploitation des données en conseillant le physicien ou le chef de projet. ●

Contact

Rémy BEUNARD, beunard@ganil.fr
GANIL – CEA/CNRS – www.ganil.fr

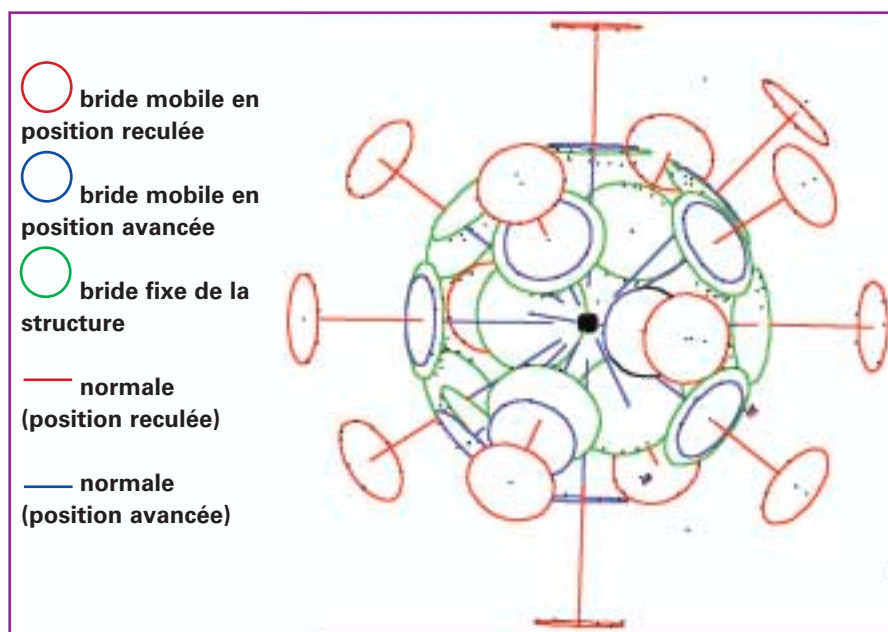


Figure 8 : dessin 3D de la structure Exogam représentant les mesures exportées vers le logiciel Autocad® via l'interface IGES

Objet position théorique du détecteur	ρ (m)	θ° (décimal) sens horaire	$d\theta$ P/R au théorique	φ° (décimal)	$d\varphi$ P/R au théorique
Norm 1 avant	0.1044	0.087	+ 0.087	45.124	+0.124
Norm 1 arrière	0.4416	359.927	-0.073	45.067	+0.067
Norm 2 av	0.1044	224.919	-0.081	89.838	-0.162
Norm 2 arr	0.4523	224.995	-0.005	89.884	-0.116
Norm 3 av	0.1049	135.242	+0.242	90.303	+0.303
Norm 3 arr	0.4539	135.023	+0.023	90.028	+0.028
Norm 4 av	0.1048	180.069	+0.069	44.881	-0.119
Norm 4 arr	0.4528	179.972	-0.028	44.945a	-0.055
Norm 5 av	0.1043	180.153	+0.153	134.659	-0.341
Norm...					

Tableau 2 : résultat du calcul tridimensionnel d'un point sur la normale à une distance de 390 mm du centre de la bride mobile (table partielle)

ABSTRACT

Key words : Three-dimensional coordinate - standard deviation - geometry - metrology - sensor - reference - system of measurement 3D

The methods of three-dimensional measurements with or without contact with the object remain varied, but the choice of the measurement system must meet the requirements of precision while being adapted to the experimental context. The purpose of this paper is to present the portable system of 3D measurement - of the six axis arm associated with the computation software G-Pad® used at GANIL during the measuring of the mechanics supporting the experimental device for detection of gamma rays. This instrument allows the measurement of points in three dimensions (XYZ) by means of a sensor contact. The uncertainty of measurement on a single point of the object is evaluated within +/- 0.2 mm ($k=2$). Our choice was justified on the one hand by the complex geometry of the object, and on the other hand by the very unfavourable environment for installation of conventional measurement tools. We limited the acquisition of data to the measurement of planes and circles.