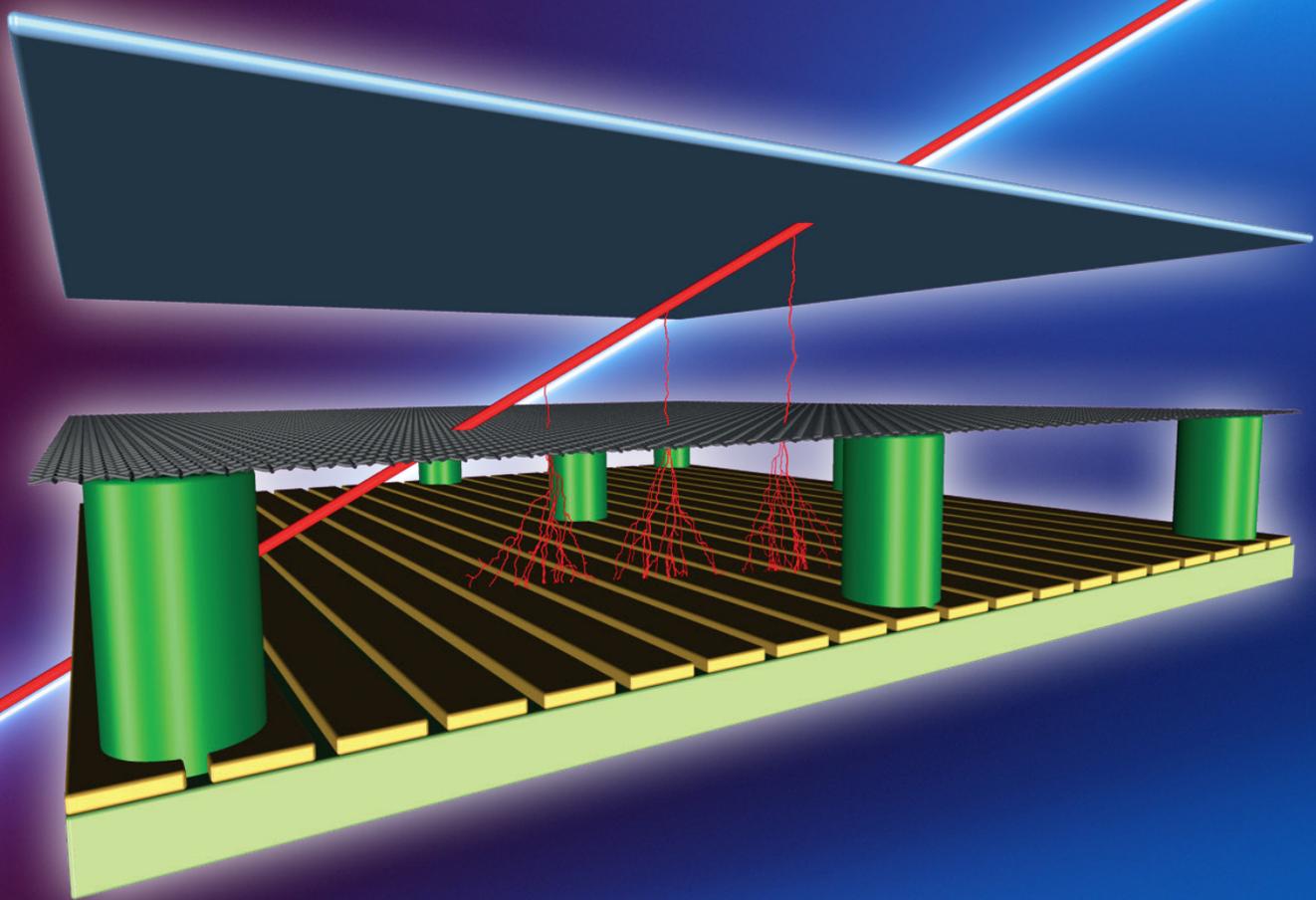


# Scintillation2

N° 97-98

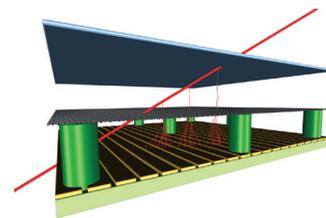
## Les aventures de Micromegas





# Les aventures de Micromegas

Index des tribulations  
du détecteur à gaz en structure à microgrille *Micromegas* :  
*MicroMesh Gaseous Structure detector*



2  
N° 97-98 - µM - 2018

## Des chambres à fils de Charpak à la microgrille, genèse et enfance de Micromegas au Cern

- ♦ **La légende de Micromegas à l'Irfu (p. 3)**  
Éditorial par V. Lapoux.
- ♦ **La genèse de Micromegas (p. 4-5)**  
Entretien avec l'un de ses concepteurs, I. Giomataris, propos recueillis par F. Jeanneau et P. Manil.
- ♦ **Le principe de fonctionnement d'un Micromegas (p. 6)**
- ♦ **La généalogie des Micromegas (p. 7-9)**  
Une analyse des lignées des détecteurs gazeux à ionisation, par Th. Guy et V. Bontems.
- ♦ **Un détecteur de pointe pour Compass,**  
ou comment Micromegas sort du laboratoire pour aller au Cern (p. 10-11)  
Par F. Kunne et D. Neyret, pour l'équipe Compass.

## Du Dapnia à l'Irfu : Micromegas et la trajectographie

- ♦ **Micromegas dévoile ses courbes avec Clas (p. 12-13)**  
Par J. Ball, M. Garçon et S. Aune, pour l'équipe Clas12.
- ♦ **Micromegas déploie ses pétales et fait la roue, NSW pour Atlas (p. 14-15)**  
Par F. Jeanneau et Ph. Schune, pour l'équipe Atlas-NSW.

## Mesures 2D - profilomètre et temps de vol

- ♦ **Micromegas prend les neutrons au vol (p. 16)**  
Par F. Gunsing, pour l'équipe n\_TOF.
- ♦ **Les détecteurs à basse pression pour S<sup>3</sup> et NFS : avec ou sans Micromegas ? (p. 17)**  
Par D. Doré, A. Drouart et J. Pancin, pour les équipes NFS et S<sup>3</sup>.

## Reconstruction de traces et imagerie 3D

- ♦ **Kabes et T2K, ou l'art de la trajectographie à toutes les échelles ! (p. 18-19)**  
Par E. Mazzucato, pour les équipes Kabes NA48 et T2K.
- ♦ **La trajectographie 3D des réactions nucléaires avec la cible active Minos (p. 20-21)**  
Par A. Delbart, pour l'équipe Minos.

## Les évolutions et les applications de Micromegas

- ♦ Les évolutions de Micromegas : **segmenté, résistif, bulk et hybride**  
Par D. Neyret et S. Procureur, pour les équipes de l'Irfu.  
- Des détecteurs Micromegas hybrides et pixellisés pour l'expérience Compass (p. 22)  
- **Décharges électriques**, « claquages » et résolution du problème en mode résistif (encadré, p.22)  
- Détection hybride, mariage heureux : **microgrille et GEM (p.23)**
- ♦ Le développement de **puces électroniques**  
Les plans de lecture **InGrid (Timepix) (p. 24-25)**  
La nouvelle architecture **Piggyback (encadré, p.24)**  
Par D. Attié, pour les équipes de projets de l'Irfu.

## Les voyages de Micromegas

- ♦ **Sortez l'appareil muo ! (p. 26-27)**  
Par S. Procureur, pour l'équipe ScanPyramids de l'Irfu.  
*La tomographie par muons naturels, application à l'archéologie avec ScanPyramids*

## La traque des particules furtives

- ♦ À la chasse aux **événements rares** : Micromegas passe à « **l'axion** » (p. 28-29)  
Par E. Ferrer-Ribas pour les équipes Cast et Iaxo de l'Irfu.
- ♦ **Au-delà de Micromegas**, une sphère pour rechercher la matière cachée de l'Univers (encadré, p. 29)  
Par I. Giomataris.

## La bibliothèque de Micromegas

- ♦ **Le glossaire de Micromegas**, dictionnaire, liens et références (p. 30)
- ♦ **Bibliographie**, livres et articles, rapports et brevets (p. 31)
- ♦ **La mosaïque (p. 32)**

N.B. Les noms et acronymes employés dans le numéro sont définis dans le **glossaire (p.30)** et repérés dans les articles par l'exposant **g**.

Les références fournies entre crochets figurent dans la **bibliographie** ou en fin d'article, elles sont abrégées suivant les conventions indiquées p.31.

Direction de la publication, Irfu Dir, A-I Etievre. Conseiller scientifique : G. Cohen-Tannoudji. Rédaction (porte-plume) : V. Lapoux

### Comité Scintillations

Comité scientifique Irfu de rédaction et d'édition du numéro : Fabien Jeanneau, Valérie Lapoux (V. L.), Pierre Manil.

Comité de lecture : Bertrand Hervieu, Ange Lotodé, avec la collaboration de la cellule de communication de la direction de l'Irfu : Sophie Kerhoas-Cavata (Dir Com), Philippe Briet (Sédi, Lis), Angèle Séné (Dir Com).

### Crédits photographiques

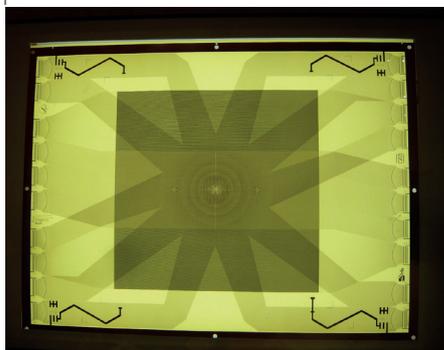
Illustrations en pleine page, p.1 et p.6, bandeau p.2 (à droite) : dessin en perspective de Micromegas, vue CAO par Th. Hardy, Irfu. Les illustrations présentant Georges Charpak (bandeaux p.3 : portrait sur le détecteur; p.31 : image à droite) ont été réalisées par l'artiste Christian Guémy, dit C215. Photos : CEA/com.

Pour les autres illustrations, p.2 à 32, les sources et crédits sont mentionnés dans les légendes des figures ou en notes, en fin d'article.

Dépôt légal : 2018 - ISSN : 1268 7855 - Impression : idées fraîches.

Pour consulter les numéros de Scintillations et s'abonner : <http://irfu.cea.fr/ScintillationS>

# La légende de Micromegas à l'Irfu



À l'Irfu, Micromegas est devenu un objet mythique, la clé du fonctionnement de la plupart des expériences. Au gré des besoins de la physique, il se métamorphose, s'étend, se courbe, s'insère à volonté dans les dispositifs expérimentaux, précis, performant et résistant. Ce numéro spécial retrace toutes les aventures de Micromegas depuis sa genèse, héros protéiforme au royaume de la physique subatomique.

Nous commencerons par présenter cette famille de détecteurs, l'analyse de leur lignée technique permettant de la replacer dans le contexte de l'évolution des détecteurs gazeux à ionisation. Nous retracerons ensuite les premières années d'expériences de Micromegas : premier voyage au Cern pour étudier le spin du nucléon (*Compass*), suivi d'une période d'implantation aux États-Unis pour comprendre la structure du nucléon avec *Clas12* à *Cebaf*. En quelques années, le plan devient cylindre et les reconstructions 3D offrent un nouveau champ de mesures aux physiciens.

Le numéro présente les multiples évolutions opérées pour repousser les contraintes techniques et augmenter les performances des Micromegas pour la résistance aux flux de particules et les résolutions des mesures en position et en temps.

À ce jour, les Micromegas sont capables de s'adapter au cahier des charges de la plupart des expériences des laboratoires de l'Irfu. Les transformations continuent : Micromegas intervient dans la quête d'événements rares associés à de nouvelles particules, hypothèses théoriques qu'il s'agit de confronter à l'observation.

Pour ses concepteurs, le potentiel de découverte de Micromegas était prometteur. En témoigne cet extrait d'un article\* de Ioannis Giomataris, en hommage à Georges Charpak :

« [...] Dans ces recherches [au Cern en 1992], nous utilisons un détecteur gazeux à plaques parallèles, et en l'optimisant, nous avons démontré expérimentalement l'avantage d'un étage d'amplification de petite taille. Cela déclencha l'idée de construire un dispositif avec un étage d'amplification encore plus petit et de là naquit le concept d'un nouveau détecteur : **le Micro-Mesh gaseous structure, le MicroMegas**, que notre groupe à Saclay a développé depuis 1995. Georges avait l'habitude de dire que ce détecteur et d'autres nouveaux concepts appartenant à la famille des détecteurs à gaz à micro-grille allaient révolutionner la physique nucléaire et des particules, exactement comme son propre détecteur l'avait fait ».

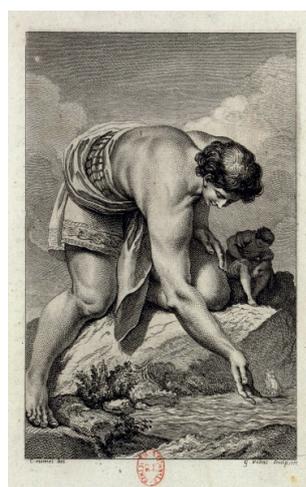
Micromegas est donc né avec cette vision d'un détecteur évolutif, étonnamment performant, capable de répondre aux grands défis de physique. Ce mythe fondateur a accompagné le développement des thématiques de l'Irfu. Qu'il s'agisse d'explorer la structure du nucléon et des noyaux, de rechercher de nouvelles particules ou de faire de l'imagerie en trois dimensions, les évolutions et applications de Micromegas ont suivi les expériences qui sont illustrées dans ce numéro. **Que ce détecteur emblématique soit né dans un institut unissant les métiers de la physique de la matière et de la détection mérite d'être souligné** : physiciens, concepteurs et experts techniques ont travaillé ensemble pour repousser les limites des expériences ce qui a permis les avancées de nos connaissances fondamentales. Ce changement d'horizon qui intervient alors dans notre compréhension du monde des particules fait surgir de nouvelles questions pour lesquelles des performances accrues sont requises.

*MicroMegas* a ainsi dépassé son nom composite historique, fruit d'un acronyme technique. Symboliquement, comme le personnage de légende du conte philosophique de Voltaire, il explore l'univers. Micromégas, habitant de Sirius, part à la découverte des créatures du système solaire, en compagnie d'un nain de Saturne. Ils rencontrent les humains microscopiques avec lesquels ils conversent sur la question des mesures. *Micro* et *mega*, le Sirien est *petit* dans l'Univers, *grand* par rapport à son compagnon de voyage, tous deux immenses face aux microbes qu'ils ne voient pas sur Terre.

**Voltaire (1694-1778).**

**Micromégas (écrit en 1738-1739, publié en 1751).**

**Chapitre septième, 7.4 Conversation avec les hommes.**



Micromégas et le nain Saturnien rencontrent des Terriens. Illustration\*\* de l'édition de 1778

« Le voyageur s'adressant aux sages : « dites-moi, je vous en prie, à quoi vous vous occupez ». « Nous disséquons des mouches », dit le philosophe, « nous mesurons des lignes, nous assemblons des nombres; nous sommes d'accord sur deux ou trois points que nous entendons et nous disputons sur deux ou trois mille que nous n'entendons pas ».

Il prit aussitôt fantaisie au Sirien et au Saturnien d'interroger ces atomes pensants, pour savoir les choses dont ils convenaient. « Combien comptez-vous, dit-il de l'étoile de la Canicule à la grande étoile des Gémeaux ? ».

Ils répondirent tous à la fois :

« trente-deux degrés et demi. Combien comptez-vous d'ici à la Lune ? Soixante demi-diamètres de la terre en nombre rond. Combien pèse votre air ? » Il croyait les attraper, mais tous lui dirent que l'air pèse environ neuf cents fois moins qu'un pareil volume de l'eau la plus légère, et dix-neuf cents fois moins que l'or de ducat. Le petit nain de Saturne, étonné de leurs réponses, fut tenté de prendre pour des sorciers ces mêmes gens auxquels il avait refusé une âme un quart d'heure auparavant. »

Voltaire, *Éléments de la philosophie de Newton (1738)* :

« L'homme n'est pas fait pour connaître la nature intime des choses ; il peut seulement calculer, mesurer, peser et expérimenter ».

Les deux voyageurs se trouvent finalement mesurés par ces particules mêmes qu'ils jugeaient inintéressantes de prime abord, seulement mues par une agitation aléatoire. Ils ne peuvent entrevoir ces créatures minuscules qu'à travers une loupe habilement conçue... Grand-petit ? Ces notions relatives relèvent de questions fondamentales d'échelle, tranchées par les mesures effectuées avec précision et exactitude par certains de ces humains insignifiants. Micromégas décèle une intelligence réaliste parmi ceux qui préfèrent mesurer le monde plutôt que de disséquer des questions métaphysiques. Il rencontre des humains qui se révèlent ingénieux, réfléchis, observateurs et inventifs, construisant des objets pour scruter la Nature. Leur savoir-faire s'applique à peser, estimer, mesurer, compter ce qui les entoure.

Ainsi le physicien, désormais ingénieur-technicien-chercheur, est celui qui construit des détecteurs pour comprendre le monde, par les estimations des échelles de masse et de taille, en mesurant toutes les structures observables. Avec leurs Micromegas, ouvrages d'art complexes à la croisée de la microélectronique, de la science des détecteurs et de macrostructures de mécanique, les explorateurs de l'Irfu partent à la rencontre de microscopiques particules pour décrypter des phénomènes régis par les lois fondamentales à l'échelle de l'Univers.

Valérie Lapoux

\* Ioannis Giomataris, *Le courrier du Cern*, novembre 2010, <http://cerncourier.com/cws/article/cern/44361>

\*\* *Micromégas, Romans et Contes de M. de Voltaire*, planche p. 32, par Ch. Monnet, dessinateur ; G. Vidal, graveur ; Bouillon : Ed. de la Société typographique, 1778. Crédits photos : BnF, Réserve des livres rares, Rés. P Y2 1809 (2).



# La genèse de Micromegas

Un entretien avec l'un de ses concepteurs,  
Ioannis Giomataris,  
par Fabien Jeanneau et Pierre Manil



**P**our nous éclairer sur les origines de Micromegas et sur la transformation prodigieuse d'une idée en technologie... nous avons consulté l'un de ses inventeurs : Ioannis Giomataris\*. Il nous reçoit dans son laboratoire où il poursuit ses rêves et expérimentations sur « ses » détecteurs.

4  
N° 97-98 - µM - 2018

**Ioannis, peux-tu nous raconter comment tu as débuté l'odyssée des Micromegas ?**

L'histoire commence en 1994, quand j'arrive à Saclay. En collaboration avec le laboratoire Fermilab de Chicago et le Cern, nous cherchions à développer un détecteur optique joliment baptisé « le trigger pour la beauté », chargé de sélectionner les mésons-B<sup>1</sup> résultant d'interactions proton-proton. Les technologies de détecteurs gazeux existantes posaient plusieurs problèmes (décharges, claquages, limitations dues au bruit). Pour s'en affranchir, différentes idées avaient été proposées. Avec Leon Max Lederman et Georges Charpak, nous avons déjà publié en 1991 une première idée<sup>2</sup> ("A trigger for beauty"!) - elle sera à l'origine de Micromegas. Georges était installé à Paris depuis deux ans. J'étais son plus proche collaborateur. Nos relations étaient très amicales. Nous parlions de physique, non seulement au labo, mais aussi lors des vacances d'été, car Georges avait l'habitude d'inviter ses collègues lorsqu'il partait en famille à Cargèse, en Corse<sup>3</sup>.

**Quel était le principe de fonctionnement de ce détecteur ?**

Le *Hadron Blind Detector* (HBD) devait présenter une architecture en faces parallèles, classiquement utilisée depuis une cinquantaine d'années. Il devait comporter deux étages séparés par une grille : l'un pour l'ionisation et l'autre pour l'amplification. En ce sens, le Micromegas n'a pas représenté une architecture nouvelle. Mais à l'époque, ces détecteurs étaient en quelque sorte des « méga structures ». À cette époque au Cern, il était admis que la distance optimale entre la grille et le plan d'anode, qu'on appelle le *gap* (espace d'amplification) devait être de 4 à 5 mm pour garantir une solution réalisable. Il était en effet considéré comme techniquement impossible, à cause de la force électrostatique, de maintenir une grille très proche du plan d'anode tout en conservant un très bon parallélisme. Ce problème a par la suite été résolu. De nos jours, pour fabriquer un Micromegas, nous sommes capables de disposer une grille à 50 ou 100 µm du plan d'anode... !

En développant le HBD, nous avons essayé de diminuer l'espace d'amplification pour réduire proportionnellement le bruit de fond dû à l'ionisation parasite du gaz. En descendant à 2 mm, nous avons observé une nette amélioration. Mieux, nous avons observé par la même occasion une meilleure stabilité du détecteur... sans comprendre pourquoi. En descendant à 1 mm, la grille, courbée par la force électrostatique, entraînait trop d'inhomogénéités de gain. Ce projet n'a finalement pas été retenu pour le LHC. Nous avons mené des développements<sup>4</sup> dans d'autres collaborations au Cern : Compass<sup>5</sup>, n\_TOF<sup>6</sup>,...

**L'idée était là.**

Oui ! Cependant, nous n'avions pas encore été capables d'expliquer pourquoi nous obtenions de si bons résultats en réduisant fortement l'espace d'amplification. Nous y réfléchissions parfois avec Georges, mais comme entretemps il avait reçu le prix Nobel (en 1992), ces occasions étaient de plus en plus rares.

**Qu'est-ce qui a permis au Micromegas de voir vraiment le jour ?**

Pendant l'hiver 1994, j'ai participé à une réunion sur le LHC à Jussieu, impliquant la majeure partie des laboratoires de physique des particules. Nous nous sommes retrouvés autour d'un café avec Georges (Charpak) et Philippe (Rebourgeard), à discuter de détecteurs pouvant supporter les très hauts flux de particules, tout en présentant de bonnes performances temporelles. L'idée d'utiliser des faces parallèles a ressurgi. Bien qu'instables dans les réponses aux inhomogénéités de gain, elles présentaient de très bonnes performances dans ces conditions extrêmes de flux élevés. Ces instabilités - nous en avions l'intuition mais pas encore la preuve - étaient dues au grand espace d'amplification. Nous avons rapidement imaginé de construire un premier prototype équipé de petits gaps (Fig.1). Je savais où me procurer des microgrilles de 5 microns d'épaisseur chez un fournisseur américain, mais il fallait trouver une solution pour bien positionner la grille avec un espacement correspondant à des entretoises inférieures au millimètre ! J'avais ma petite idée... Six ans auparavant, je travaillais comme visiteur à l'IN2P3 de Strasbourg sur le *fast RICH*<sup>5</sup>, un compteur Tcherenkov doté de chambres à fils. Pour des raisons similaires, nous avions décidé de rapprocher les fils du plan d'anode... grâce à des entretoises. En bon pêcheur, j'ai proposé d'utiliser du fil de pêche, réputé très précis car obtenu par étirage. Nous avons disposé ces fils tous les centimètres sur le plan d'anode en guise d'entretoises, et malgré quelques zones mortes, cela a très bien fonctionné. Par la suite, ce fil de pêche sera remplacé par de petits piliers déposés industriellement par photolithographie pour maintenir la grille.

J'avais maintenant tous les ingrédients nécessaires pour réaliser le premier prototype Micromegas, y compris une petite équipe avec le technicien Jean-Pierre Robert, qui nous a malheureusement quittés en 2017. Restait à trouver comment les assembler. Un des problèmes était de tenir la grille en la tendant sur un cadre. Après plusieurs essais infructueux et quelques grilles déchirées, nous sommes parvenus à réussir le collage par transfert via trois cadres successifs. Une fois la grille convenablement tendue, le détecteur a donné des signaux avec une bonne homogénéité de réponse et une bonne résolution en énergie.

\* En grec : *Ιωάννης Γιοματαρίης*. Le prénom grec a été orthographié dans les premiers articles *Yannis*, d'où les références où l'on rencontre *Y. Giomataris* (cf. bandeau p. 5). Ensuite il fut écrit *Ioannis*, qui est désormais retenu dans les articles : *I. Giomataris*. Pour les références, l'initiale sera écrite conformément à celle qui est prise pour chaque article. *Ιωαννης* sera *I.G.* dans le numéro.

<sup>1</sup> Mésons B : un méson est composé d'un quark et d'un antiquark. Un méson B a un antiquark *bottom* « B » et un quark qui peut être un quark *bottom* (B), up (u), down (d), étrange (s) ou charmé (c).

<sup>2</sup> *A trigger for beauty*, G. Charpak, Y. Giomataris, L. M. Lederman, CERN-PPE-91-22-REV; FERMILAB-PUB-91-65 ; NIM **A 306** (1991) 439-445. *A Hadron-Blind Detector*, G. Charpak, Y. Giomataris, et al., NIM **A 310** (1991) 589-595.

<sup>3</sup> Sa maison était à deux pas de l'Institut d'Études Scientifiques de Cargèse, établi par le physicien Maurice Lévy dans les années 60. Cela devint ensuite un centre important pour les écoles d'été en physique théorique, réunissant des physiciens émérites et de nombreux théoriciens du modèle standard de la physique des particules. Georges avait l'habitude de participer à des cours d'été et il y avait une interaction constante entre sa maison et le centre.

## MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments

Y. Giomataris<sup>a,\*</sup>, Ph. Rebourgeard<sup>a</sup>, J.P. Robert<sup>a</sup>, G. Charpak<sup>b</sup>

<sup>a</sup>CEA/DSM/DAPNIA/SED-C.E.-Saclay, 91191 Gif/Yvette, France

<sup>b</sup>Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielle de la ville de Paris, ESPECI, Paris, ESPCI, Paris, France and CERN/AT, Geneva, Switzerland



Au bout de quelques semaines, nous avons suffisamment de résultats pour écrire un article<sup>6</sup> (Fig. 2). Il sera publié en 1996 après avoir protégé notre invention par un brevet [p. 31, B97] qui présentait le nouveau détecteur comme « susceptible d'avoir une résolution spatiale nettement plus élevée (...) et de détecter des flux de particules nettement plus élevés » que les MWPC<sup>g</sup>.

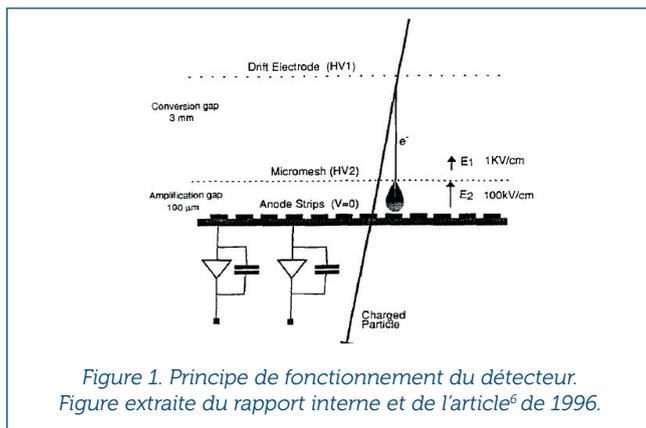


Figure 1. Principe de fonctionnement du détecteur. Figure extraite du rapport interne et de l'article<sup>6</sup> de 1996.

### Comment avez-vous validé le détecteur en conditions expérimentales ?

Les premiers tests du détecteur soumis à des flux élevés ( $10^9$  protons par  $\text{mm}^2$  et par s) ont été effectués en 1997 à Saclay sur l'accélérateur van de Graaff (Tandem) du Dapnia<sup>g</sup>. Les premières résolutions spatiales obtenues étaient excellentes, de l'ordre de quelques dizaines de micromètres. Le gain était stable avec un mélange « magique » de gaz, constitué à 85% d'argon et 25% de diméthyléther (DME). Comme prévu, notre détecteur présentait de meilleures performances que les chambres à fils, pour des flux bien plus élevés (d'au moins un facteur 100). Nous sommes alors retournés au Cern afin de mesurer les paramètres fins du détecteur : résolutions spatiale, temporelle... en faisant varier la composition du mélange de gaz : argon avec quelques pourcents d'isobutane ou de DME. Les résultats de ces tests au Tandem et au Cern (résolution de  $50 \pm 20 \mu\text{m}$ ) firent l'objet d'une deuxième publication [cf p. 31]. Stabilité par rapport aux flux élevés de particules, excellente résolution et rapidité, le détecteur était alors considéré comme prometteur pour le LHC. Avec le soutien de Michel Spiro, nous avons monté à l'Irfu un groupe conséquent pour suivre cette campagne de tests et nous nous sommes associés au groupe du trigger optique - début d'une collaboration fructueuse. Nos premiers résultats se sont avérés très bons. Nous avons

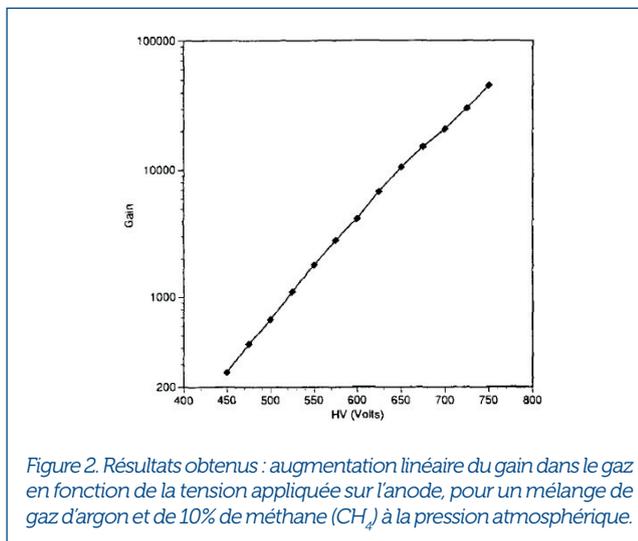


Figure 2. Résultats obtenus : augmentation linéaire du gain dans le gaz en fonction de la tension appliquée sur l'anode, pour un mélange de gaz d'argon et de 10% de méthane ( $\text{CH}_4$ ) à la pression atmosphérique.

mesuré une résolution spatiale de l'ordre de la dizaine de microns (en sigma, meilleure d'un facteur 10 que celle des chambres à fils, autour de  $100 \mu\text{m}$ ) et une résolution temporelle de quelques nanosecondes. Cependant, nous avons aussi mis en évidence un problème d'étincelles à très haut flux... dont la résolution nous prendra des années.

### Comment ces bons résultats ont-ils été reçus par la communauté scientifique ?

Quelques années plus tard, j'ai été invité au Cern avec Fabio Sauli (inventeur des GEM<sup>g</sup>, Gas Electron Multiplier, environ un an après Micromegas) pour discuter de l'utilisation des détecteurs gazeux pour équiper Compass. C'est suite à cette discussion que le Micromegas a été utilisé pour la première fois dans une expérience de physique, avec des détecteurs de plusieurs dizaines de centimètres. L'idée rencontrait sa première application. En 1998, la conclusion principale de nos travaux était que l'excellente précision spatiale du détecteur lui permettrait de répondre aux besoins de la plupart des expériences de physique des particules pour la reconstruction des trajectoires. L'aventure Micromegas s'est poursuivie avec de nombreuses évolutions techniques accompagnant les développements de détecteurs pour les projets<sup>4</sup> qui ont vu le jour à travers le monde : n\_TOF, Clas12, T2K, MIMAC, Cast, NSW... Amélioré, miniaturisé, courbé, industrialisé, il reste aujourd'hui un détecteur de référence pour la physique.

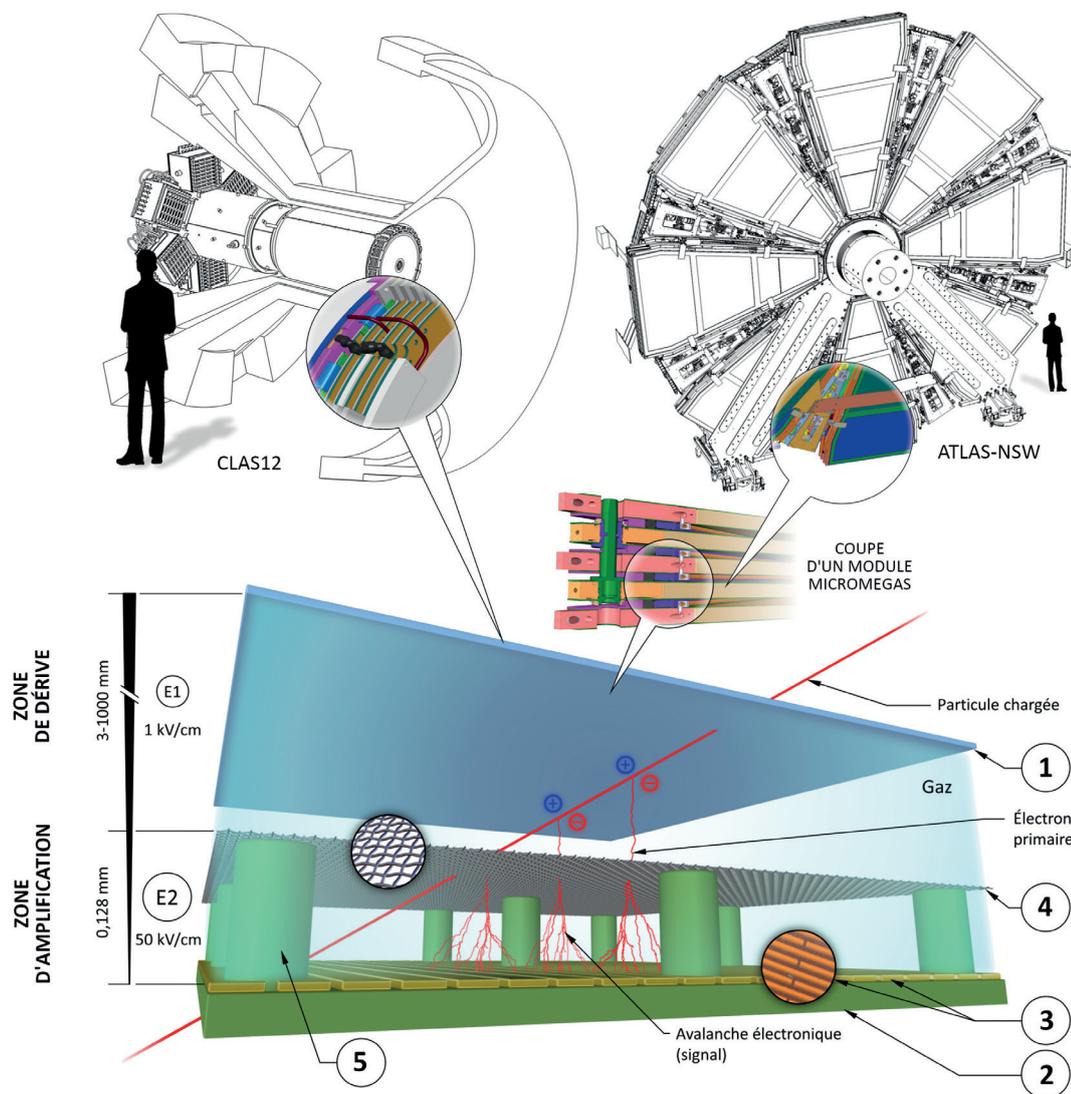
<sup>4</sup>Tous sont évoqués dans ce numéro et les noms sont donnés dans le glossaire.

<sup>5</sup>RICH : détecteur Ring Imaging Cherenkov, détecteur de particules à anneaux, pour l'imagerie, fonctionnant sur le principe de l'effet Tcherenkov.

<sup>6</sup>I. Giomataris, Ph. Rebourgeard, J.P. Robert & G. Charpak, Micromesh Gaseous Structure, NIM A 376, 29-35 (1996). Voir en page 31 la bibliographie, avec la référence à la première version, le rapport interne Dapnia de 1995.

# Le principe de fonctionnement d'un Micromegas

N° 97-98 -  $\mu$ M - 2018 **6**



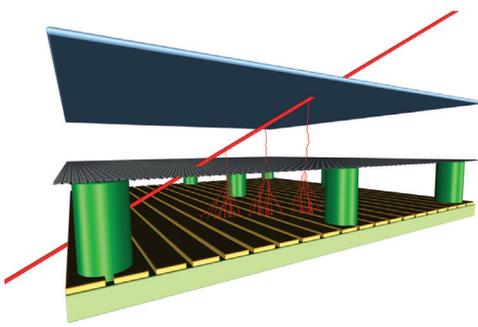
Un détecteur Micromegas est constitué de trois éléments plans parallèles :

- la cathode (1),
- le plan d'anode (2) composé de micropistes (3),
- la microgrille ou micromesh (4) posée sur des plots (5), qui divise le Micromegas en deux zones,

La spécificité d'un détecteur Micromegas est la grande asymétrie de ces deux zones : champ électrique E1 sur quelques millimètres pour la **zone de dérive** ; champ électrique E2 fort sur 128  $\mu$ m pour la **zone d'amplification**. Ce sont les paramètres clés du fonctionnement du détecteur.

La **particule chargée** incidente (**trace rouge**) traverse d'abord la **zone de dérive** où elle ionise le gaz et libère des **électrons** dits **primaires**. Ceux-ci dérivent sous l'influence du champ électrique E1 jusqu'à la microgrille, où ils subissent, au passage des trous, un effet d'entonnoir électronique directement lié au rapport des champs E1 et E2. Ces électrons pénètrent alors dans la **zone d'amplification** où le **champ E2 est très supérieur au champ de dérive E1**, à tel point qu'ils sont suffisamment accélérés pour ioniser eux-mêmes le gaz, entraînant la création d'une succession de gerbes d'électrons secondaires : cette **avalanche électronique** amplifie considérablement le signal électrique dû au dépôt initial d'énergie de la particule. Collectés par les micropistes et lus par une électronique adaptée, ces signaux permettent de déterminer la localisation de la trace dans le détecteur. La résolution en position peut être améliorée en augmentant la segmentation de l'anode (pixellisation).

Les deux schémas en haut de la figure illustrent la diversité des applications de la technologie : à gauche, l'implantation de tuiles Micromegas courbées dans les détecteurs cylindriques du spectromètre **Clas12**, à droite, les 1200 m<sup>2</sup> du détecteur **New Small Wheels (NSW)** développé pour faire évoluer le détecteur **Atlas** au Cern.



# La généalogie des Micromegas

Par Thomas Guy et Vincent Bontems  
(Irfu, Larsim)

**P**our comprendre l'originalité de la lignée des Micromegas au sein de l'arborescence des détecteurs gazeux à ionisation, nous analysons les étapes-clés de l'histoire de ces détecteurs à l'aide des outils de la mécanologie génétique.

La mécanologie génétique est l'étude de l'invention des objets techniques et de l'évolution des lignées techniques<sup>1</sup>. Ses principes sont élaborés par le philosophe Gilbert Simondon dans son ouvrage *Du mode d'existence des objets techniques*, où il précise que « le début d'une lignée d'objets techniques est marquée par cet acte synthétique d'invention constitutif d'une essence technique »<sup>2</sup>. À partir de cette invention, une lignée technique se développe à travers la succession dans le temps d'objets fondés sur le même principe de fonctionnement et dont l'essence technique reste stable à travers la lignée évolutive. À la classification usuelle des objets techniques fondée sur leur fonction, Simondon substitue une classification fondée sur leur *fonctionnement*.

Nous allons donc retracer l'évolution des principes de fonctionnement des détecteurs gazeux à ionisation pour déterminer, au sein de cette arborescence, quelles sont les lignées menant à l'invention des Micromegas.

En général, selon Simondon, des phases de progrès mineurs et majeurs se succèdent au sein d'une lignée technique : d'abord, intervient une série d'améliorations graduelles au cours desquelles les composants s'ajustent et s'adaptent. Quand ces progrès mineurs ont complètement optimisé son fonctionnement, l'objet est « saturé » : pour progresser encore, il faut une rupture, une reconfiguration globale de l'objet. Cette reconfiguration ne modifie pas l'essence technique de la lignée, l'opération interne étant conservée, mais donne naissance à une nouvelle génération d'individus techniques plus « concrets »<sup>2</sup>.

Afin d'identifier l'essence technique correspondant à la lignée des Micromegas, nous avons combiné les principes de la mécanologie génétique de Simondon avec des outils diagrammatiques empruntés à une méthode de gestion des connaissances (MASK)<sup>3</sup>, développée au CEA par Jean-Louis Ermine. Le diagramme SCFC (source, cible, flux, champ) permet ainsi de dégager le principe de fonctionnement de tous les Micromegas (Fig. 1) et de replacer la lignée au sein de l'arborescence générale où elle est apparue. Bien que d'une grande généralité, ce diagramme permet de rattacher les Micromegas à la famille des détecteurs gazeux à ionisation dont les opérations internes sont une ionisation et une amplification. La lignée des Micromegas se rattache plus spécifiquement à la branche des détecteurs recueillant l'information sous la forme d'un signal électrique. Notre méthodologie nous conduit donc à écarter, entre autres choses, les chambres à brouillard et les chambres à bulles, qui, malgré leur rôle important et leur fonction similaire en physique des particules, ne délivraient pas l'information sous la forme d'un signal électrique. L'historien des sciences Peter Galison a aussi insisté sur les différences entre ces deux traditions instrumentales, celle des « instruments producteurs d'images »<sup>4</sup> tels que les chambres à bulles, et celle des « dispositifs de comptage logique », où il rangea les chambres à fils mais aussi les chambres à étincelles (ce que nous ne faisons pas car les opérations internes sont différentes).

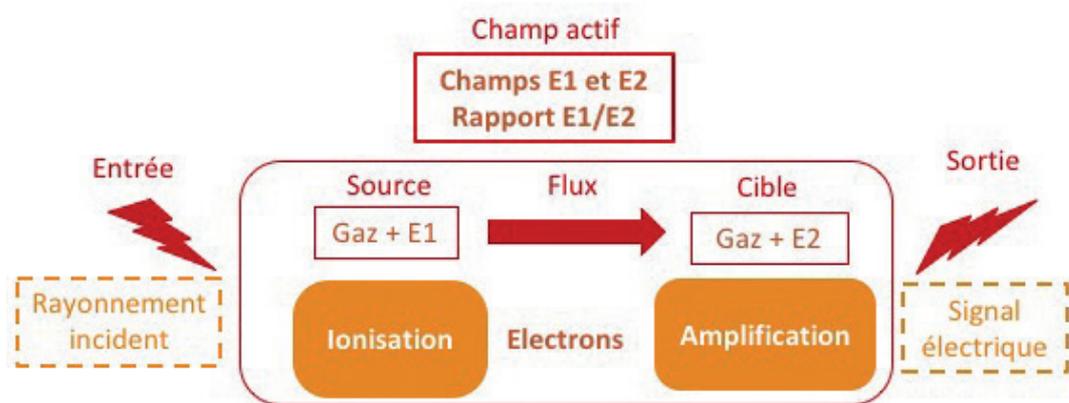


Figure 1 : Diagramme SCFC des Micromegas. Le système Source est relié au système Cible par un Flux (ici il s'agit du flux d'électrons primaires). À l'ensemble Source - Cible - Flux, on ajoute un Champ actif qui représente l'ensemble des paramètres influençant le processus. La structure géométrique étant fixée avec les plans et les espaces indiqués sur le schéma de fonctionnement (p. 6), il faut préciser que dans le « champ actif » composé par les champs électriques E1 et E2 appliqués entre les plans du détecteur, le champ E2 est très grand devant E1, ce qui est une caractéristique fondamentale de fonctionnement des Micromegas.

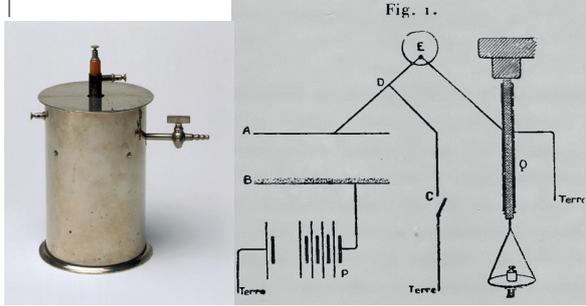
<sup>1</sup> Voir « Mécanologie et méthodologie de l'instrumentation » par V. Bontems et V. Minier dans le n° 94 de Scintillations.

<sup>2</sup> *Du mode d'existence des objets techniques*, G. Simondon, Paris, Aubier, 1958 (réédition augmentée, Flammarion, 2012).

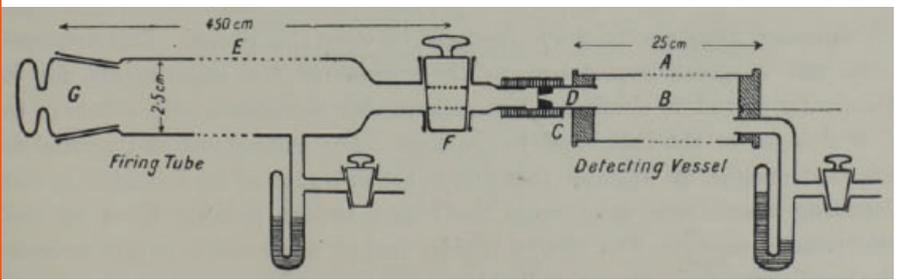
<sup>3</sup> MKSM : méthode pour la gestion des connaissances, J.-L. Ermine, in *Ingénierie des systèmes d'information*, Paris, Hermès, 1996.

MASK : Méthode d'Analyse et de Structuration des (K)Connaissances, J.-L. Ermine, in *La gestion des connaissances*, Paris, Hermès Lavoisier, 2003.

<sup>4</sup> *Bubbles, sparks, and the postwar laboratory*, P. Galison, in *Pions to quarks: particle physics in the 1950s*, Cambridge University Press, 1989.



Chambre à ionisation.  
P. Curie (1900)



Compteur proportionnel.  
E. Rutherford et H. Geiger (1908)

Une fois définie l'essence de notre lignée, nous avons tâché de retracer sa généalogie en identifiant les différentes inventions qui ont engendré des lignées techniques réalisant au moins partiellement le « schéma technique » des détecteurs gazeux à ionisation produisant un signal électrique. Le résultat de cette enquête a été formalisé sous la forme du « diagramme de lignée » (MASK)<sup>3</sup> de la figure 2.

Les premières lignées de détecteurs gazeux à ionisation sont nées au début du siècle dernier avec, d'une part, les chambres à ionisation<sup>5</sup> utilisées par les Curie (1901) et, d'autre part, les premiers tubes de Geiger-Muller mis au point par Rutherford et Geiger<sup>6</sup> (1908).

C'est l'hybridation (1928) de ces deux schèmes techniques, conduisant au compteur dit de Geiger-Klemperer, qui a donné naissance à la lignée des compteurs proportionnels<sup>7</sup> dont sont issus les Micromegas. Ces compteurs proportionnels opèrent dans la région de proportionnalité (nombre de charges collectées,  $N_{coll}$  proportionnel au nombre de charges créées  $N_{cr}$ ), qui est une zone intermédiaire entre les régions d'ionisation ( $N_{coll} = N_{cr}$ ) et de saturation ( $N_{coll}$  indépendant de  $N_{cr}$ ). Cela permet de différencier les signaux suivant le type de radiation (alpha, bêta) et d'avoir une zone d'avalanche « limitée » dans la région de l'anode. Notons que la distinction structurelle entre les détecteurs cylindriques et plans n'est pas pertinente ici, la lignée étant définie par ses opérations internes et non par sa structure géométrique.

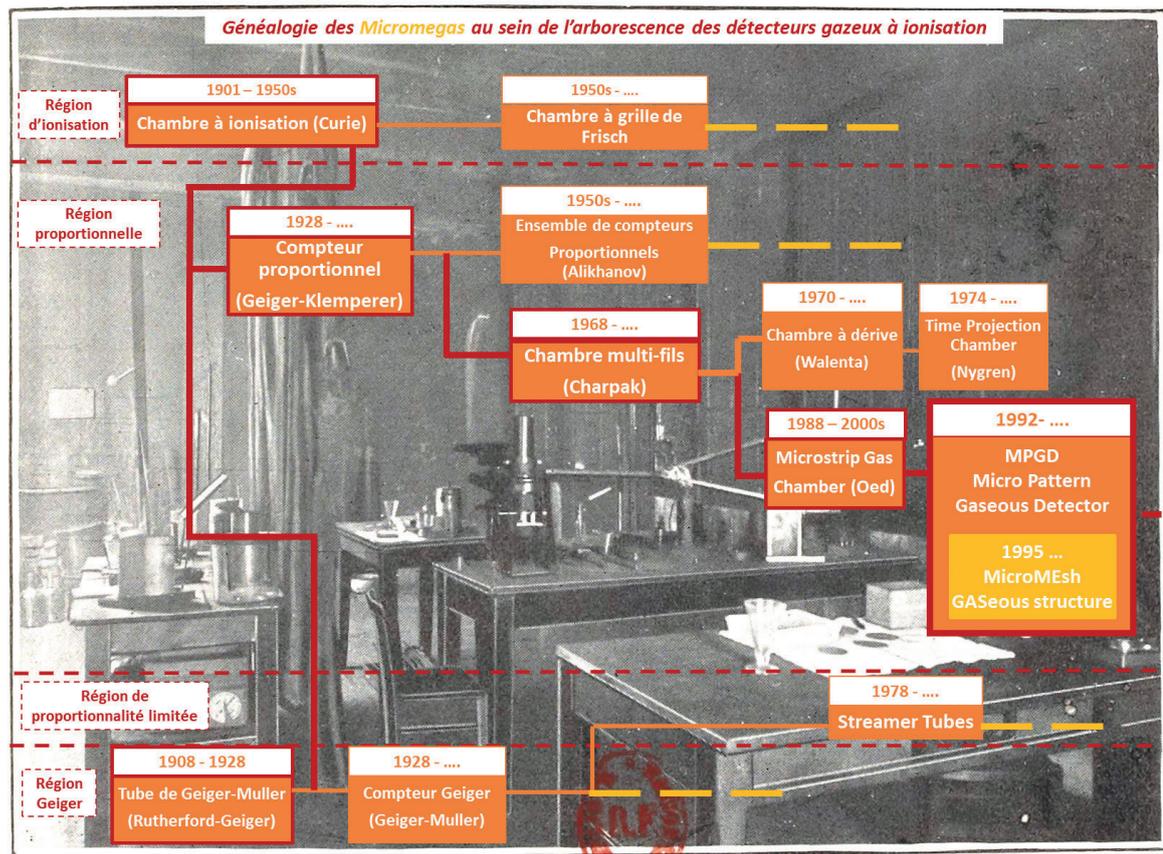
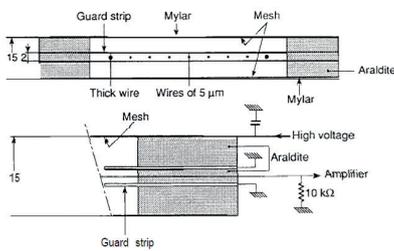


Figure 2. Arborescence des détecteurs gazeux à ionisation produisant un signal électrique (on a distingué suivant la région d'ionisation impliquée). Pour chaque lignée, les dates de début et éventuellement de fin sont indiquées. En arrière-plan, on aperçoit « l'installation de mesure de la radioactivité » dans le laboratoire des Curie [Source : BNF, Gallica gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k10653183].

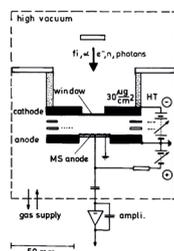
<sup>5</sup> Le bandeau présente une image de la chambre à ionisation conçue et fabriquée par Pierre Curie (1859-1906), et mise au point de 1895 à 1900 (photo © Science Museum London). Le principe de la mesure est schématisé sur la figure extraite du rapport présenté au Congrès international de Physique de 1900 (t. III p.79). Les nouvelles substances radioactives et les rayons qu'elles émettent, en commun avec Mme Curie ; In Œuvres de Pierre Curie, Société Française de Physique, Gauthier-Villars, 1908 (pp. 374-409).

<sup>6</sup> An electrical method of counting the number of alpha particle from radioactive substances, E. Rutherford et H. Geiger, Proceedings of the Royal Society (vol. 81, no. 546), 1908. <https://doi.org/10.1098/rspa.1908.0065>

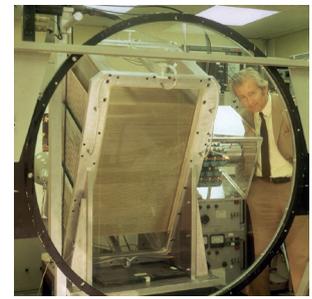
<sup>7</sup> C. G. Montgomery, D. D. Montgomery, The Discharge Mechanism of Geiger-Mueller Counters, Journal of the Franklin Institute 231, pp.447-467 (1941). [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(41\)90498-2](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(41)90498-2)



Chambres multi-fils. G. Charpak (1968)



Détection à anode micropistes. A. Oed (1988)



G. Charpak et un détecteur à particules au Cern en 1973 [©Cern]

Un seuil de concrétisation crucial fut franchi en 1968 avec l'invention par le futur prix Nobel Georges Charpak<sup>8</sup> des chambres multi-fils ou plus exactement *chambres proportionnelles multifilaires* (en anglais **MWPC** : *multi-wire proportional chamber*). Cette nouvelle génération d'instruments<sup>9</sup> a redynamisé la lignée des détecteurs gazeux à ionisation en intégrant le schéma technique permettant une sortie électrique du signal. La datation des concrétisations majeures antérieures (1901 – 1908 – 1928 – 1968) suggère que le progrès de la lignée était en décélération, alors que la datation des concrétisations postérieures (1968 – 1988 – 1995) indique une accélération du processus de concrétisation. À nos yeux, cette accélération est liée au fait que les chambres multi-fils, qui permettent le traitement informatique des données, se substituent aux ensembles techniques issus de la lignée des détecteurs visuels (chambres à bulles) pour faire de la trajectographie, absorbant ainsi une part de leur potentiel évolutif. Le choix du gaz, autre paramètre du fonctionnement modélisé sur le diagramme de la figure 1, a été également déterminant pour le succès de cette nouvelle génération de détecteurs. Fabio Sauli évoquait dans son ouvrage<sup>9</sup> le « gaz magique » adopté par le groupe de Charpak, qui avait conduit « à un cahier des charges plus simple pour l'électronique de lecture » et contribué à l'expansion de la technologie des MWPC.

Une autre étape importante dans l'évolution de la lignée des détecteurs gazeux à ionisation est le passage à l'échelle micrométrique avec la naissance des « *micro-pattern gaseous detectors* » (MPGD)<sup>9</sup>, des détecteurs gazeux à haute granularité et à petites distances (inférieures au millimètre) entre anodes et cathodes. Ce changement d'échelle a été rendu possible par le développement de la micro-électronique et les premiers travaux de Anton Oed<sup>10</sup>. Une reconfiguration globale de l'appareil fait alors franchir un seuil aux performances, notamment en termes de résolution et de temps de réponse.

Au sein des MPGD, les Micromegas<sup>11</sup>, inventés en 1995, se singularisent par le fait que le passage à l'échelle micrométrique s'opère aussi pour la grille employée. L'introduction de cette grille, inventée en 1944 par Otto Frisch, visait au départ à blinder l'espace au-dessus de la région d'amplification mais elle s'avéra utile par ailleurs en réduisant les temps de dérive et de réponse du détecteur – réalisant ainsi ce que Simondon appelle la « convergence des fonctions » par une « surabondance des effets » d'une invention qui résout plusieurs problèmes en même temps. Le nom Micromegas signale ce haut degré de concrétude : en appliquant le changement d'échelle aux distances anode-cathode comme à la grille, ces détecteurs ont fortement augmenté leur synergie interne.

Prolonger la formalisation d'une lignée par l'étude de son rythme de concrétisation permet aussi de formuler des hypothèses.

Une modélisation rudimentaire de la généalogie des Micromegas incite ainsi à explorer certaines zones temporelles : par exemple, 1948 apparaît comme une étape « manquante » induite par la symétrie de notre collection de dates. Cela vient du fait que nous nous sommes contentés d'analyser les lignées sans préciser l'invention d'éventuels éléments indispensables à leur apparition. Or, il se trouve qu'en 1948 paraissaient justement les premiers articles<sup>12</sup> suggérant d'utiliser des compteurs multi-fils, idée qui sera reprise vingt ans plus tard pour le développement des chambres multi-fils et qui contribuera à la renaissance de la lignée des détecteurs gazeux dont les Micromegas sont un des aboutissements.

Enfin, qu'en est-il des progrès réalisés après 1995 ? Si l'on reprend la série des étapes ayant conduit au Micromegas, on doit retenir comme dates principales de concrétisation 1901 – 1908 – 1928 – 1968 – 1988 – 1995, ce qui, par la recherche d'un prolongement symétrique conduit à chercher ce qui se serait passé en 2003. Or, cette année correspond au développement de la technologie « Bulk<sup>12</sup> ». Ce procédé de fabrication tout-en-un permet d'intégrer la microgrille à l'électrode de lecture afin de construire un détecteur monolithique ; il représente un progrès de la concrétisation même si des effets indésirables en relativisent la portée (difficulté à nettoyer les impuretés dans le cas de détecteurs de grande surface par exemple).

Au-delà de cette date, la rétrospection, et à plus forte raison la prospective, deviennent hasardeuses : l'arborescence des détecteurs gazeux à ionisation a en effet donné naissance à de multiples lignées qui demeurent actives aujourd'hui, certaines sous des formes hypertéliques, c'est-à-dire suradaptées à certaines « niches » (compteurs Geiger), d'autres avec une genericité bien plus grande et des perspectives importantes en termes de gain de concrétisation. Mais au sein de la compétition entre les différentes lignées, celle de Micromegas possède indéniablement un fort potentiel générique.



Thomas Guy et Vincent Bontems

<sup>8</sup> *The use of multiwire proportional counter to select and localize charged particles*, G. Charpak, R. Bouclier, T. Bressani, J. Favier, Č. Zupancić, Nuclear Instruments and Methods, vol. 62, pp. 262-268 (1968). [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(68\)90371-6](https://doi.org/10.1016/0029-554X(68)90371-6) [Figures du bandeau p.9 © 1968 Elsevier B.V].

<sup>9</sup> [Ndlr, V.L.] F. Sauli, *Gaseous Radiation Detectors*, section 1.2 « souvenirs personnels sur les détecteurs gazeux » ; chapitre 8 MWPC ; chap.13 MPGD. Voir la référence complète et la citation concernant les MWPC et le gaz magique dans la bibliographie, p.31.

<sup>10</sup> *Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases*, A. Oed, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 263, pp. 351-359 (1988). [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(88\)90970-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(88)90970-9) [Figures du bandeau p.9 © 1988 Elsevier B.V].

<sup>11</sup> Voir les premiers articles sur les développements de Micromegas, références p.31.

<sup>12</sup> *The properties of some new type of counters*, S. C. Curran et J. M. Reid, *The review of scientific instruments* 19, 67 (1948). <https://doi.org/10.1063/1.1741220>



Fabienne Kunne, devant Micromegas au Cern

# Un détecteur de pointe pour Compass

ou comment Micromegas sort du laboratoire pour aller au Cern

Par Fabienne Kunne pour l'équipe\* Compass de l'Irfu



L'expérience de physique des particules Compass (*Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy*) permet d'étudier la structure interne du proton et la spectroscopie des hadrons. Au sein de cette collaboration, l'équipe Irfu est plus particulièrement impliquée dans les études de la structure du nucléon en termes de quarks et gluons et leurs contributions au spin du proton. Le dispositif de Compass est installé au Cern sur la ligne de faisceau du *Super Proton Synchrotron* (SPS) qui délivre des muons et des hadrons de 160 à 200 GeV. La technologie Micromegas a été privilégiée pour ces études, ce qui a amené l'Irfu à contribuer de façon décisive à la réalisation de cette expérience et à la construction de détecteurs de pointe. Les conditions expérimentales des faisceaux ont conduit à améliorer les performances de Micromegas et à en fiabiliser le fonctionnement.

1996 – Une équipe<sup>1</sup> du Service de Physique Nucléaire (SPhN) du Dapnia<sup>q</sup> (ancêtre de l'Irfu) décide de rejoindre la collaboration Compass<sup>2</sup> au Cern. Pour les mesures envisagées, la mission est de mettre au point un spectromètre sur l'ancienne ligne de faisceau de l'expérience SMC<sup>3</sup>, c'est-à-dire un ensemble de détecteurs capables d'identifier et de mesurer les caractéristiques des particules issues de l'interaction du faisceau dans la cible. Les intensités de faisceau prévues sont dix fois plus élevées qu'auparavant. Le faisceau de muons à 200 GeV frappe une cible de protons. Le dispositif complet qui a été conçu dans les années 1996 est présenté sur la figure 1. Les particules produites sont éjectées vers l'avant et traversent une série de détecteurs spécifiques. L'équipe du SPhN est responsable du développement des détecteurs de particules chargées qui devront fonctionner dans la zone la plus radioactive du spectromètre : ils seront localisés juste derrière la longue cible solide, coincés entre les champs de fuite de son solénoïde et du premier dipôle du spectromètre. Leur rôle sera de donner la position de la particule juste après l'interaction dans la cible et juste avant d'entrer dans un aimant chargé de dévier légèrement sa trajectoire pour en déduire son impulsion. Comme l'énergie de la particule est mesurée plus loin, il est crucial que la traversée des détecteurs n'altère pas ou très peu cette énergie.

Les performances demandées sont extrêmement contraignantes. Aucun détecteur existant ne peut répondre à ces exigences : flux de  $10^5$  particules par  $\text{mm}^2$  et par seconde, résolution spatiale de l'ordre de  $80 \mu\text{m}$ , résolution temporelle de l'ordre de 10 ns, le tout sur une surface relativement grande, 40 par  $40 \text{ cm}^2$  et avec peu de matière.

Au Service d'Études des Détecteurs (SED) du Dapnia, un nouveau détecteur est à l'étude. Au début des années 1990, Georges Charpak et Ioannis Giomataris ont eu l'idée d'un nouveau type de détecteur gazeux à microstructure (p. 4). Nommé Micromegas, il présente sur le papier un potentiel étonnant : grâce à une microgrille séparant l'espace d'ionisation et de dérive des

électrons créés et l'espace d'amplification où se crée l'avalanche d'électrons, il devient possible d'accepter des taux élevés de particules incidentes. En effet, les multiples ions créés près de l'anode, dans le faible espace d'amplification entre la microgrille et le plan d'anode, n'ont que cette courte distance à parcourir avant d'être captés par la microgrille. En quelques dizaines de nanosecondes, le détecteur est opérationnel pour la prochaine particule. L'idée est vite adoptée, et une R&D active démarre pour adapter ces détecteurs à l'expérience Compass.

Des prototypes de petite taille sont fabriqués et testés avec des sources radioactives et sous faisceau. Un problème sérieux apparaît rapidement lors des tests menés avec le faisceau de pions : des décharges entre la microgrille et les pistes se produisent quasiment à chaque événement, aveuglant le détecteur pour plusieurs secondes, ce qui le rend temporairement inutilisable.

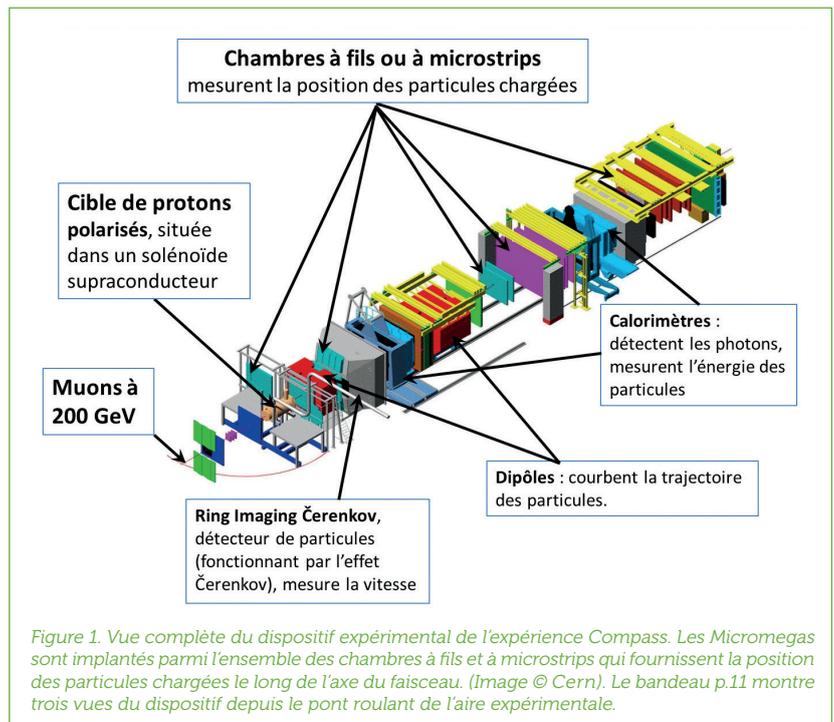


Figure 1. Vue complète du dispositif expérimental de l'expérience Compass. Les Micromegas sont implantés parmi l'ensemble des chambres à fils et à microstrips qui fournissent la position des particules chargées le long de l'axe du faisceau. (Image © Cern). Le bandeau p.11 montre trois vues du dispositif depuis le pont roulant de l'aire expérimentale.

<sup>1</sup> L'équipe était composée de physiciens et techniciens du Dapnia. Sur la photo (bandeau p. 10, à droite) prise au Cern en 2001 lors des premières utilisations en physique de Micromegas, on voit quelques-uns des physiciens des mesures pionnières : Alain Magnon, Claude Marchand, Fabienne Kunne, Philippe Rebourgeard et Georges Charpak, devant la chambre Micromegas de Compass.

<sup>2</sup> La collaboration Compass réunit 26 instituts de 14 pays, dont l'Allemagne, l'Italie, la France et la Russie. Pour en savoir plus, <http://wwwcompass.cern.ch>.

<sup>3</sup> SMC : Spin Muon Collaboration.

Après bien des études, trois améliorations permettront de s'affranchir de ce problème de décharges :

- Les mesures extensives utilisant différents mélanges gazeux permettent de mettre en évidence la relation entre la masse du gaz et les taux de décharge (cf encadré p. 22). Pour la première fois, des mélanges gazeux basés sur le néon plutôt que l'argon sont choisis.
- Le taux de décharge dépendant fortement du gain du détecteur, l'Irfu décide de développer une électronique de lecture des pistes (SFE16) rapide et à bas bruit. En fonctionnant alors avec des signaux plus faibles, le gain peut être réduit.
- Pour accélérer le temps de récupération de la microgrille après une décharge, les pistes sont découpées individuellement par des condensateurs. Ainsi, seules quelques pistes sont impliquées dans la décharge et la tension de la microgrille ne diminue que

afin de ne pas perturber les mesures d'énergie des particules. Une zone inactive de 5 cm de diamètre a été prévue au centre des détecteurs pour laisser passer le faisceau, afin de limiter l'occupation des voies d'électronique des pistes passant au centre.

La mécanique ingénieuse sur glissières du support des détecteurs permettait de les insérer ou de les sortir à tout moment par paire pour échanger les cartes électroniques, voire même extraire des détecteurs complets. Ce fut notamment utile les premières années, lorsque la qualité de fabrication n'était pas encore optimale et les problèmes fréquents. Néanmoins, les détecteurs donnaient d'excellents résultats. Les progrès étaient suivis avec un très grand intérêt par les physiciens des grandes expériences en construction au LHC. En effet, comparées aux caractéristiques des chambres à fils d'origine, la capacité à supporter les hauts flux de particules (de l'ordre de quelques  $\text{MHz}/\text{cm}^2$ ), et les tailles significatives des détecteurs Micromegas étaient très prometteuses.

À cette époque, au sein de la collaboration Compass, la compétition fut rude avec nos collègues qui développaient des détecteurs *Gas Electron Multiplier* (GEM) pour les implanter dans le même spectromètre, un peu plus loin de la cible, à un endroit où les conditions de fonctionnement étaient plus aisées : des taux de particules moins élevés, pas de champ magnétique, des détecteurs plus petits ( $30 \text{ par } 30 \text{ cm}^2$  seulement). Leurs choix pour résoudre les problèmes essentiels de décharges furent différents, avec trois étages de préamplification (les « triple GEM »), pour limiter le gain par GEM. Bien que réalisés avec des techniques différentes, les deux types de détecteurs, Micromegas et GEM, seront finalisés au début des années 2000 avec des performances assez similaires.

Les détecteurs Micromegas ont fonctionné avec des efficacités excellentes, proches de 98 %, des résolutions spatiales allant de 70 à  $110 \mu\text{m}$  (dépendant essentiellement des conditions expérimentales liées au champ magnétique extérieur qui pouvait atteindre deux teslas) et une résolution temporelle autour de 10 ns. Les taux de décharges étaient suffisamment faibles pour que l'efficacité reste stable.

En 2006, un nouvel aimant de grande ouverture (solénoïde supraconducteur entourant la cible polarisée) fut implanté dans Compass. Le champ magnétique était tel que les grandes microgrilles de nickel étaient déformées, modifiant allègrement les espaces d'ionisation et d'amplification. Des solutions furent trouvées dans l'urgence pour remplacer les grilles des détecteurs les plus affectés. La zone d'ionisation fut alors augmentée à 5 mm, des grilles en cuivre de grande taille furent fabriquées à partir de feuilles GEM et le mélange gazeux légèrement modifié. Ainsi, les détecteurs Micromegas résistèrent une fois de plus aux dures conditions expérimentales de Compass, jusqu'à ce que celles-ci évoluent à la fin des années 2000 pour une nouvelle phase de l'expérience, mais c'est une autre histoire...

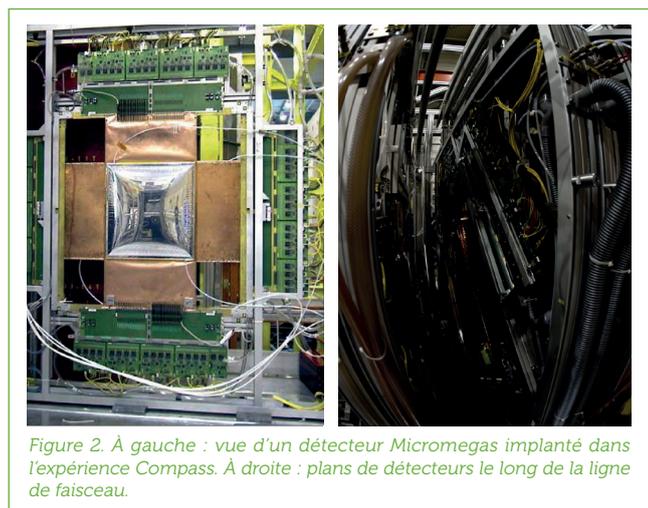


Figure 2. À gauche : vue d'un détecteur Micromegas implanté dans l'expérience Compass. À droite : plans de détecteurs le long de la ligne de faisceau.

de quelques volts ; cette tension est ensuite rétablie rapidement. Jamais utilisés dans une expérience de physique avant Compass, les détecteurs Micromegas de première génération comportaient 1024 pistes de cuivre sur  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  et une grande microgrille, de quatre microns d'épaisseur en nickel. L'électronique choisie était très robuste et très performante. Le choix du mélange gazeux (néon, éthane et  $\text{CF}_4$ ) avait été optimisé pour la réduction du nombre de décharges grâce au néon, la largeur des signaux grâce à l'éthane et la taille de la diffusion multiple et la vitesse avec du  $\text{CF}_4$ . Pendant plus de 10 ans, ces détecteurs sont restés les plus grands détecteurs à microstructure opérationnels.

Pour l'implantation dans Compass, les pistes ont été prolongées de 60 cm pour pouvoir éloigner l'électronique (et surtout la matière qu'elle représente) hors de l'acceptance du spectromètre,

#### Références de la collaboration Compass :

*Longitudinal spin structure of the nucleon: COMPASS legacy*, Y. Bedfer and COMPASS collaboration, Journal of Physics: Conf. Series 938 (2017) 012002.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/938/1/012002>

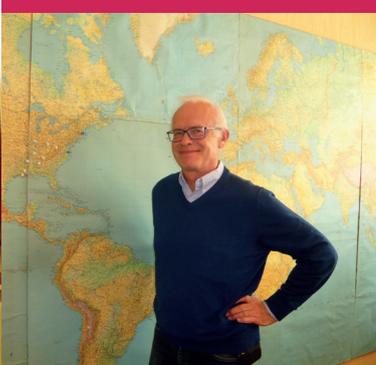
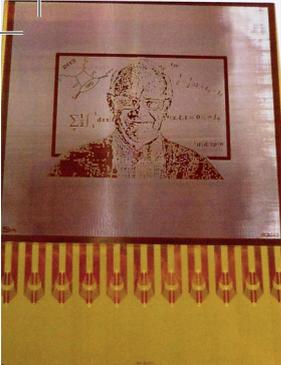
*The COMPASS setup for physics with hadron beams*, NIM A 779 pp. 69-115 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.01.035>

*The COMPASS experiment at CERN*, NIM A 577 pp. 455-518 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.03.026>

La page Web du projet Irfu : [http://irfu.cea.fr/Phoce/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast\\_technique.php?id\\_ast=392](http://irfu.cea.fr/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_technique.php?id_ast=392)

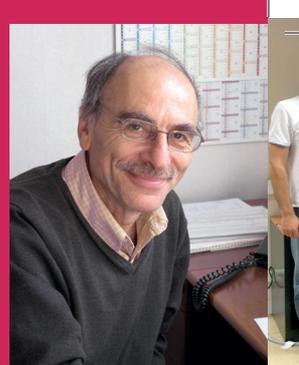
\*L'équipe projet de l'Irfu était composée du groupe du DPhN et de groupes dans les services des détecteurs (Sed), d'électronique et informatique (Sei) et d'ingénierie système (SIS), devenus Dedip et DIS. Chef de projet, Ph. Rebourgeard, suivi d'A. Delbart ; Ph. Abbon, Y. Bedfer, C. Bernet (2002-2005), Ph. Briet, P. Deck, E. Delagnes, A. Donati, D. Durand, R. Durand, A. Giganon, F. Gougnaud, F. Kunne, J.-M. Legoff, Th. Lerch, A. Magnon, D. Neyret, S. Panebianco (2002-2005), E. Pasquetto, H. Pereira (1999-2001), D. Pierrepont, S. Platchkov, S. Procureur (2003-2006), G. Tarte, D. Thers (1997-2000), M. Usseglio.

Credits photos : P.10 photographie du bandeau à gauche, Michael Hoch ; à droite : collaboration Compass. Figures 1 et 2, bandeau p.11 : Cern..



# Micromegas dévoile ses courbes avec Clas

Par Jacques Ball, Michel Garçon et Stephan Aune, pour l'équipe\* Clas12 de l'Irfu



L'Irfu a été pionnier dans l'étude des distributions de partons généralisées (*Generalized Parton Distributions*, ou GPDs) qui fournissent l'information complète sur la façon dont les quarks et les gluons s'agencent pour former un proton ou un neutron. Les expériences correspondantes<sup>1</sup> constituent un programme phare du nouvel accélérateur d'électrons, CebaF<sup>2</sup> à 12 GeV, situé au JLab<sup>2</sup>. Elles consistent à utiliser des électrons pour sonder l'intérieur du nucléon jusqu'au niveau des quarks, tout en faisant en sorte que le nucléon reste intact dans le processus. Ainsi, dans ce type de réactions, un électron interagissant avec un proton produit un électron, un proton et un photon ; le proton sondé reçoit peu d'énergie (entre 50 MeV et 1 GeV) et recule sous le choc avec un angle assez grand, de la même façon qu'une boule de billard à peine effleurée. La partie énergétique de la réaction est évacuée par le photon. Les processus mis en jeu pour cette diffusion ont un taux de production un million de fois plus petit que dans les réactions standard où le proton ne reste pas intact après la diffusion. Pour ces mesures, il faut permettre au proton peu énergétique diffusé de sortir de la cible avec un minimum d'interactions. Un système de détection de faible épaisseur est donc nécessaire autour de la cible. En 2005, des discussions sont menées pour faire évoluer les systèmes de détection : cette évolution accompagne la transformation du spectromètre Clas<sup>3</sup> en Clas12<sup>3</sup>, nécessaire pour s'adapter aux caractéristiques des faisceaux de 12 GeV. Cette période coïncide avec la « révolution » du détecteur bulk (*encadré*). On réalise et on démontre aussitôt au Sédi (devenu Dédip<sup>9</sup>) qu'un détecteur à microgrille intégrée permettrait

d'envisager un détecteur courbe de faible épaisseur (*Fig. 1 et encadré*) dont la rigidité mécanique serait même améliorée.

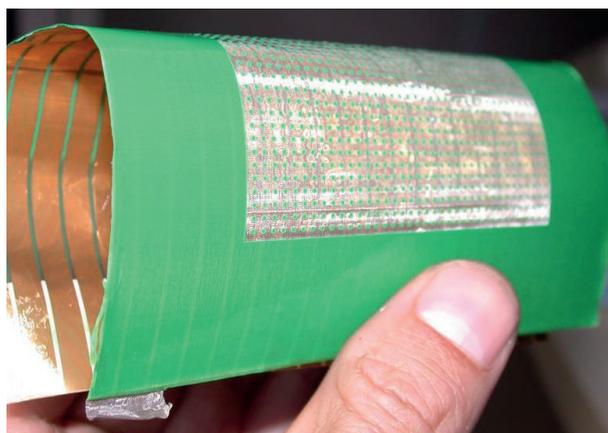
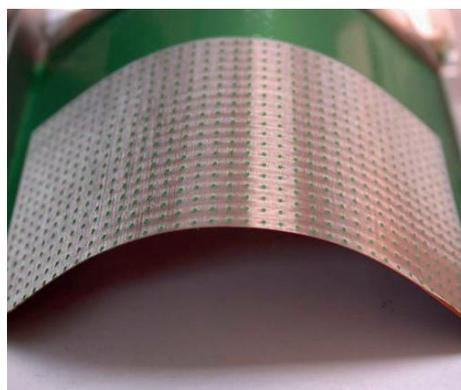
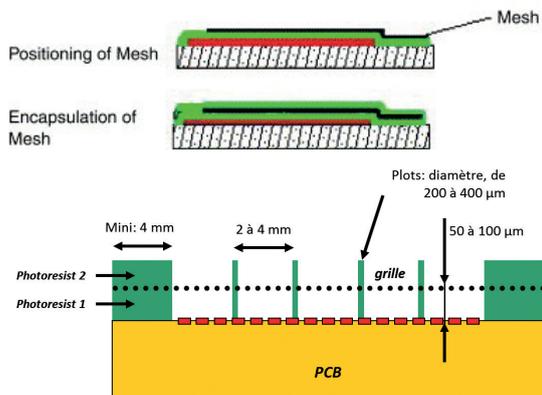


Figure 1. Une des premières tuiles courbes réalisées à partir du bulk. Un plan courbé en technique bulk, réalisé sur du mylar (50 µm) « strippé » (couvert de pistes) (la résistance entre anode et grille est infinie).

Pour les physiciens, cela ouvre la voie à un détecteur cylindrique compact (*voir le détecteur posé sur la table, dans la photo du bandeau p.13*) mince et rapide, des caractéristiques idéales pour la mesure du processus recherché.

## La technologie du bulk a ouvert la voie à des détecteurs courbes

Le Micromegas est dit « *bulk* » -massif ou global en anglais-, car la grille est encapsulée sur le cadre du circuit imprimé, le PCB<sup>9</sup>. Elle est intégrée par un assemblage global avec le « plancher » plan de lecture. Il s'agit d'une invention conjointe du Cern et du CEA de Saclay (2003). Elle a fait l'objet d'un brevet [B11] et d'une publication [NIM06]. En pratique, comment le *bulk* est-il réalisé ? Le schéma ci-dessous illustre le principe de fabrication. Le but est de faire un sandwich avec la grille (*mesh*) entre deux couches d'un matériau isolant (polyamide) sensible à la lumière (le *Photoresist*) sur un PCB. Typiquement, l'épaisseur de la grille est de 30 microns (µm) et l'espace entre grille et plan est de 128 µm. La grille est maintenue en position grâce à deux séries d'espaceurs, avant d'être encapsulée entre les films polyamides. L'ensemble du détecteur (le plancher comprenant les pistes et la grille) est monobloc après laminage, insolation aux ultraviolets au travers d'un masque puis traitement chimique (polymérisation).

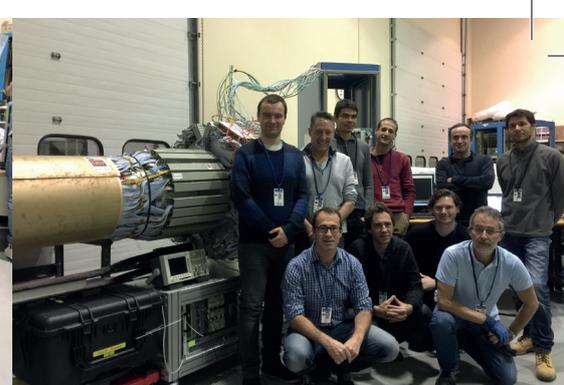


Les schémas présentent : à gauche, en haut, la technique de bulk avec la grille (ligne noire) positionnée entre deux couches (vert) de Photoresist; en bas, le bulk obtenu après laminages et traitements. À droite : photographie d'un bulk courbé sur du kapton (200 µm) cuivré.

<sup>1</sup> Expériences d'études du processus de diffusion Compton profondément virtuelle donc souvent accompagnées de l'acronyme de DVCS (*Deeply Virtual Compton Scattering*). Ce processus DVCS se traduit par la diffusion d'un électron sur un proton par échange d'un photon virtuel et la réémission d'un photon réel par le proton dans la voie finale.

<sup>2</sup> *Continuous Electron Beam Accelerator Facility*, accélérateur de faisceaux continus d'électrons du laboratoire national américain Thomas Jefferson (JLab), situé à Newport-News en Virginie, (JLab était anciennement appelé Cebaf).

<sup>3</sup> Clas : *CEBAF Large Acceptance Spectrometer* Spectromètre de large acceptance ; Clas12, le spectromètre à 12 GeV.



De leur côté, nos collègues américains travaillaient sur un projet de détecteur de vertex au silicium, qu'il était envisagé d'associer au trajectographe Micromegas pour obtenir les meilleures résolutions de mesure des angles et des énergies. Lors d'un atelier de la collaboration *Clas12* en 2006, les premières estimations indiquèrent qu'une combinaison de deux couches<sup>4</sup> de silicium et de quatre couches de Micromegas optimiserait la précision des mesures. L'accord final fut un compromis de « 3 + 3 », acceptable au vu de simulations complètes.

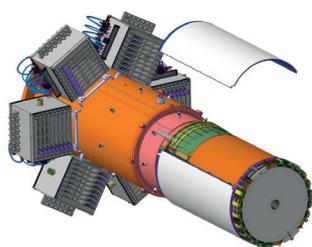


Figure 2. Maquette numérique du détecteur de vertex. Pour *Clas12*, le détecteur central est constitué de trois couches de Micromegas (couvrant environ 3 m<sup>2</sup> avec 10 000 voies d'électronique) avec deux plans de silicium ; le détecteur situé à l'avant comporte six plans annulaires de Micromegas. Les deux offrent peu de matière au passage des particules.

Le chemin à parcourir fut cependant ardu pour réaliser le trajectographe complet, le *Micromegas Vertex Tracker* (MVT) de *Clas12* (schématisé en Fig.2 et présenté en photo, Fig.3). Pour surmonter des contraintes techniques importantes, des développements innovants furent accomplis durant la phase de R&D. Les travaux furent nécessaires à la fois sur la structure, sur le mode d'opération du détecteur ainsi que sur l'électronique :

- Des détecteurs sur des planchers fins de 100 à 200 microns d'épaisseur furent réalisés avec la technologie *bulk*. Les tests montrèrent que les performances des Micromegas courbés n'étaient pas dégradées, et ce jusqu'à des rayons de 10 cm. Les tuiles courbes ont donc été construites de façon fiable sans perte de performance.

- Le tracker devant être soumis à un champ magnétique intense de cinq teslas, de nouvelles conditions de pression et de tension électrique ont été recherchées à partir de simulations de la physique du détecteur, ce qui a conduit à changer le mélange gazeux et les champs de dérive et à modifier la microgrille. Les nouvelles conditions calculées ont été testées avec des mesures réalisées en laboratoire, à partir des réponses du Micromegas au rayonnement cosmique.

- Pour optimiser l'intégration mécanique des détecteurs et de leur électronique dans un dispositif très compact, l'électronique de lecture a été éloignée très en amont du trajectographe, avec des câbles de 1,5 à 2,2 m de longueur adaptés pour réduire le bruit.

- En raison du flux de hadrons au voisinage de la cible, un taux élevé de claquages était attendu, autour de quelques hertz par détecteur. La technologie des pistes résistives développée au Cern en 2010, et l'électronique associée - adaptées aux flux élevés (voir p.11), ont donc été adoptées.

- La configuration du système et les conditions nominales de *Clas12* (notamment les flux élevés de particules de quelques dizaines de MHz et le taux de déclenchement de 10 à 20 kHz) ont nécessité une évolution de l'électronique de lecture (avec un nombre de voies autour de 15 000) et la conception de nouvelles cartes, des circuits intégrés Asics<sup>9</sup> développés par l'Irfu. Cette électronique *Dream*<sup>9</sup> a été employée ensuite pour d'autres applications de Micromegas (p.26).

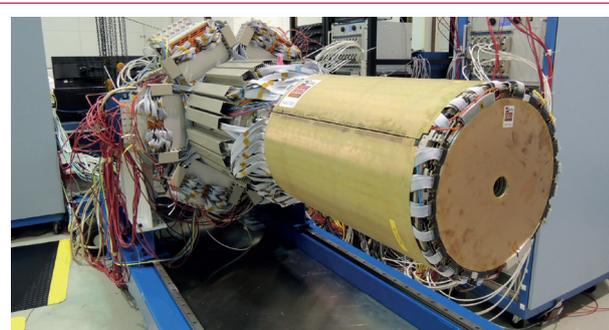


Figure 3. Trajectographe Micromegas (MVT) de *Clas12* lors du montage en laboratoire pour les tests réalisés en juin 2017 avec les prises de données sous rayonnement cosmique.

Cette longue période de R&D, soutenue par l'Agence Nationale pour la Recherche, fut fructueuse : jalonnée par sept publications, elle conduisit à la construction d'un autre trajectographe cylindrique, plus petit, pour l'expérience *Asacusa*<sup>5</sup> au Cern, ainsi qu'au dépôt de deux brevets<sup>6</sup>. Elle inspira aussi la conception initiale du détecteur *Minos* (p. 20). La technologie du *bulk* résistif (p. 22) fut adoptée en cours de projet. L'aboutissement ultime de ce type de trajectographe cylindrique serait d'être utilisé comme une alternative avantageuse aux chambres à projection temporelle (TPC) et aux détecteurs à silicium utilisés en physique des hautes énergies. Moindre coût, épaisseurs de matière un peu plus faibles... Micromegas n'a pas dit son dernier mot...

En 2017 : mission accomplie : le trajectographe MVT, livré au JLab en juin, a pris ses premières données de physique durant l'automne. Il s'agissait d'une expérience dont un physicien de l'Irfu était co-porte-parole et coordinateur. L'avenir du MVT se dessine également sur les programmes expérimentaux envisagés avec le futur collisionneur électron-ion (EIC) aux États-Unis.

Références : *Micromegas tracker project for CLAS12*, S. Aune et al., NIM A 604, p. 53-55 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.01.047>  
*Micromegas trackers for hadronic physics*, S. Procureur, Modern Physics Letters A 28 (2013) 1340024. <https://doi.org/10.1142/S0217732313400245>  
 Pages du projet *Clas12* sur le site de l'Irfu: <http://irfu.cea.fr>

\* *L'équipe Clas12 de l'Irfu ayant contribué aux développements du trajectographe Micromegas* : sur les photos des bandeaux, de gauche à droite, p.12: Jacques Ball, Michel Garçon, p.13 à gauche, l'équipe devant le détecteur courbe : Julien Giraud, Rémi Granelli, Olivier Meunier, Sébastien Procureur, Franck Sabatié, Maxence Vandenbroucke, Stephan Aune, Irakli Mandjavidze ; p.13, à droite, rangée du haut : Maxime Defurne, Marc Riallot, David Attié, Yassir Mouden, I. Mandjavidze, R. Granelli ; rangée du bas : F. Sabatié, S. Aune, M. Vandenbroucke, O. Meunier, sans oublier A. Acker (qui n'est pas sur la photo).

<sup>4</sup> On entend ici par couche un ensemble de deux détecteurs, chacun mesurant une coordonnée.

<sup>5</sup> *Asacusa* : *Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons*, expérience de production et de spectroscopie hyperfine d'atomes d'antihydrogène. <https://home.cern/fr/about/experiments/asacusa>

<sup>6</sup> L'un des brevets a porté sur la conception mécanique [B14A] et l'autre sur le principe innovant de multiplexage électronique [B14B], voir p.31.



# Micromegas déploie ses pétales et fait la roue

Par Fabien Jeanneau et Philippe Schune,  
pour l'équipe\* Atlas-NSW de l'Irfu

14

N° 97-98 -  $\mu$ M - 2018

Les détecteurs Micromegas sont principalement employés comme trajectographes afin de « pister » sur une ou deux dimensions la trajectoire des particules chargées avec une bonne précision. Leur atout majeur est d'offrir de grandes surfaces de détection à des coûts raisonnables, ce qui permet d'étendre la couverture angulaire des dispositifs. De plus, grâce à leur faible densité, ils peuvent être assemblés avec plusieurs couches de détection successives sans trop altérer les caractéristiques des particules incidentes. Ces deux propriétés (surface étendue et relative transparence) ont conduit l'équipe Atlas de l'Irfu, associée à d'autres laboratoires, à proposer cette technologie pour remplacer les détecteurs des « nouvelles petites roues » (*New Small Wheels, NSW*) du système à muons d'Atlas.

Le multi-détecteur Atlas<sup>9</sup> fait partie avec CMS des instruments qui équipent les installations du grand collisionneur de protons (LHC) au Cern. Ces deux expériences, les plus complexes de la physique des particules du XXI<sup>e</sup> siècle, visent à comprendre les constituants fondamentaux de la matière et leurs interactions. Elles ont déjà conduit à la découverte du boson de Higgs en 2012. Dans les quinze années à venir, elles ont pour objectif de vérifier très précisément le modèle standard de la physique des particules. Afin d'étendre le domaine de mesure des expériences, les performances de la machine vont être améliorées pour explorer des régions d'énergie plus élevées et accroître la luminosité<sup>9</sup> actuelle<sup>1</sup> d'un facteur cinq, après 2025.

Les détecteurs du LHC situés dans les régions les plus exposées aux radiations avaient été conçus pour fonctionner aux valeurs nominales de luminosité ( $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) et d'énergie, c'est-à-dire pour des protons accélérés à 7 TeV.

Dans les nouvelles conditions, le flux de particules créées lors des collisions ainsi que le bruit de fond associé, et donc les radiations baignant les détecteurs, seront multipliés par 10. Les équipements subiront alors un vieillissement important, d'où la nécessité de changer certaines parties de l'expérience Atlas.

Cette dégradation est évidemment bien connue et a été prise en compte dès la conception de l'expérience. Par conséquent, des arrêts plus ou moins longs sont prévus dans la programmation des faisceaux ou à l'installation de nouveaux détecteurs, dans le but de conserver et d'améliorer les performances nécessaires à la poursuite des programmes de physique.

En ce qui concerne la première phase de ces améliorations (en 2019-2020, durant l'arrêt du LHC), l'Irfu est engagé dans le remplacement des petites roues du système à muons actuel aux côtés des équipes de la collaboration Atlas-NSW.

*Petites roues ?* Pas vraiment ! Chaque roue mesurera 10 mètres de diamètre et sera constituée de 16 plans de détection (huit sTGC et huit Modules Micromegas) (Fig. 1) pour multiplier le nombre de points le long de la trajectoire des muons incidents. Ce programme a débuté par une longue phase de R&D dès 2008 qui a permis de choisir en 2013 les technologies Micromegas et sTGC pour équiper ce système, en remplacement des détecteurs gazeux actuels (tubes à dérive et chambres à cathodes). La technologie Micromegas est compétitive aussi au niveau du coût des détecteurs solides, 500 fois supérieur par unité de surface. Cinq équipes internationales (Allemagne, France, Grèce, Italie et Russie) sont impliquées dans la fabrication des Micromegas, et l'Irfu est chargé de construire un quart des détecteurs MM, soit au total 32 chambres trapézoïdales constituées de quatre plans de lecture de 3 m<sup>2</sup>. Un module « MM » de quatre plans de détection est constitué de cinq panneaux composites qui supportent les différentes électrodes.

Les nouvelles roues NSW devront participer à un premier tri des événements de l'expérience, en sélectionnant notamment les trajectoires des muons, pointant vers le vertex de collision au centre d'Atlas. Ces « bons » événements, très rares dans le flot de données, seront alors enregistrés par l'expérience Atlas dans son ensemble. Les sTGC, un peu plus rapides que les Micromegas, seront consacrées à ce premier tri. Pour augmenter le bras de levier et donc la précision de mesure de l'angle d'incidence du muon, les sTGC ont été positionnées sur les faces externes de la zone de détection. Les Micromegas, dont les mesures sont plus précises, sont eux à l'intérieur.

Le système à muons est avant tout un trajectographe qui doit permettre d'identifier avec précision les muons provenant du point d'interaction situé au centre du détecteur. Pour reconstruire l'impulsion de ces particules avec une résolution de 15 % à une énergie de 1 TeV, les points de passages de la trajectoire devront être mesurés avec une précision de 100 microns selon la coordonnée  $\eta$ . De plus, le détecteur devra supporter des taux allant jusqu'à 15 kHz par cm<sup>2</sup> (pour les plans les plus proches de l'axe du faisceau). Il devra fonctionner dans ces conditions extrêmes sans dégradation des performances durant une période de 15 ans. Ceci implique de fortes contraintes sur la construction des détecteurs Micromegas qui devront être plans à  $\pm 100 \mu\text{m}$  près, avec des pistes de détection de 450 microns de large et parallèles à  $\pm 40 \mu\text{m}$  sur un module complet (voir les axes en figure 1).

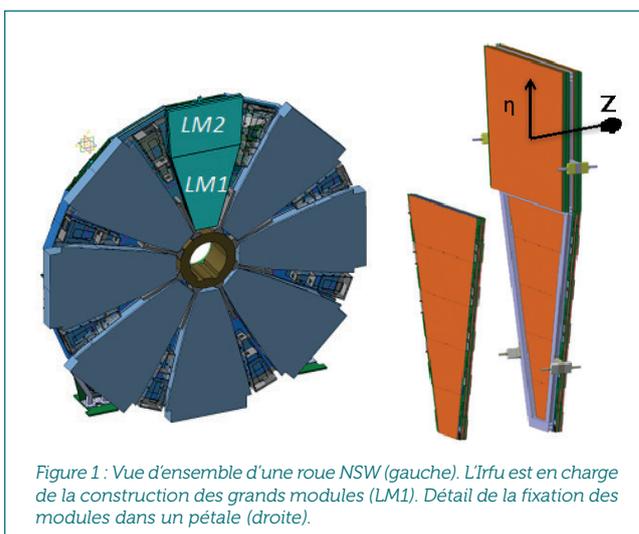


Figure 1 : Vue d'ensemble d'une roue NSW (gauche). L'Irfu est en charge de la construction des grands modules (LM1). Détail de la fixation des modules dans un pétale (droite).

<sup>1</sup> En 2017, le LHC a recueilli 50 fb<sup>-1</sup> de données.

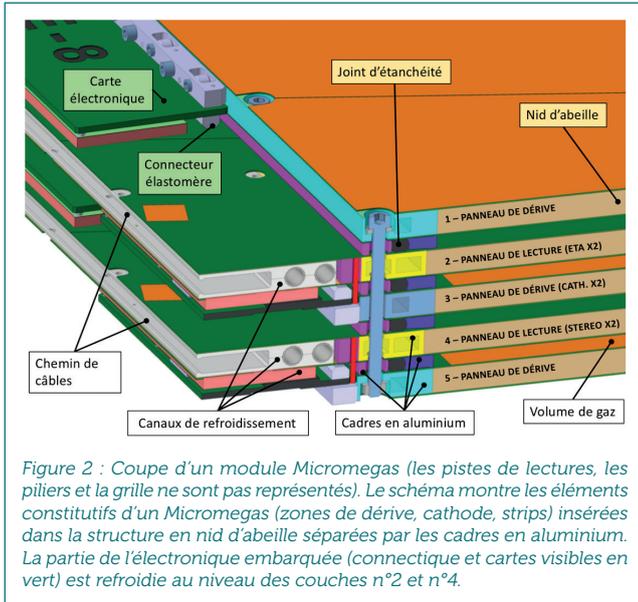


Figure 2 : Coupe d'un module Micromegas (les pistes de lectures, les piliers et la grille ne sont pas représentés). Le schéma montre les éléments constitutifs d'un Micromegas (zones de dérive, cathode, strips) insérées dans la structure en nid d'abeille séparées par les cadres en aluminium. La partie de l'électronique embarquée (connectique et cartes visibles en vert) est refroidie au niveau des couches n°2 et n°4.

Les détecteurs chargés des mesures de précision seront donc les Micromegas constitués de modules quadri-plans, chaque plan comportant environ 5000 pistes soit autour de 20 000 par module complet.

Outre le défi mécanique posé par l'assemblage précis de ces détecteurs (Fig. 2), il faut souligner que la construction de détecteur Micromegas de cette taille constitue une première mondiale. Tous les moyens sont mis en œuvre pour arriver aux précisions élevées et aux performances attendues par les expériences de physique, à commencer par les infrastructures. Les contraintes sur les conditions de fabrication concernent la stabilité de l'hygrométrie et des températures ainsi que la propreté. L'Irfu s'est donc équipé depuis 2017 d'une nouvelle salle propre, la plateforme Ciclad<sup>2</sup> (Fig. 3 et bandeau p.15) pour le développement et la caractérisation de détecteurs de grande taille, dont la première mise en œuvre est la production de 400 m<sup>2</sup> de détecteurs Micromegas destinés au projet Atlas-NSW. Un tel environnement est nécessaire pour construire les éléments qui constitueront les quadruplets, dont aussi pour assurer le bon fonctionnement du détecteur dont le comportement électrique dépend de la propreté des surfaces lors de l'assemblage.

Cette salle propre est complétée par un ensemble d'instruments de précision pour contrôler la planéité et l'épaisseur des plans de détection mais aussi l'alignement des pistes. Les deux marbres de précision de Ciclad sont munis de portiques mobiles à sustentation aérostatique, permettant des contrôles dimensionnels avec une précision de quelques micromètres et l'induction de colle automatique des pièces.



Figure 3 : Intérieur de la salle propre Ciclad lors du collage de l'un des cinq panneaux de lecture sur le module MM par des membres de l'équipe Atlas-NSW.

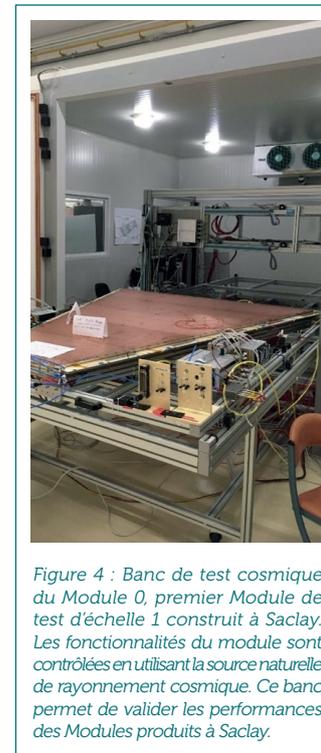


Figure 4 : Banc de test cosmique du Module 0, premier Module de test d'échelle 1 construit à Saclay. Les fonctionnalités du module sont contrôlées en utilisant la source naturelle de rayonnement cosmique. Ce banc permet de valider les performances des Modules produits à Saclay.

En 2017, le Module-0, prototype à l'échelle 1, a été construit. Après la vérification des critères de qualité (étanchéité, tenue à la haute tension), les performances fonctionnelles ont été évaluées lors des tests sous faisceau réalisés à l'automne, suivis par la phase de production. Après l'intégration au Cern de 2019 à 2020, Atlas sera remis à neuf pour attendre les nouvelles prises de données du LHC et travailler notamment avec les faisceaux prévus dans le mode de haute luminosité à partir de 2026.

#### Références.

The ATLAS Collaboration. New Small Wheel Technical Design Report; CERN-LHCC-2013-006. CERN, Geneva, 2013 ; <https://cds.cern.ch/record/1552862>

Pages des projets de l'Irfu : Atlas [http://irfu.cea.fr/Phoce/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast\\_technique.php?id\\_ast=1213](http://irfu.cea.fr/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_technique.php?id_ast=1213)

Spectromètre à muons d'Atlas « Atlas-Muons » [http://irfu.cea.fr/Phoce/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast\\_sstechnique.php?id\\_ast=387](http://irfu.cea.fr/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_sstechnique.php?id_ast=387)

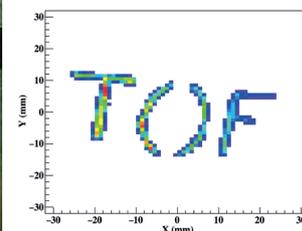
\* **L'équipe NSW de l'Irfu** : Ph. Schune (Responsable Scientifique), F. Jeanneau (Chef de Projet), J. Allard, F. Bauer, J. Beltramelli, H. Bervas, T. Bey, S. Bouaziz, M. Boyer, G. Cara, T. Chaleil, J. Costa, C. Dacien, G. Decock, D. Denysiuk, D. Desforges, G. Disset, G-A. Durand, R. Durand, E. Ferrer-Ribas, A. Formica, A. Giganon, J. Giraud, P-F. Giraud, C. Goblin, J-C. Guillard, S. Hassani, B. Jose, D. Jourde, J. Elman, Ch. Lampoudis, J-F. Laporte, D. Leboeuf, M. Lefèvre, C. Loiseau, J. Manjarrés, Ph. Mas, M. Mur, A. Peyaud, Y. Piret, P. Ponsot, G. Prono, M. Riallot, V. Robichon, G. de la Rochefoucauld, F. Rossi, T. Chevalerias, M. Usseglio, Th. Vacher, M. Vandenbroucke, A. Vigier.

<sup>2</sup> Ciclad : Conception, Intégration et Caractérisation de Détecteurs de grandes tailles. Cette plateforme comporte une salle blanche de 140 m<sup>2</sup>. Ouverte aux chercheurs et aux industriels, elle enrichit l'offre technologique du complexe « Détecteurs de l'Irfu ». Elle a bénéficié d'un financement de la région Île-de-France.

Crédits Photos : Irfu, CEA DRF.

# Micromegas prend les neutrons au vol

Par Frank Gunsing,  
Eric Berthoumieux et Emmeric Dupont  
pour l'équipe\* n\_TOF de l'Irfu



Les réactions induites par les neutrons interviennent dans nombre d'applications de la physique nucléaire, des réacteurs jusqu'aux processus d'astrophysique. Pour réaliser les mesures nécessaires et en améliorer la précision, la collaboration internationale n\_TOF<sup>9</sup> (*Neutron Time of Flight*) [1,2] déploie des dispositifs de détection des neutrons. Pour la mesure du temps de vol des neutrons, Micromegas est employé du fait de sa très bonne précision en temps. Avec sa structure 2D, le détecteur est aussi devenu un profileur de neutrons qui peut être déployé sur des installations de production des faisceaux de neutrons, comme Gelina<sup>1</sup> (à Geel), ou NFS<sup>9</sup> (au Ganil, à Caen).

La meilleure méthode pour déterminer l'énergie cinétique d'un neutron avec une très grande précision et sur une large gamme d'énergie est la méthode de temps de vol. Elle consiste à mesurer l'intervalle de temps entre l'instant de sa production et l'instant de sa détection. La précision requise est de l'ordre de quelques nanosecondes sur une plage de temps de 100 ms, or la densité des signaux mesurée est élevée. Un faisceau pulsé de protons ou d'électrons traversant une cible massive va produire des neutrons avec des énergies variées, à un instant donné. Après être passés à travers un modérateur (généralement de l'eau) afin d'élargir le domaine énergétique couvert, les neutrons peuvent interagir avec un échantillon placé à une distance donnée, typiquement entre 5 et 500 mètres. L'instant de cette détection donne le temps mis par le neutron pour parcourir cette distance et donc son énergie cinétique. Les détecteurs Micromegas mesurent deux types de grandeurs : les sections efficaces<sup>9</sup> (qui ne sont autres que le taux de réactions induites par les neutrons) et le profil spatial du faisceau de neutrons. Ils mesurent directement les temps de vol des neutrons par la détection des produits de fission ou des noyaux  $\alpha$  (<sup>4</sup>He).

L'architecture de ces détecteurs doit minimiser la matière traversée par le faisceau afin d'en affecter le moins possible les propriétés. Cette « transparence » est obtenue en limitant les supports mécaniques dans le faisceau, en utilisant la technique du **Microbulk**<sup>9</sup> et en privilégiant un fonctionnement à pression atmosphérique, ou plus basse, pour le gaz. Les protons de recul, issus de l'hydrogène dans le gaz, rendent pour l'instant très difficile la mesure des réactions où un proton est émis. Ils constituent une source de bruit de fond quand des particules légères comme des alphas doivent être détectées. Le diamètre du faisceau est typiquement de 20 à 80 mm en fonction des collimateurs. Afin de mesurer la tache du faisceau, qui varie avec l'énergie du neutron, des détecteurs Micromegas sont utilisés comme « profileurs ». Ces détecteurs sont segmentés, soit en pixels, soit en pistes. Le dernier développement pour un profileur est de combiner la transparence avec la segmentation en pistes [3]. Ce détecteur 2D consiste en un Microbulk avec une microgrille segmentée en 60 pistes d'un millimètre de large, et l'anode segmentée perpendiculairement (Fig. 1 et photo du bandeau, à gauche). La surface active de détection est de 6 par 6 cm<sup>2</sup>.

Les positions ont été mesurées avec ce détecteur (sans temps de vol) à l'aide d'un masque de cuivre (photo du bandeau, à droite) et d'une source de rayons X de 5.9 keV : le graphe (bandeau) montre l'image reconstituée [3]. L'électronique et le système d'acquisition sont établis sur les puces de micro-électronique (« chips ») AGET<sup>9</sup> afin de pouvoir traiter les signaux des 120 pistes sur toute la fenêtre en temps de vol. Depuis 2002, les détecteurs ont évolué suivant les deux principes de mesure (Fig.2). Ces détecteurs ont été utilisés à n\_TOF ou à Gelina<sup>1</sup>. Leur critère de transparence est garanti grâce à la technique Microbulk adoptée.

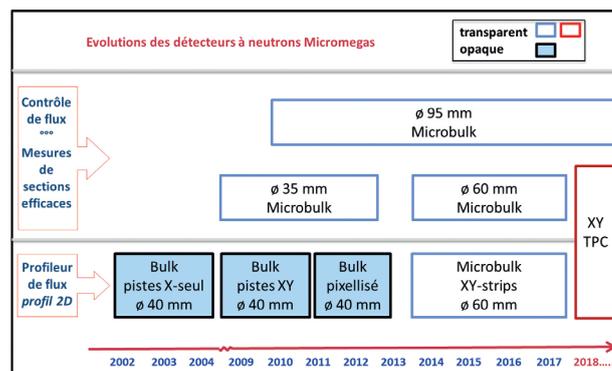


Figure 2 : Evolution des détecteurs à neutrons Micromegas pour les dispositifs de temps de vol.

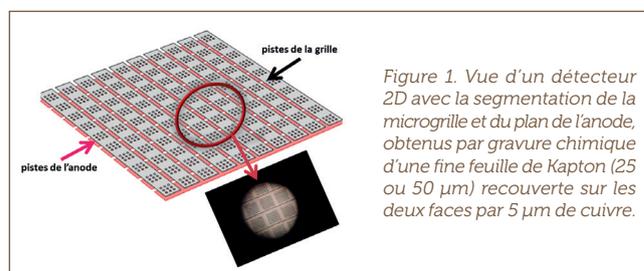


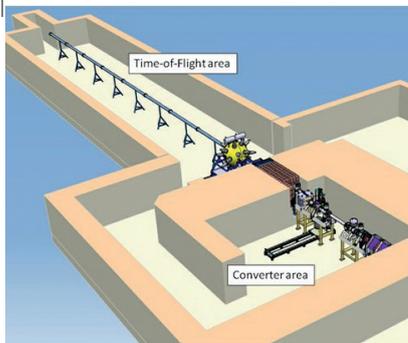
Figure 1. Vue d'un détecteur 2D avec la segmentation de la microgrille et du plan de l'anode, obtenus par gravure chimique d'une fine feuille de Kapton (25 ou 50 µm) recouverte sur les deux faces par 5 µm de cuivre.

La technique des Microbulk transparents est désormais bien maîtrisée et régulièrement utilisée pour la mesure des réactions induites par neutrons. Grâce à sa transparence aux neutrons, le détecteur peut rester dans le faisceau pour réaliser les mesures du profil à n\_TOF. La dernière génération, avec un diamètre de 60 mm, a été validée et sera utilisée à NFS (cf p.17). Les développements incluent la miniaturisation et l'intégration dans la chambre des éléments d'amplification et de filtrage afin d'optimiser les conditions de bruit tout en respectant un signal assez court pour réduire les effets d'empilement des signaux (« pile-up »). Il est aussi envisagé de développer une chambre capable de mesurer les réactions produisant des protons avec un gaz sans hydrogène pour s'affranchir des protons de recul. Les détecteurs 2D sont utilisés pour mesurer les énergies avec une bonne résolution et reconstruire les trajectoires de particules, avec une séparation efficace du signal et du bruit de fond. Leur évolution pourrait conduire à des systèmes de temps de vol donnant accès aux propriétés détaillées des noyaux, comme la distribution angulaire des particules émises. Ces caractéristiques permettent également d'envisager des applications aux expériences qui nécessitent de repousser les limites de la sélection des événements rares (voir les encadrés p.29).

Références : [1] Scintillations n°95, page 6 (2016) "n\_TOF ouvre une nouvelle aire au Cern".  
[2] Nuclear data activities at the n\_TOF facility at CERN, The n\_TOF Collaboration, Eur. Phys. J. Plus (2016) 131: 371. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2016-16371-4>.  
[3] M. Diakaki et al., A novel segmented mesh Micromegas detector development for neutron beam profiling, NIM A 903, p. 46-55 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.06.019>

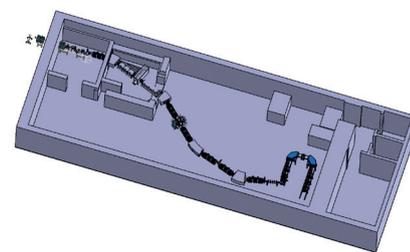
\* L'équipe n\_TOF de l'Irfu. DPhN : E. Berthoumieux, M. Diakaki (2014-2016), E. Dupont, F. Gunsing, Z. Mezentseva (2007-2009), J. Pancin (2001-2004); Dédip : S. Anvar, D. Desforge, A. Giganon, Y. Giomataris, D. Jourde, E. Monmarthe, E. Ferrer-Ribas, F. Belloni (SPhN 2010-2013), M. Kebbiri, Th. Papaevangelou, M. Riailot, P. Sizu.

<sup>1</sup> L'installation Gelina (GEel LINear Accelerator) est localisée à Geel en Belgique, elle appartient au centre de recherche JRC (Joint Research Centre) de la Commission européenne. <https://ec.europa.eu/jrc/en/research-facility/linear-electron-accelerator-facility>



## Les détecteurs à basse pression pour S<sup>3</sup> et NFS : avec ou sans Micromegas ?

Par Diane Doré, Antoine Drouart et Julien Pancin, pour les équipes\* NFS et S<sup>3</sup> de l'Irfu et du Ganil

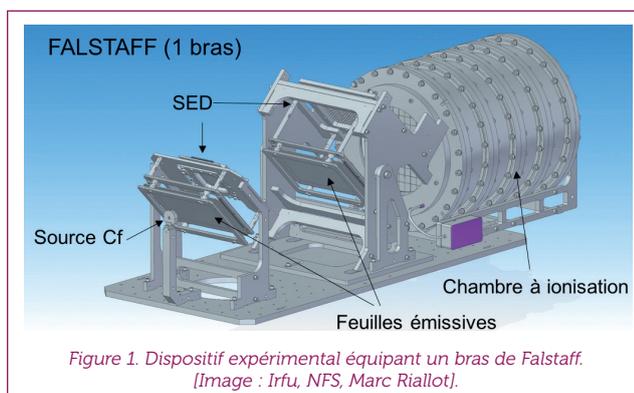


**C**onstruit dans le cadre du projet Spiral2<sup>2</sup>, l'accélérateur linéaire<sup>1</sup> du Ganil produira des faisceaux d'ions (de l'hydrogène jusqu'au nickel) à des énergies de l'ordre de quelques MeV par nucléon jusqu'à une trentaine de MeV par nucléon. Ces faisceaux seront distribués dans les aires expérimentales<sup>2</sup> du spectromètre S<sup>3</sup> et NFS, pour lesquelles l'Irfu a eu des contributions majeures, aussi bien pour la ligne de faisceau que pour les systèmes de détection. Les détecteurs Micromegas ont-ils un rôle à jouer dans les expériences du projet Spiral2 ?

Les programmes de S<sup>3</sup> s'intéressent aux caractéristiques de noyaux lourds et superlourds. Ils permettront de mieux comprendre comment des noyaux lourds exotiques peuvent être produits par différents mécanismes : fusion, fission, transfert de plusieurs nucléons... Les noyaux doivent être identifiés après la réaction, au niveau du plan focal du spectromètre, et leurs trajectoires et vitesses doivent être déterminées par la méthode du temps de vol. Or les noyaux à détecter ont des masses élevées (au-delà de 100 nucléons) et des énergies faibles (moins de 2 MeV/nucléon). Comme les détecteurs classiques introduisent des dispersions en énergie et en position qui dégradent les résolutions recherchées, des prototypes de détecteurs particuliers, les SED (*Secondary Electron Detectors*) ont été conçus. Leur composition permet de limiter les interactions avec le faisceau. Ils sont bien adaptés pour les mesures réalisées au niveau du plan focal du spectromètre S<sup>3</sup>. Un SED consiste en une feuille émissive fine inclinée à 45° et placée sous faisceau, avec un détecteur d'électrons disposé en dehors de l'axe du faisceau. Ce détecteur gazeux peut être un Micromegas ou une chambre à fils remplie d'isobutane à environ 6,5 mbar. Il mesure les électrons arrachés par les noyaux du faisceau qui traversent la feuille polarisée à -10 kV. Une nouvelle chambre à fils de grande taille (de l'ordre d'une feuille A5), et des Micromegas de 7 cm de côté ont été étudiés. Les choix de détection ont résulté de la combinaison des contraintes sur les résolutions spatiale (moins d'un millimètre) et temporelle (autour de 300 ps, en largeur totale à mi-hauteur). Pour la première fois, ces deux paramètres ont été mesurés pour un Micromegas à très basse pression en configuration SED. Les différents prototypes ont permis d'atteindre des résolutions spatiales de l'ordre de 0,5 mm et temporelle de l'ordre de 400 ps. Malgré ces bons résultats, plusieurs raisons ont conduit à retenir les détecteurs de type SED avec chambre à fils SED-MWPC : une bonne résolution temporelle d'environ 300 ps (LTMH) et une faible capacité électrique même pour de grandes surfaces de détection. Même soumis à des taux de comptage élevés, ces SED ont des performances qui n'ont rien à envier aux Micromegas, sachant toutefois qu'à ces faibles pressions, un Micromegas doit fonctionner en mode pré-amplification<sup>3</sup> pour atteindre ses performances nominales. La même problématique s'est imposée dans le cas des développements instrumentaux pour l'installation NFS, qui produira des faisceaux de neutrons (mono-énergétiques) de grande intensité, sur une gamme en énergie allant de quelques centaines de keV à 30 MeV. L'arrêt du faisceau de deutons sur une cible épaisse de béryllium produira, par exemple, un flux de neutrons de 5 MeV de l'ordre de 10<sup>6</sup> n/cm<sup>2</sup>/s à une distance de 1 m de la sortie du collimateur. Ces neutrons seront utilisés pour étudier divers processus de physique nucléaire, comme la fission ou l'évaporation. Il s'agit de mesurer à la fois des probabilités d'interaction entre noyau incident et cible (sections efficaces de réactions) et d'en caractériser les produits (fragments, neutrons, photons,...).

Les faisceaux de neutrons, protons, deutons ou alphas permettront de réaliser d'autres études à buts applicatifs, en mesurant l'activation des matériaux sur l'aire NFS. Cela concerne notamment les mesures employées pour mieux connaître les noyaux et enrichir les bases de données et d'évaluations nécessaires à différents domaines, comme la production d'énergie nucléaire, la résistance des matériaux utilisés dans l'espace, ou encore l'estimation des performances des instruments en phase de développement. Différentes expériences sont prévues dans la salle de temps de vol de NFS. L'Irfu est moteur du projet de physique Falstaff<sup>4</sup> qui a pour but d'étudier la fission des actinides en caractérisant les fragments et la corrélation avec la multiplicité des neutrons évaporés. Les observables sont la charge, la vitesse et l'énergie des fragments. À l'origine, plusieurs pistes étaient envisagées pour choisir entre détecteurs gazeux à basse pression, semi-conducteurs ou Micromegas.

Le choix s'est porté vers les détecteurs de type SED-MWPC<sup>4</sup> pour la mesure du temps de vol, puisqu'à ce jour leur résolution temporelle est meilleure que celle des Micromegas. Pour la mesure de l'énergie, la résolution à atteindre est de 1 %. Le phénomène d'amplification des détecteurs proportionnels risquait d'augmenter l'incertitude sur la mesure de l'énergie. C'est pourquoi une chambre à ionisation a été préférée. L'ensemble du dispositif prévu pour équiper chaque « bras » de Falstaff est présenté sur la figure 1.



Une salle de NFS sera destinée à la mesure du temps de vol pour déterminer les énergies des neutrons incidents. Afin de caractériser les flux de neutrons dans cette salle, la collaboration NFS combinera plusieurs types de détecteurs, dont un Micromegas, dont la fonction est similaire à celle de l'instrument employé sur n\_TOF (p. 16). Les aires S<sup>3</sup> et NFS feront donc cohabiter des dispositifs variés, choisis parmi les détecteurs les plus adaptés aux caractéristiques spécifiques des noyaux à étudier. Micromegas en fera partie !

\* Les équipes Irfu et Ganil impliquées dans les développements des Sed, des Micromegas et de Falstaff (F) : D. Doré (F), A. Drouart, G. Frémont, M. Kebbiri (Sed, F), Ph. Legou (F), J. Pancin, M. Riailot (Sed, F), Ch. Spitaels, L. Thulliez (F, 2014-2017).

<sup>1</sup> Accélérateur linéaire supraconducteur nommé Linag : *Linear Accelerator at Ganil*. W. Mittig, A.C.C. Villari, For the SPIRAL2 APD group, [pour le groupe de l'avant-projet détaillé de Spiral2], *GANIL and the SPIRAL2 project*, *Eur. Phys. J. A* 25, s01, 737-738 (2005) : <https://doi.org/10.1140/epjad/i2005-06-137-6>

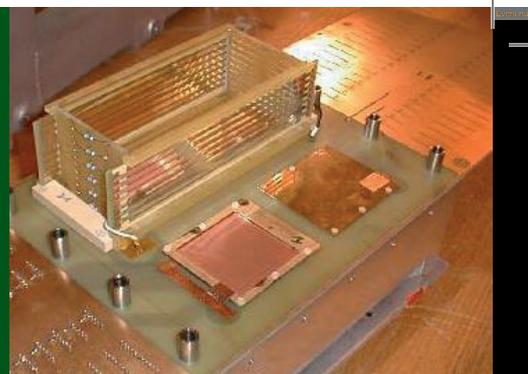
<sup>2</sup> Les vues aériennes des deux aires sont présentées sur les dessins du bandeau, à gauche, *Neutron for Science*, NFS, <http://pro.ganil-spiral2.eu/laboratory/experimental-areas/nfs> et à droite, *le Super Spectromètre Séparateur S<sup>3</sup> (Super Separator Spectrometer)* <http://pro.ganil-spiral2.eu/spiral2/instrumentation/s3/s3-at-ganil>

<sup>3</sup> Mode de pré-amplification : quand l'amplification commence dès la zone de dérive.

<sup>4</sup> Falstaff : *Four Arm cLover for the STudy of Actinide Fission Fragments*, ensemble de quatre bras pour l'étude des fragments de fission.

# Kabes et T2K, ou l'art de la trajectographie à toutes les échelles !

Par Edoardo Mazzucato pour les équipes Kabes\* NA48 et T2K\*\* de l'Irfu



18

N° 97-98 -  $\mu$ M - 2018

**A**u cours des années 2000, l'Irfu (à l'époque le Dapnia) a joué un rôle de premier plan dans la réalisation du spectromètre de faisceau Kabes (*Kaon Beam Spectrometer*) pour le projet NA48-2 au Cern ainsi que dans la construction des chambres à projection temporelle TPC<sup>9</sup> de l'expérience T2K au Japon. Si ces instruments contrastent par leur taille et par la technologie Micromegas utilisée, ils permettent tous deux la reconstruction tridimensionnelle des trajectoires de particules chargées avec des performances exceptionnelles.

Les mesures précises de trajectoire et de temps de passage des particules sont les informations cruciales des expériences de physique des particules à haute énergie. Lorsqu'il s'agit d'étudier des phénomènes très rares, il est nécessaire d'utiliser des faisceaux de particules de haute intensité et forte densité qui rendent ces mesures délicates. Le projet Kabes avait justement pour but de détecter les particules incidentes à haut flux (de l'ordre de 30 millions de particules par seconde) de l'expérience NA48-2 du *Super Synchrotron de Protons* (SPS). Cette expérience avait pour objectif la recherche de la violation de la symétrie CP dans certains canaux de désintégrations des kaons chargés  $K^+$  et  $K^-$ . Le spectromètre magnétique Kabes a alors été conçu pour mesurer les profils des faisceaux de Kaons. Ce comptage était primordial pour déterminer une différence entre les données recueillies avec les deux faisceaux et obtenir ainsi une signature de la violation de CP.

Kabes a été réalisé par le Dapnia<sup>9</sup>. Installé sur la ligne de faisceau de hadrons ( $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ) de 60 GeV/c de l'expérience NA48-2, il est constitué d'un ensemble de détecteurs gazeux de petite taille (*Fig. 1*) fonctionnant en mode TPC. Le bandeau p.18 présente un ensemble de deux TPC de Kabes en cours d'assemblage, avec la cage de champ visible derrière la grille posée au premier plan. Cette cage électrostatique qui entoure tout l'espace entre le plan de la cathode et le plan d'anode pour créer un champ électrique de dérive uniforme. La mesure précise du temps et de la position des particules du faisceau repose sur l'utilisation de détecteurs Micromegas de première génération avec un espace d'amplification de 50  $\mu$ m. La résolution temporelle de l'ordre de  $10^{-9}$  s permet l'identification des traces dans un flux intense de plusieurs MHz/cm<sup>2</sup> et assure une résolution d'environ 50  $\mu$ m dans la direction de dérive des électrons. La coordonnée verticale, obtenue avec une précision de 100  $\mu$ m à partir de la charge mesurée sur les pistes de lecture, permet de déterminer l'impulsion du faisceau à 1 % près, même à haut flux.



Figure 1. Un des détecteurs de Kabes déplacé horizontalement de 20 cm hors de la ligne du faisceau pour en apercevoir la fenêtre d'entrée.

Lors des tests d'une station prototype de Kabes en juillet 2002, le flux de particules chargées a atteint le taux de  $2,0 \cdot 10^7$  par seconde sur une surface moyenne de 10 cm<sup>2</sup>, et de  $2,0 \cdot 10^6$  par seconde pour les pistes les plus exposées.

Kabes a été utilisé avec succès en 2003-2004 dans un faisceau intense de  $2,0 \cdot 10^7$  particules par seconde sur une surface d'environ 4 cm<sup>2</sup>. Le courant de grille, proportionnel au flux de particules, a joué avantageusement le rôle de compteur de faisceau. Grâce à la faible épaisseur de matière exposée au faisceau, le fonctionnement de Kabes s'est révélé d'une très grande stabilité, avec un faible taux de décharges.

L'association d'une TPC avec Micromegas, développée par le Dapnia, a doté l'expérience NA48-2 d'un formidable outil pour mener à bien de nombreuses mesures de précision liées aux désintégrations de kaons chargés [1].

## T2K au Japon

Un programme ambitieux sur la mesure des oscillations de neutrinos [2] est mené dans le cadre de l'expérience T2K en cours d'exploitation. La conception du dispositif a débuté dans les années 2000. Les grandes chambres TPC sont disposées auprès du détecteur dit « proche » (il fournit les mesures auprès de la source d'émission) ND280, sur le site de J-PARC à Tokai. Ces TPC [3] constituent l'un des éléments essentiels de T2K puisqu'elles fournissent le comptage des neutrinos proches de leur point de production et donc avant qu'ils n'aient pu osciller [2]. Cette mesure fournit la normalisation de l'expérience.

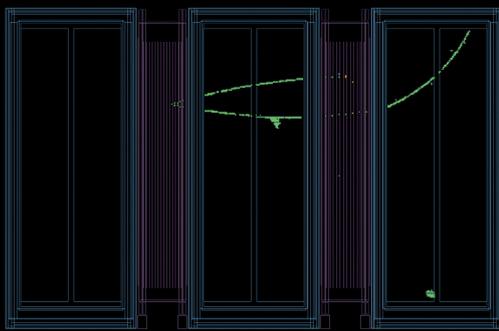


Figure 2. Vue d'un panneau équipant l'une des trois TPC de grande surface (9 m<sup>2</sup> chacune). Ce panneau, en cours d'intégration, est composé de 12 modules Micromegas. Les trois TPC forment le détecteur proche de T2K, chargé de caractériser le faisceau de neutrino.

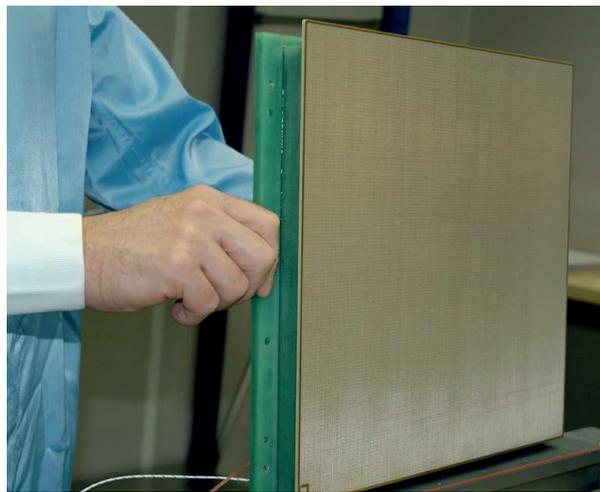


Figure 3. Eléments de la mosaïque de détecteurs Micromegas « bulk » pour les chambres à projection temporelle de l'expérience T2K au Japon.

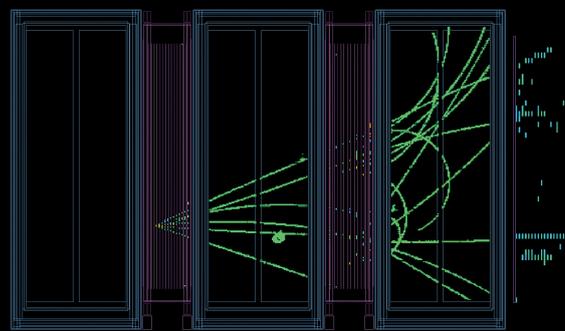


Figure 4. Schéma des chambres TPC de T2K, avec l'observation des effets de l'interaction d'un neutrino dans une cible en scintillateur (en rose) visualisée par les TPC (volumes entourés de bleu) du détecteur proche de T2K ND280. Les lignes vertes représentent les traces laissées par les particules chargées produites dans la cible et détectées dans les trois TPC. Les images du bandeau (p.19) présentent également des exemples d'interaction d'un neutrino dans la cible, visualisés par les trajectoires reconstruites (en vert) par les TPC.

Les trois TPC sont placées de part et d'autre de cibles (composées d'enclenches contenant un liquide scintillant) dans un champ magnétique de 0,2 teslas. Elles occupent un volume total de 18 m<sup>3</sup> et offrent une surface de détection de 9 m<sup>2</sup> (Fig. 2) recouverte par 72 modules Micromegas (vue d'un module, Fig. 3) dont le fonctionnement repose sur la technologie « bulk » (p.12) développée conjointement par le Dapnia et le Cern.

Ces instruments, qui ne comptent pas moins de 124 000 canaux de lecture avec une granularité fine inférieure au cm<sup>2</sup>, fournissent des images 3D de haute résolution avec une précision submillimétrique sur la position des traces (Figure 4). L'ensemble de la chaîne de traitement de signal (circuit intégré frontal spécifique, électronique de proximité, logiciel d'acquisition, logiciel de reconstruction des traces) est conçu et produit à l'Irfu. En fonctionnement depuis 2010, les TPC de T2K continuent de traquer sans faille les interactions de neutrinos parmi le flux des particules chargées.

L'Irfu a été l'un des pionniers dans la construction de ces instruments de précision, notamment dans la conception et la réalisation des détecteurs Micromegas et de leur électronique de lecture. Dès 2021, le programme de physique de T2K entrera dans une nouvelle phase avec l'utilisation de faisceaux plus intenses et un dispositif expérimental amélioré. L'Irfu sera sans aucun doute amené à jouer un rôle majeur dans la réalisation de nouvelles TPC qui pourraient utiliser des Micromegas résistifs. Micromegas a encore de belles années à venir dans l'expérience T2K !

#### Références et contributeurs aux projets :

[1] B. Peyaud (Dapnia, Saclay), KABES: A novel beam spectrometer for NA48, NIM A 535 (2004) 247-252

<https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.07.275> ; \*pour l'équipe du CEA DSM/Dapnia, Saclay : M. Boyer, C. Cheshkov, J.B. Cheze, X. Coppolani, A. Delbart, J. Derré, S. Herlant, P. Le-Bourlout, P. Legou, O. Maillard, I. Mandjavidze, C. Mazur, E. Mazzucato, F. Nizery, F. Orsini, B. Peyaud, M. Riallot, B. Vallage.

[2] Scintillations n°96, p. 4 à 9 ; p.4 : encadré sur le phénomène des oscillations de neutrinos.

[http://irfu.cea.fr/Phocea/file.php?file=ScintillationS/ScintillationS\\_N96.pdf](http://irfu.cea.fr/Phocea/file.php?file=ScintillationS/ScintillationS_N96.pdf)

[3] T2K ND280 TPC Collaboration (Abgrall, N. et al.), Time Projection Chambers for the T2K Near Detectors,

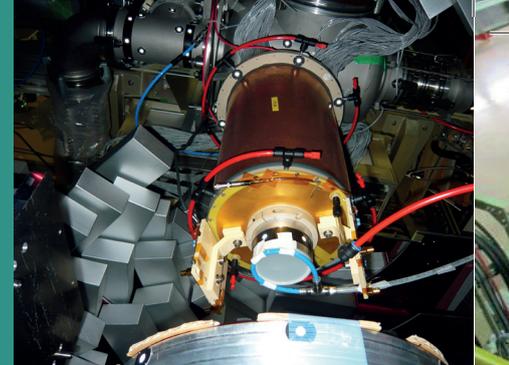
NIM A 637 (2011) 25-46 - <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.02.036> .

\*\* Les membres de l'équipe projet de l'Irfu : P. Baron, J. Beucher, F. Blaszczyk, M. Boyer, D. Calvet, P. Colas, X. De La Broise, E. Delagnes, A. Delbart, F. Druillole, C. Giganti, I. Giomataris, J. Giraud, S. Herlant, E. Mazzucato, J.-Ph. Mols, E. Monmarthe, F. Nizery, F. Pierre, D. Pierrepont, J.-M. Reymond, J.-L. Ritou, A. Sarat, M. Usseglio, G. Vasseur, M. Zito.

Credits photos. Figures 1 et 3 : Irfu ; figures 2 et 4 : T2K.

# La trajectographie 3D des réactions nucléaires avec la cible active Minos

Par Alain Delbart pour l'équipe\* Minos de l'Irfu



**P**our déterminer l'évolution de la structure des noyaux très éloignés de la vallée de stabilité – dits exotiques –, il faut mesurer leurs premiers états excités, or ces noyaux sont produits à des intensités très faibles (inférieures à 1/s), il faut donc être capable d'optimiser la luminosité des réactions et la résolution en énergie : Minos (*MAGic Numbers Off Stability*) est l'instrument spécialement conçu et réalisé par l'Irfu (2010-2013) pour mener à bien ces expériences de spectroscopie de noyaux exotiques.

Minos [1] a été exploité depuis 2014 auprès de l'accélérateur RIBF de l'institut de recherche japonais Nishina de Riken<sup>1</sup>. Il est constitué d'une cible épaisse cryogénique d'hydrogène liquide à -253°C, (longue de 10 à 15 cm, et d'un diamètre de 4 cm), entourée d'une chambre à projection temporelle (TPC) cylindrique de 30 cm de long.

La TPC est utilisée pour localiser avec quelques millimètres de précision le point d'interaction du faisceau d'ions radioactifs. Cette TPC est présentée en coupe sur la figure 1 et de profil le long de l'axe du faisceau sur la photo du bandeau, à droite (dans le fond, on peut voir le système cryogénique pour la cible).

Elle est constituée de deux cylindres définissant le champ électrique (cages de champs interne et externe) et entre lesquels circule un mélange d'argon, d'isobutane et de tétrafluorure de carbone. La TPC est fermée d'un côté par un plan de cuivre porté à 6 000 V (cathode) et de l'autre par un plan de lecture Micromegas *bulk* (« imageur » anode).

Cette zone active de l'imageur est pixellisée, elle comporte 3604 pixels sensibles. La correspondance entre le signal et la zone spatiale des pixels touchés permet la reconstruction des trajectoires en trois dimensions (encadré, figure 2).

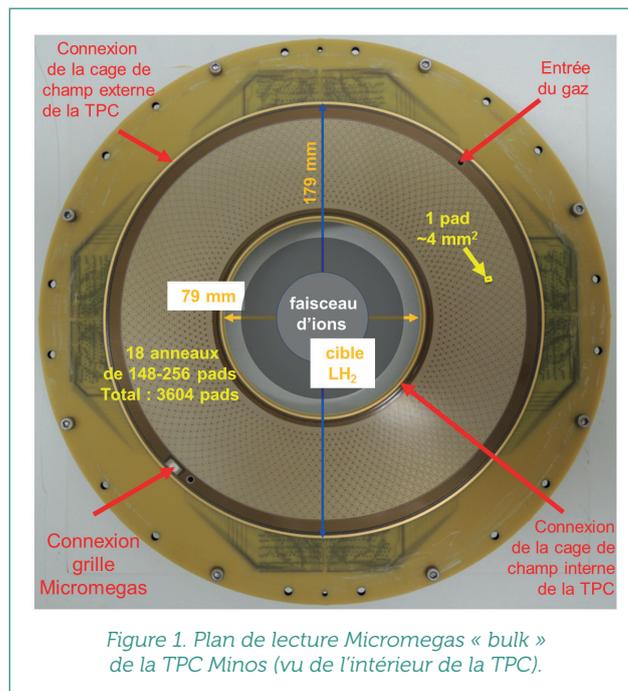


Figure 1. Plan de lecture Micromegas « bulk » de la TPC Minos (vu de l'intérieur de la TPC).

## La reconstruction des trajectoires en 3 dimensions via la pixellisation (V.L.)

En combinant un détecteur cylindrique Micromegas entourant une cible épaisse de réaction, cylindre disposé le long de la ligne de faisceau, on peut mesurer le vertex, point d'interaction des noyaux réagissant avec les noyaux de la cible. Les électrons sont arrachés aux molécules du gaz contenu dans la cellule autour de la cible. Le signal est créé par le flux d'électrons guidés puis multipliés. Le signal électrique est généré sur quelques pixels du détecteur et transmis à l'électronique, on dispose ainsi du repérage spatial grâce à la localisation des pixels, et de la mesure du temps d'arrivée des électrons, ce qui permet une reconstruction en trois dimensions des trajectoires. Les photons émis en vol par les noyaux excités lors des réactions sont détectés dans le spectromètre de photons Dali2 composé de 186 détecteurs (blocs métalliques, au NaI, visibles sur la photo du bandeau, autour de la TPC). À partir de la reconstruction des trajectoires, le lieu de la réaction est déterminé ce qui permet d'effectuer avec précision, sur les énergies des photons détectés dans Dali2, les corrections d'effet Doppler correspondant au décalage en énergie dû à l'émission en vol du photon. Les énergies des photons sont obtenues en coïncidence avec les particules mesurées dans la TPC et avec les noyaux incidents et sortants de la réaction, identifiés par des spectromètres sur la ligne de faisceau de RIBF.

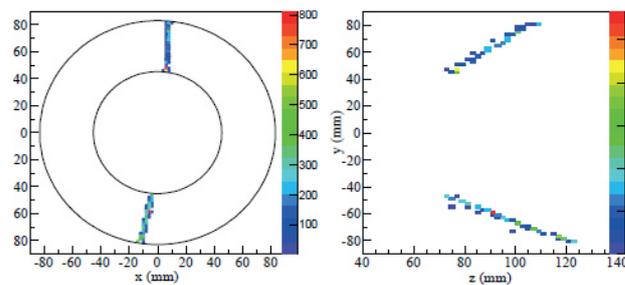
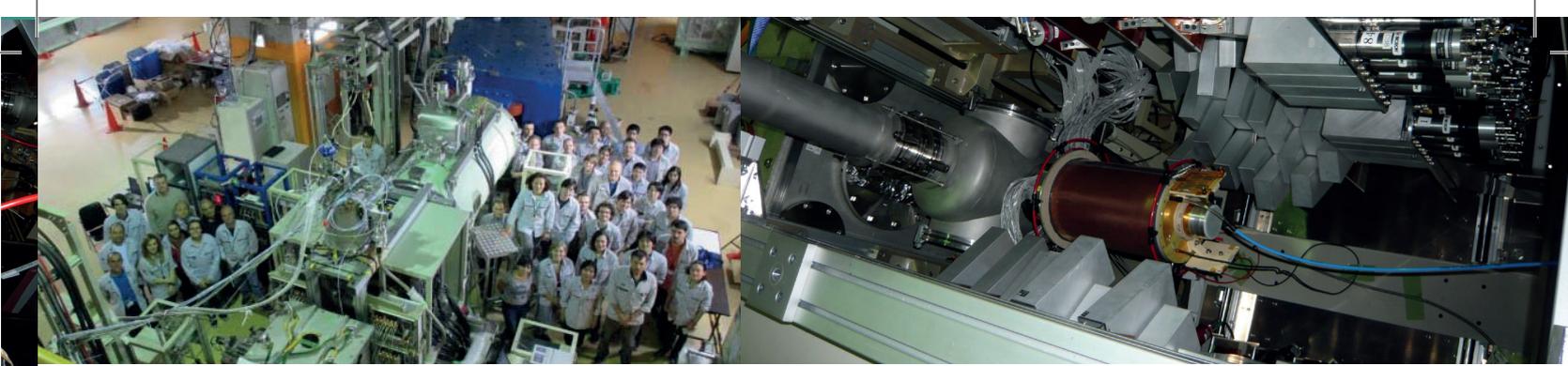


Figure 2. Événement reconstruit par la TPC en projection 2D sur le plan Micromegas. Le repère de la TPC cylindrique de Minos est ici (x,y) pour la coupe transverse et (y,z) pour le profil le long de l'axe de la chambre. On voit dans ces deux plans des traces des trajectoires reconstruites pour deux particules détectées dans la TPC. On obtient les traces de deux protons en sélectionnant les événements associés aux mesures en coïncidence avec les noyaux d'intérêt identifiés avant et après la réaction (p,2p) qui produit deux protons sur la cible de proton: il s'agit de la paire où le noyau avant la cible a un nombre de nucléons (masse) A, et un nombre de protons Z, et le noyau après la cible a une masse A-1 ; un nombre de protons Z-1. Par exemple : la réaction du <sup>111</sup>Nb sur proton produit deux protons et le noyau de <sup>110</sup>Zr.

Cela permet de déterminer quelles réactions correspondent à l'émission de deux protons. Ces réactions, notées (p,2p), sont principalement étudiées pour obtenir la spectroscopie des noyaux d'intérêt. La TPC peut reconstruire les trajectoires des deux protons issus de l'interaction avec une résolution spatiale submillimétrique.



Ce détecteur Micromegas a la particularité d'être évidé en son centre pour le passage de la cible d'hydrogène : sa réalisation a fait appel à l'ingéniosité des techniciens de l'atelier MPGD<sup>9</sup> de l'Irfu pour intégrer la grille tissée à 128 microns au-dessus du circuit imprimé. La granularité de l'imageur (~5 pixels par cm<sup>2</sup>) est telle que la conception du circuit imprimé a nécessité l'utilisation de 12 couches internes et plus de 18 000 trous métallisés pour extraire et transmettre le signal électronique de chacun de ses pixels à l'électronique de lecture déportée à 80 cm du détecteur. La lecture des signaux de chaque pixel est effectuée avec des cartes d'électronique frontale entièrement développées à l'Irfu ; elles étaient initialement conçues pour la lecture des TPCs de l'expérience T2K (p.19). Elles sont équipées avec la puce Agat<sup>9</sup> constituée de 64 canaux de lecture. Une nouvelle carte d'acquisition de données a été spécifiquement développée pour ce système, appelée Feminos pour *Front end Electronics Minos* (FEM) [2]. L'ensemble des pixels à coder nécessite vingt cartes d'électronique, chacune comporte quatre puces Agat. Les 20 cartes permettent de lire environ 5 000 canaux avec un taux d'échantillonnage maximum de plusieurs kHz. Le traitement des signaux et l'acquisition pour Minos ont notamment fait l'objet du développement du logiciel *Mordicus* à l'Irfu [3].

De 2014 à 2017, six TPC ont été réalisées et testées à Saclay avant d'être envoyées au Japon pour leur mise en opération lors des différentes campagnes scientifiques, notamment les trois « SEASTAR »<sup>2</sup> dont l'objectif était de mesurer pour la première fois les états excités 2<sup>+</sup> d'une vingtaine de noyaux très riches en neutrons, seulement produits en laboratoire sur l'installation japonaise RIBF à des intensités très faibles (de quelques particules à parfois moins d'une par seconde). Lors de ces campagnes, des zones nouvelles de la table des noyaux ont été examinées (Figure 3) et l'analyse des mesures a conduit à une moisson de résultats marquants sur la spectroscopie des noyaux exotiques.

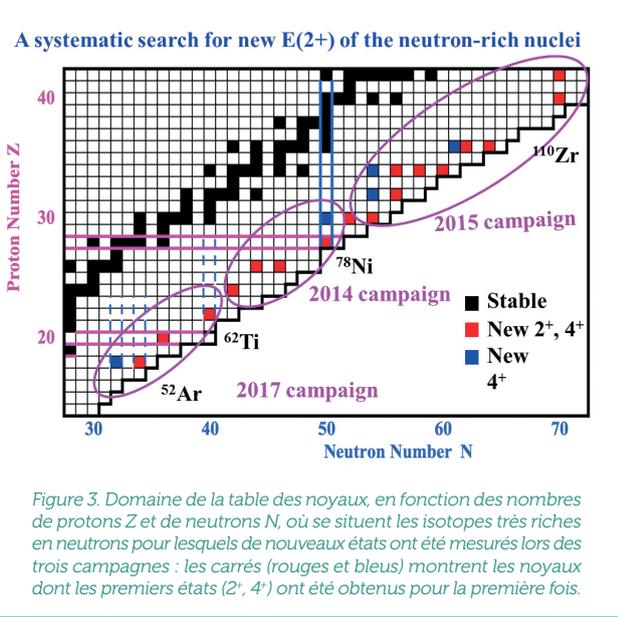


Figure 3. Domaine de la table des noyaux, en fonction des nombres de protons Z et de neutrons N, où se situent les isotopes très riches en neutrons pour lesquels de nouveaux états ont été mesurés lors des trois campagnes : les carrés (rouges et bleus) montrent les noyaux dont les premiers états (2<sup>+</sup>, 4<sup>+</sup>) ont été obtenus pour la première fois.

Minos est un instrument unique pour ces études. Installé auprès de l'accélérateur de Riken, il est actuellement combiné au détecteur de photons Dali2. Il est envisagé de l'associer à des ensembles aux performances accrues, au Japon ou auprès d'autres accélérateurs (GSI en Allemagne) pour poursuivre les explorations des noyaux exotiques par cette technique de trajectographie 3D en coïncidence avec la détection de gammas.

Son avenir scientifique est prometteur avec les faisceaux de noyaux très instables qui seront produits dans les grands accélérateurs internationaux.

Références :

- [1] Scintillations, N°92 (Oct. 2015), p.2, « Force et excès dans le noyau ». Site du projet : <http://minos.cea.fr>
- A. Obertelli et al., European Physical Journal A 50: 8 (2014) <https://doi.org/10.1140/epja/i2014-14008-y>
- [2] The readout electronics and data acquisition system of the MINOS vertex tracker, S. Anvar, H. Baba, H. Bervas, D. Besin, D. Calvet, F. Château, X. Coppolani, A. Corsi, A. Delbart, A. Giganon, A. Gillibert, C. Lahonde-Hamdoun, V. Lapoux, A. Obertelli, A. Peyaud, E. Pollacco, G. Prono, C. Santamaria, H. Zaghia, Real Time Conference (RT), 2014 19th IEEE-NPSS, <https://doi.org/10.1109/RTC.2014.7097530>
- [3] Mordicus-hw: A C++ framework for backend electronics control and configuration, S. Anvar, F. Château et P. Sizun, (RT), 2014 19th IEEE-NPSS, <https://doi.org/10.1109/RTC.2014.7097459>

\* L'équipe Minos de l'Irfu. DACM : Gilles Authelet, Jean-Marc Gheller, Clément Hilaire. Dédip : Frédéric Château, Denis Calvet, Alain Delbart (chef de projet), Arnaud Giganon, Alan Payaud. DIS (2010-2015) : Didier Leboeuf, Cédric Péron, Jean-Yves Roussé.  
 DPhN : Anna Corsi, Alain Gillibert, Valérie Lapoux, Alexandre Obertelli (responsable scientifique du projet), Nancy Paul (2014-2018), Emmanuel Pollacco, Clémentine Santamaria (2013-2016). Avant les campagnes (R&D Minos, 2010-2014) : Dédip : Shebli Anvar, Caroline Lahonde-Hamdoun, J. Ph. Mols, Gilles Prono; DPhN : Laurent Audirac (2011-2013).  
 Photo du bandeau p.20 de gauche à droite (1<sup>re</sup> campagne, mai 2014) : (en bas) J.M. Gheller, A. Obertelli, G. Authelet ; (milieu) A. Delbart ; (en haut) V. Lapoux, C. Péron, C. Santamaria, F. Château, D. Calvet, A. Peyaud, E. Pollacco. Page 21 : collaboration internationale de Seastar (2014).

<sup>1</sup> RIBF: Radioactive Ion Beam Facility, accélérateur de noyaux radioactifs qui appartient au centre de recherche Nishina de l'institut Riken, le Nishina Center for Accelerator-Based Science. [http://www.nishina.riken.jp/index\\_e.html](http://www.nishina.riken.jp/index_e.html)  
<sup>2</sup> SEASTAR : Shell Evolution And Search for Two-plus energies At RIBF, « évolution de la structure en couches et recherche d'énergies 2<sup>+</sup> à RIBF », série de trois campagnes de mesures spectroscopiques, réalisées avec les faisceaux fournis par RIBF à Riken, <http://www.nishina.riken.jp/collaboration/SUNFLOWER/experiment/seastar/index.html>

# Les évolutions de Micromegas : segmenté, résistif, bulk et hybride

Par Damien Neyret et Sébastien Procureur, pour les équipes projets de l'Irfu

À la fin des années 2000, de nouveaux détecteurs Micromegas ont été développés pour fonctionner à très haut flux de particules, comme illustré ici par l'expérience Compass. Pour les rendre opérationnels dans de telles conditions, de nombreuses voies ont été explorées comme l'augmentation de la granularité (très haute densité de pixels dans la zone du faisceau), l'utilisation de pistes résistives ou encore l'association de Micromegas avec un autre détecteur à micro-structure, le GEM.

22

N° 97-98 -  $\mu\text{M}$  - 2018

## Des détecteurs Micromegas hybrides et pixellisés pour l'expérience Compass

En 2009, après une dizaine d'années de service dans l'expérience Compass (p. 10), il apparut que les détecteurs Micromegas n'étaient pas parfaitement adaptés à la nouvelle phase de l'expérience qui allait débiter à partir de 2014. Les nouvelles mesures de physique prévues allaient nécessiter des faisceaux de muons et de hadrons de grande intensité. Sous faisceau de hadrons, ces détecteurs fonctionnaient à la limite de leurs possibilités, avec des taux de décharges importants qui pouvait induire une inefficacité de détection et un vieillissement accéléré. Sous faisceau de muons, il était nécessaire de renforcer la reconstruction des traces des particules aux très petits angles de déviation, là où les détecteurs Micromegas étaient inactifs. Une nouvelle génération de ces détecteurs a alors été développée avec deux objectifs principaux : 1/ les rendre actifs dans leur partie centrale pour détecter les particules à très petits angles ; 2/ réduire l'impact des décharges sur leur fonctionnement afin de supporter des flux d'hadrons importants (voir encadré). Les premiers détecteurs de Compass étaient rendus inactifs en leur centre parce que le flux de signaux provenant des pistes de lecture y aurait été trop important. En effet, l'électronique de lecture ne peut pas distinguer deux signaux

trop rapprochés en temps, de l'ordre de la microseconde. Si le flux de signaux atteint l'ordre du MHz, certains sont perdus et l'efficacité de détection des particules devient trop faible. Les pistes de lecture dans la zone centrale ont ainsi été divisées en pixels rectangulaires (Figure 1) de quelques millimètres de longueur, chacun lu par une voie d'électronique afin de limiter le flux par voie. 1280 pixels de deux longueurs différentes couvrent ainsi une zone centrale de 5 cm de diamètre, assurant un flux de signaux suffisamment faible (inférieur à 200 kHz) pour conserver une très bonne efficacité de détection, supérieure à 95 %, dans cette zone.

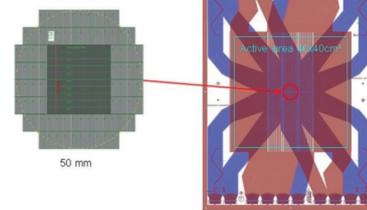


Figure 1. Schéma des pistes de lecture ainsi que de l'ensemble des pistes de liaison vers les connecteurs. La zone des pixels (schématisée à gauche) comporte 1280 pixels.

## Décharges électriques, « claquages » et résolution du problème en mode résistif

Le développement de claquages dans les Micromegas est souvent un facteur limitant dans des conditions extrêmes d'utilisation, notamment dans des flux très élevés de particules. Ces claquages sont généralement liés à une trop forte accumulation de charges dans l'espace d'amplification (typiquement une densité surfacique de quelques milliards d'électrons par  $\text{mm}^2$ ) et engendrent des chutes de gain ainsi qu'une possible dégradation du détecteur à long terme.

Le phénomène de décharge électrique dans un gaz est un problème très ancien, et de nombreux physiciens s'y sont intéressés, notamment F. Hauksbee, F. Paschen, J.S. Townsend, L. Loeb ou encore H. Raether. Dans le cas de Micromegas, il est rapidement apparu que ces décharges pouvaient affecter considérablement l'efficacité de détection, notamment en faisceaux d'hadrons. Les premières études systématiques sur Compass ont mis en évidence l'influence du mélange gazeux utilisé et du gain des détecteurs sur le taux de décharges, mais sans comprendre la cause réelle de cette « aversion » du Micromegas pour les hadrons. En 2007, des simulations ont montré que les taux d'hadrons dans les futurs Micromegas de Clas12 seraient bien supérieurs à ceux enregistrés sur Compass. Afin de quantifier le taux de décharge associé, des simulations (avec le code Geant4) ont été menées sur les dépôts d'énergie dans le détecteur. Il s'est avéré que des réactions nucléaires entre les hadrons incidents et les différents matériaux du détecteur provoquaient l'émission de particules très ionisantes susceptibles de créer un nombre de charges supérieur à la limite de Raether<sup>1</sup> ( $\sim 10^7$  électrons) et donc d'initier un processus de décharge. Ces simulations<sup>2</sup> se sont révélées quantitativement en bon accord avec les mesures effectuées sous faisceau pour Compass et Clas12. En prenant en compte la diffusion transverse des électrons dans le gaz et en réinterprétant la limite de Raether comme une densité critique de charges, ces simulations ont également permis de comprendre, là aussi quantitativement, la réduction du taux de décharge observé dans un détecteur hybride en combinant un Micromegas avec une feuille de GEM.

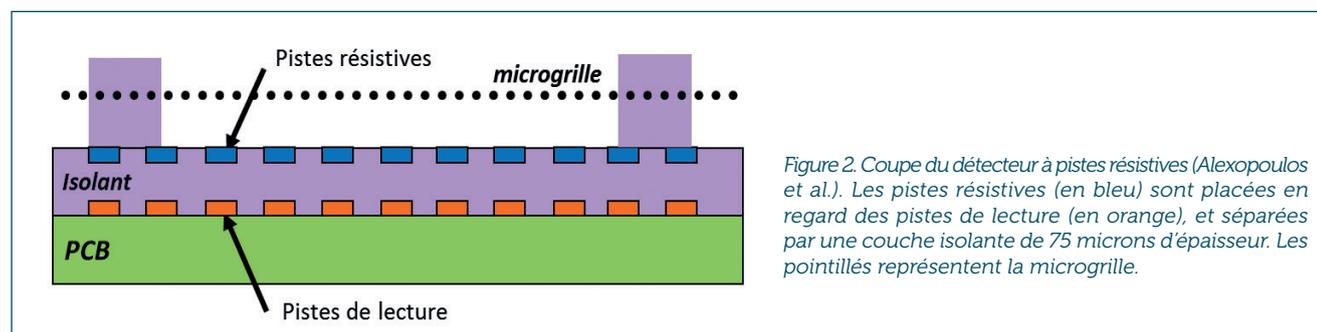
<sup>1</sup> Limite de Raether : limite phénoménologique du flux de particules chargées entre électrodes, sans claquages, elle correspond à la valeur maximale de la multiplication dans une avalanche d'électrons.

<sup>2</sup> S. Procureur et al., *Origin and simulations of sparks in MPGD*, JINST 7, C06009 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/06/C06009>

S. Procureur, S. Aune, J. Ball, Y. Bedfer, M. Boyer, H. Colas, A. Giganon, P. Konczykowski, F. Kunne, C. Lahonde-Hamdoun, N. Makke, C. Marchand, O. Meunier, A. Morreale, B. Moreno, H. Moutarde, D. Neyret, S. Platchkov, F. Sabatié, *Discharge studies in micromegas detectors in a 150 GeV/c pion beam*, NIM A Vol. 659 (2011), pp. 91-97, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.08.033>

## Des décharges dans les Micromegas

L'impact des décharges sur le fonctionnement des détecteurs Micromegas est une problématique étudiée depuis plusieurs années à l'Irfu et dans d'autres laboratoires. Les technologies connues pour réduire cet effet étaient fondées sur l'utilisation de couches de matériaux résistifs sur le plan de lecture. L'un des premiers développements prometteurs a été l'ajout de pistes résistives (Figure 2) entre les pistes de lecture et la microgrille. La présence de ces pistes permet d'éteindre très rapidement la formation du claquage et d'évacuer les charges vers la masse. Cet effet de protection a été vérifié lors de tests en faisceaux intenses d'hadrons, au cours desquels aucune dégradation de l'amplification n'a été observée dans le détecteur.



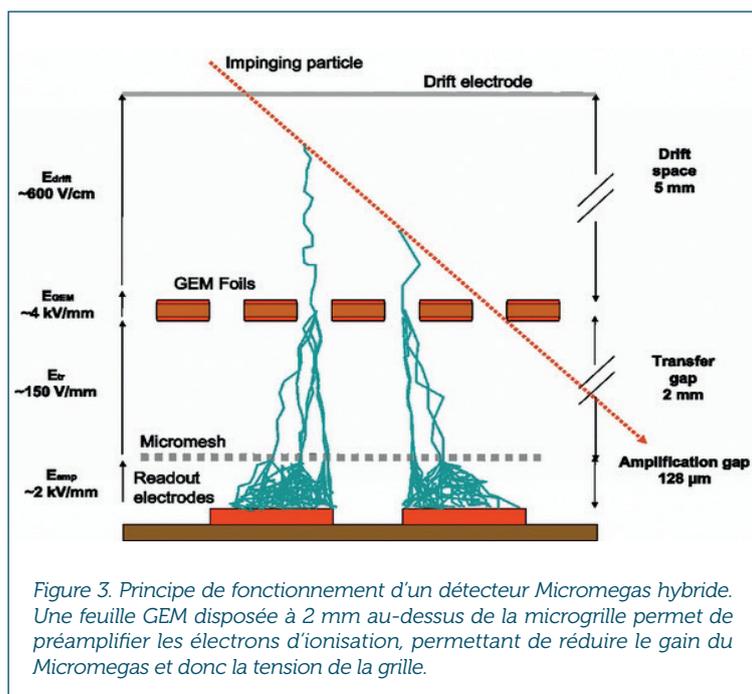
## Détection hybride, mariage heureux : microgrille et GEM

Ces technologies de couches résistives étaient surtout adaptées à des pistes de lectures, beaucoup moins à des pixels. Nous avons alors adopté une solution originale hybride (Figure 3) en insérant, deux millimètres au-dessus de la microgrille d'un Micromegas non-résistif, une feuille GEM de pré-amplification des électrons primaires. La photo du bandeau p.23, à gauche, montre un détecteur hybride en cours de montage, avec la mise en place de la feuille GEM. Cette feuille, formée d'une couche de 50  $\mu\text{m}$  de polyimide<sup>3</sup> recouverte de 2  $\mu\text{m}$  de cuivre sur ses deux faces, est percée de trous de 70  $\mu\text{m}$  de diamètre régulièrement espacés. Cette structure de la feuille GEM est visible sur la photo du bandeau p.23, au centre, avec le schéma des lignes de champ, à droite. En appliquant une tension d'environ 300 V entre les deux faces en cuivre, ceux-ci sont amplifiés dans les trous avec un gain global de 10 à 20. Cette pré-amplification permet de diminuer le gain et donc la tension électrique de la microgrille, réduisant ainsi la probabilité de décharge des détecteurs hybrides d'un facteur 10 à 100 par rapport à un Micromegas au même gain.

Une collaboration entre l'Irfu et une entreprise spécialisée dans la production de circuits imprimés, la société Elvia (située à Coutances), a été lancée pour transférer à l'industriel la technologie *bulk* utilisée dans ces détecteurs, afin de fabriquer l'ensemble des planchers des 12 détecteurs nécessaires à l'expérience.

Cette collaboration a abouti à une production en série des détecteurs<sup>4</sup>, qui ont été installés dans le spectromètre de Compass en avril 2015, à temps pour les prises de données débutant en mai.

Lors des mesures, les détecteurs ont fonctionné avec des performances conformes au cahier des charges, avec une efficacité de détection supérieure à 96 % à haut flux, une résolution spatiale de l'ordre de 70  $\mu\text{m}$  et une résolution temporelle de 10 ns.



Pour en savoir plus, voir la page Web du projet : [http://irfu.cea.fr/Phocea/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast\\_sstechnique.php?id\\_ast=3415](http://irfu.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_sstechnique.php?id_ast=3415)

<sup>3</sup> polyimide : une matière plastique résistante à la chaleur et aux champs électriques.

<sup>4</sup> Photographie du bandeau p.22, à droite : les détecteurs au Cern, installés sur leur cadre de support. Ils sont disposés suivant différentes orientations pour mesurer les points de passage des particules dans les trois dimensions.

# Le développement de puces électroniques

## Les plans de lecture InGrid (Timepix)

Par David Attié, pour les équipes\* projets Irfu

24

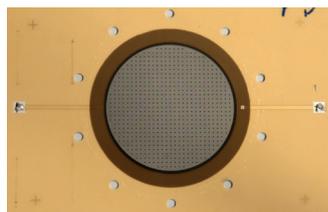
N° 97-98 -  $\mu$ M - 2018

L'utilisation des pixels dans les détecteurs Micromegas a débuté en 2005 avec l'association d'une grille simplement posée sur une puce Medipix2 [1] conçue par la collaboration Medipix [2] pour des applications dans le domaine médical, en radiographie et en tomographie assistée par ordinateur<sup>1</sup> où les rayons X sont utilisés pour sonder le corps humain. Comme les puces Medipix détectent et comptent les photons arrivant sur l'un des pixels de la surface active, cette technologie a été appliquée pour accroître les capacités de restitution des images par les techniques de tomographie en rayons X, ainsi que pour les systèmes de mammographie et de radiographie (en bêta et gamma) d'échantillons biologiques. Avec les nouvelles puces développées pour effectuer une mesure des énergies et des traces des photons (puces de type Medipix3) les différents niveaux d'énergie des photons sont indiqués par des images fournies en couleur. Cette technique d'imagerie « en couleur », pour les mesures en rayons X, offre aux médecins des images plus précises de leurs patients, ce qui peut faciliter le diagnostic.

### La nouvelle architecture Piggyback

Pour assurer une protection contre les décharges de l'électronique en maintenant les performances de haut gain et de résolution en énergie, une technique consiste à fabriquer une anode à partir d'une couche résistive sur un substrat mince en céramique. La couche résistive est déposée sur ce substrat mince de céramique par un procédé qui assure une dynamique élevée pour les gammes de résistivité ( $10^6$  à  $10^{10}$  M $\Omega$  par carré). La particularité de cette structure est que la partie active est entièrement dissociée de l'élément de lecture. Cela donne une plus grande flexibilité pour la conception du schéma de la structure de l'anode et de celui de l'électronique de lecture. Le signal est transmis sans perte significative par couplage capacitif vers les pads de lecture.

Ce montage peut être combiné avec les dispositifs de cartes d'électronique pixellisée Asic<sup>9</sup>. Le schéma de lecture est organisé indépendamment du dessin d'ensemble des pixels, de leur disposition et de leurs connexions. Comme cette structure de détection peut être montée à l'arrière de n'importe quel plan de lecture, elle a été nommée « *Piggyback Micromegas* » [5]. Cette architecture Piggyback a été employée avec les nouvelles puces de lecture du type Medipix2. L'une de ses applications concerne la polarimétrie de rayons X, notamment dans le domaine spatial. Piggyback a été utilisée avec la puce Caliste [6].



Détecteur Piggyback (en mode scellé) employé pour les tests. Le diamètre de la zone active est de 6 cm.

Une collaboration Timepix (Cern, Nikhef, Saclay) s'est formée à cette époque pour l'élaboration d'une puce dérivée de Medipix2 ajoutant ainsi la possibilité d'avoir les informations sur le temps d'arrivée des radiations sur chaque pixel ainsi que sur la charge des électrons. La puce Timepix [3], tout comme la puce Medipix, est une matrice de  $256 \times 256$  pixels de  $55 \mu\text{m}^2$  couvrant une surface active de  $1,4 \times 1,4 \text{ cm}^2$ . Chaque pixel est composé d'un préamplificateur, d'un filtre de mise en forme et d'un compteur fonctionnant jusqu'à une fréquence de 100 MHz.

L'équipe de l'Irfu a participé aux discussions lors de la conception de cette puce, puis à la R&D sur les couches résistives pour sa protection aux claquages lors des opérations avec Micromegas et finalement à la mise en œuvre des post-traitements sur silicium visant à intégrer un détecteur Micromegas directement sur la puce. Cette technologie, appelée *InGrid* pour *Integrated Grid* [4], grille intégrée, est représentée sur l'image du bandeau, où l'on voit le détecteur Micromegas sur une puce Timepix. La couche résistive de protection utilisée dorénavant consiste au dépôt d'une dizaine de microns de nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) sur les pixels avant l'édification de l'*InGrid*. Les piliers (entre les pixels) et les trous de la grille (alignés sur les pixels) sont construits à l'aide de techniques photolithographiques sur silicium. La grille d'une épaisseur d'environ  $1 \mu\text{m}$  est constituée d'un dépôt d'aluminium par pulvérisation cathodique (*sputtering*) comme pour la couche de protection. Lors des phases de R&D des puces, des architectures spécifiques ont été développées pour protéger l'électronique pixellisée contre les décharges, notamment *Piggyback* (voir l'encadré) adaptée pour la puce Medipix2. Un tel dispositif permet de fournir l'image en trois dimensions de chaque électron primaire issu de l'ionisation des molécules du gaz par la particule chargée le traversant. La figure 1 illustre les traces de deux électrons issus d'une source de strontium-90 dérivant dans le gaz et soumis à un champ électrique et magnétique.

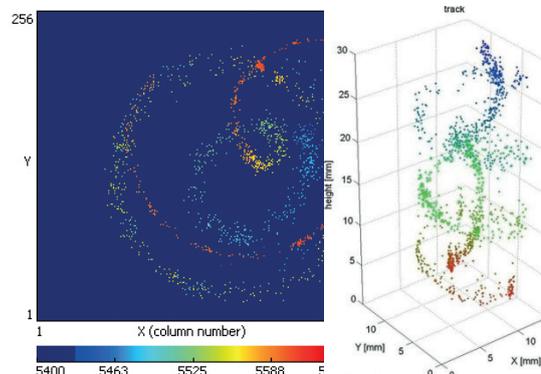
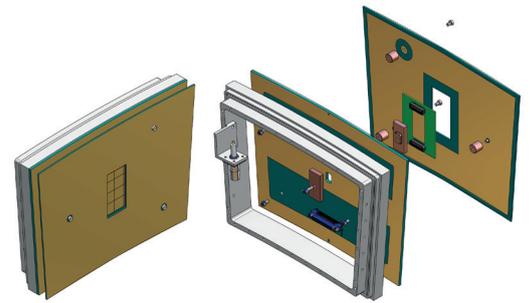
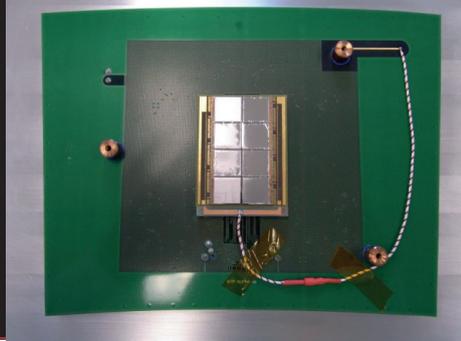
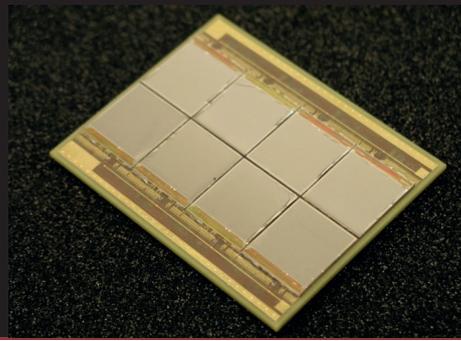


Figure 1. Traces en forme d'hélice d'électrons issus d'une source de  $^{90}\text{Sr}$  dérivant dans le volume de gaz sous un champ électrique et magnétique ; en haut, les données enregistrées en mode « temps » ; en bas, la reconstruction en trois dimensions.

<sup>1</sup> La tomographie informatisée, assistée par ordinateur (notée TDM) est une technique qui combine les mesures en rayons X et les ordinateurs pour produire des images en coupe du corps humain, ou d'échantillons biologiques. On la nomme en anglais *computed tomography* (CT). Elle est aussi désignée par le terme de tomodynamométrie.



En 2010, l'Irfu a réalisé une matrice de 2x4 puces Timepix avec *InGrid* nommée *Octopuce*. Le bandeau (p.25) présente : à gauche une photo d'*Octopuce*, au centre, la matrice implantée et connectée sur le cadre pour un prototype de grande chambre à projection temporelle TPC<sup>9</sup>; à droite, le schéma d'assemblage de la carte-mère et de la carte mezzanine<sup>2</sup>. Ce dispositif offre une surface de détection de 2,8 × 5,6 cm<sup>2</sup>. Cette même année, ce plan de lecture (inédit pour une TPC comprenant plus de 520 000 pixels) a pris pour la première fois des mesures en utilisant le faisceau d'électrons de 6 GeV fourni par le synchrotron allemand de DESY à Hambourg. Les données enregistrées correspondent aux traces du faisceau vues par *Octopuce* (Fig. 2). Chaque point de l'image correspond à un électron issu de l'ionisation des atomes du gaz lors du passage de l'électron de haute énergie provenant du faisceau. On constate que la densité de l'ionisation le long de la trace n'est pas uniforme. De petits nuages d'électrons se forment par paquets plus denses.

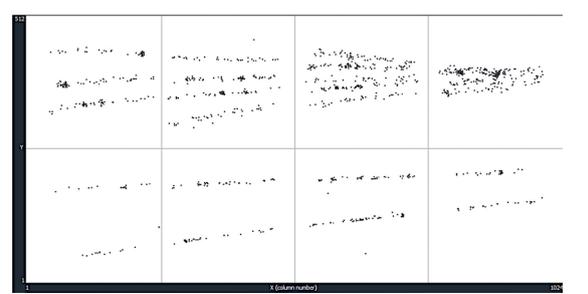


Figure 2. Traces issues du faisceau d'électrons de 6 GeV, enregistrées par l'*Octopuce* à DESY.

Depuis, un effort d'industrialisation des *InGrid* a permis la réalisation d'un plan de lecture de 160 systèmes Timepix et *InGrid* (20 octobords), soit plus de 10 millions de pixels avec la résolution à l'électron unique. Ce dispositif a été mis en opération en 2015 par l'Université de Bonn à DESY et en 2017 à PHIL (LAL). La figure 3 présente un événement en présence d'un champ magnétique d'un tesla : on y voit les hélices de plusieurs particules de faible énergie et de charges positive et négative.

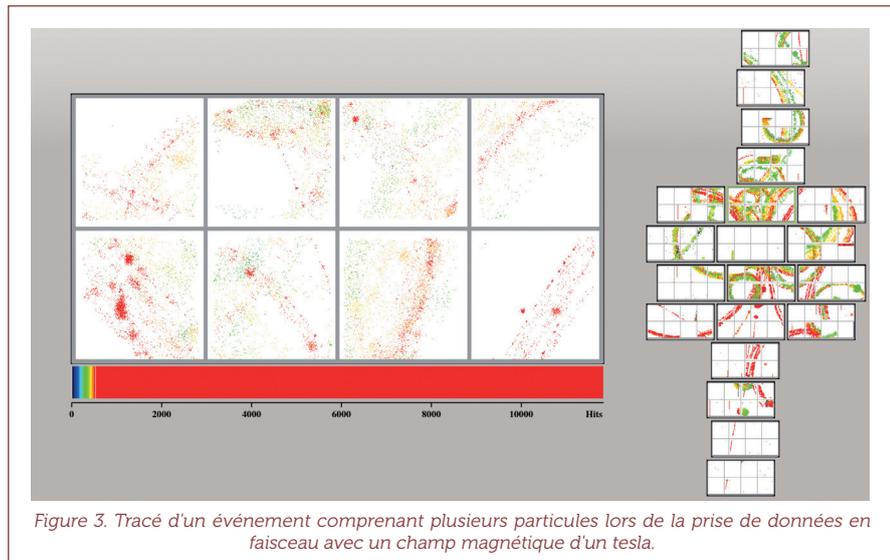
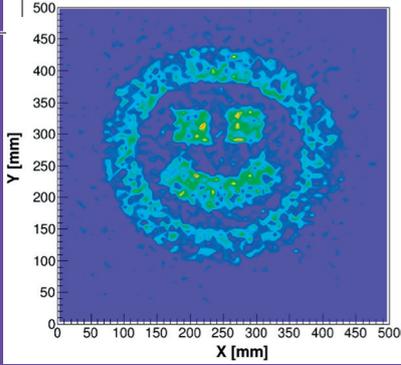


Figure 3. Tracé d'un événement comprenant plusieurs particules lors de la prise de données en faisceau avec un champ magnétique d'un tesla.

#### Références :

- [1] *The detection of single electrons using a Micromegas gas amplification and a MediPix2 CMOS pixel readout*, A. Fornaini, M. Campbell, M. Chefdeville, P. Colas, A.P. Colijn, H. van der Graaf, Y. Giomataris, E.H.M. Heijne, P. Kluit, X. Llopart, J. Schmitz, J. Timmermans, J.L. Visschers, NIM A 546 (2005) 270–273. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.03.029>
  - [2] <https://medipix.web.cern.ch/medipix>
  - [3] *Timepix, a 65k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements*, X. Llopart, R. Ballbriga, M. Campbell, L. Tlustos, W. Wong, NIM A 581 (2007) 485–494. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.08.079>
  - [4] *An electron-multiplying 'Micromegas' grid made in silicon wafer post-processing technology*, M. Chefdeville, P. Colas, Y. Giomataris, H. van der Graaf, E.H.M. Heijne, S. van der Putten, C. Salm, J. Schmitz, S. Smits, J. Timmermans, J. L. Visschers, NIM A 556 (2006) 490–494. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.11.065>
  - [5] *A Piggyback resistive Micromegas*, D Attié, A. Chaus, D. Durand, D. Desforge, E. Ferrer-Ribas, J Galán, I. Giomataris, A. Gongadze, F. J. Iguazu, F. Jeanneau, R. de Oliveira, T. Papaevangelou, A. Peyaud et A. Teixeira, JINST 8 P05019 (2013). <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/8/11/C11007/pdf>
  - [6] D. Attié, C. Blondel, L. Boilevin-Kayl, D. Desforges, E. Ferrer-Ribas, I. Giomataris, O. Gevin, F. Jeanneau, O. Limousin, A. Meuris, T. Papaevangelou, A. Peyaud, NIM A 787 (2015) 312–314. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.01.007>
- Voir aussi : *Caliste-MM: Polarimetric measurements at the Soleil facility*, P. Serrano, P. Da Silva, E. Ferrer-Ribas, O. Limousin, P. Mercere, F. Orsini, NIM A (2017) <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.079>
- \* *Les équipes Piggyback (P) et Timepix (T) de l'Irfu* : D. Attié (P,T) , P. Colas (P,T) , X. Coppolani (T) , I. Giomataris (P) , F. Jeanneau (P) , E. Ferrer-Ribas (P) , Th. Papaevangelou (P) , A. Peyaud (P) , M. Titov (T).

<sup>2</sup> Carte mezzanine : carte d'électronique montée en parallèle de la carte-mère. Elle comporte les puces et les fonctions de charges programmables, ce qui facilite la connexion des fils.



# Sortez l'appareil muo !

Par Sébastien Procureur  
pour l'équipe\* des muographes de l'Irfu



L'aventure de Micromegas a croisé celle de la muographie à l'Irfu. Cette rencontre est le fruit du hasard, presque un accident, et apparaît cinq ans plus tard comme une nécessaire évidence. L'histoire de cette relation illustre aussi de manière remarquable le potentiel de développement et d'innovation de l'Institut grâce à la parfaite complémentarité des profils, notamment dans les services techniques.

Nous sommes fin 2011, au labo Clas12 du Dédip<sup>9</sup>. L'équipe travaille à la réalisation d'un grand banc de test cosmique très précis pour les détecteurs courbes destinés au JLab. Un rapide calcul nous indique qu'un tel banc nécessite plus de 6000 voies d'électronique – que nous n'avons pas – uniquement pour les détecteurs de référence. Stephan Aune a alors l'idée de créer des Micromegas double face, avec d'un côté 32 pistes larges pour localiser grossièrement les particules, et de l'autre un peigne de 32 x 32 pistes fines pour affiner la position. Et voilà 50 x 50 cm<sup>2</sup> de détection avec l'équivalent de 1024 pistes, mais un seul connecteur de 64 voies ! Avec le doigté de notre regretté collègue, Marc Anfreville, six détecteurs voient bientôt le jour. Mais le concept pose quelques problèmes : ambiguïté de localisation pour les traces à grand angle ou les multi-traces, sans compter la difficulté de fabriquer à chaque fois deux *bulks*<sup>9</sup> fonctionnels sur le même support PCB<sup>9</sup>. Avec l'aide de Raphaël Dupré, nous résolvons ces problèmes en août 2012 via un nouveau système de multiplexage breveté (*[B14B]*, p.31), dit génétique, utilisant le fait qu'une particule laisse un signal sur plusieurs pistes adjacentes. La connectique est subtile (Fig. 1), mais une seule face suffit, et le multiplexage s'adapte au flux de particules.

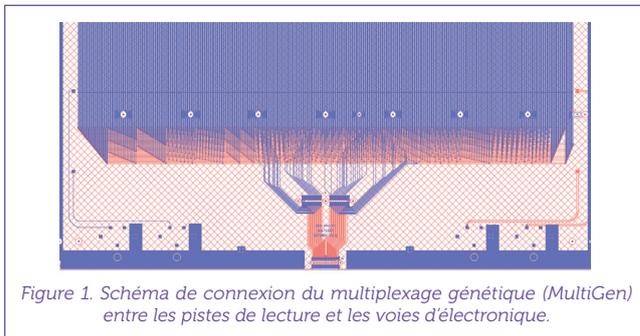


Figure 1. Schéma de connexion du multiplexage génétique (MultiGen) entre les pistes de lecture et les voies d'électronique.

Le détecteur « MultiGen 1D » est né, suivi en 2014 du MultiGen 2D avec un film résistif autorisant une détection bidirectionnelle sur un seul plancher. Ne manque plus qu'une électronique de rêve (*Dream*<sup>9</sup>), et l'ensemble affiche une efficacité en 2D de 97 % malgré une capacité électrique de 2 nF (8,5 m de pistes auxquels s'ajoutent 2 m de limandes). Ce qui n'était au début qu'une astuce de laboratoire devient bientôt un projet qui se décline en plusieurs instruments. En *muographie par déviation* (voir l'encadré), nous commençons avec David Attié la fabrication d'un grand imageur d'un mètre carré, *M-Cube*.

Compte tenu du nombre de détecteurs à produire, il devient essentiel de transférer le savoir-faire de fabrication à un industriel. Le chemin est long, mais en 2015, la société Elvia livre ses premiers MultiGen 2D fonctionnels, et plus d'une vingtaine seront réalisés en 2016 (Fig. 2).



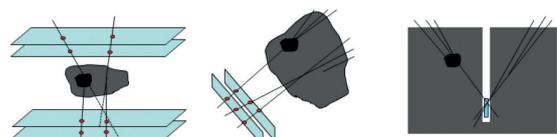
Figure 2. Un panneau de l'imageur M-Cube tenu par David Attié et Sébastien Procureur.

En parallèle, des simulations montrent que ces détecteurs sont suffisamment précis pour reconstruire la forme d'objets denses – comme des briques de plomb – en seulement 20 minutes. Nous proposons alors le dispositif « *TomoMu* », le premier tomographe à muons portable et interactif, équipé de quatre MultiGen. Destiné à la vulgarisation scientifique, sa grande précision est illustrée sur l'image du bandeau (p.26, à gauche), baptisée « Muona Lisa » et obtenue avec un assemblage de briques de plomb. *TomoMu* officie désormais au Dédip<sup>9</sup> lors des visites organisées dans nos laboratoires, en démonstration durant les journées de la fête de la Science ou encore pour des travaux d'étudiants.

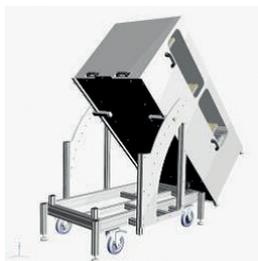
La robustesse des détecteurs nous encourage également à développer un *télescope à muons*, à l'instar des télescopes utilisés notamment en volcanologie. Mais l'extérieur est un milieu hostile pour un détecteur habitué à l'ambiance feutrée des halls expérimentaux. En 2015, nous installons donc un prototype de télescope, *WatTo* (*Water Tower*) au pied du château d'eau de Saclay. Son fonctionnement est assuré par un petit bac à cartes contenant l'électronique frontale, un nano-ordinateur pour l'acquisition, un disque dur pour le stockage des données, et une carte « maison » pour le pilotage des hautes tensions via des modules miniatures alimentés en 12 V. Une batterie de camion et un régulateur complètent le dispositif qui ne consomme pas plus qu'une ampoule basse consommation (35 W).

## Les muons et la muographie

Les muons sont des particules élémentaires, cousins lourds et instables de l'électron (famille des leptons). Ils sont notamment produits de manière naturelle par l'interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère terrestre. Le flux de muons au niveau du sol est relativement faible, de l'ordre de 150 par mètre carré et par seconde. Contrairement à beaucoup d'autres particules, les muons sont très pénétrants, environ la moitié du flux issu du rayonnement cosmique peut traverser un mur de béton de cinq mètres d'épaisseur. Mesurer leur *transmission* dans un objet permet ainsi de déterminer la densité du matériau : plus le nombre de muons le traversant est élevé, plus la densité est faible dans la direction considérée. C'est le principe de la *muographie* qui permet de sonder l'intérieur d'une structure, là où la photographie ne voit que son aspect superficiel. En revanche, et compte tenu du flux limité de muons, les temps de pose en muographie sont beaucoup plus longs, de quelques jours à quelques mois selon la structure étudiée. Pour les objets plus petits, il est possible de diminuer largement le temps de pose en utilisant la *déviation* des muons au lieu de leur *transmission*. Il faut alors placer des détecteurs de chaque côté de l'objet pour reconstruire la trajectoire des muons en amont et en aval. Cette méthode permet de remonter à la densité en 3D de l'objet, on parle alors plutôt de *tomographie muonique*. La tomographie muonique [1] peut être appliquée comme technique de sondage non destructif dans des domaines variés : archéologie, volcanologie, génie civil, étude du démantèlement de réacteurs nucléaires...



La muographie : technique par déviation (schéma à gauche) pour les images en 3D, et mesures par transmission (au milieu et à droite) pour la reconstruction 2D. Les zones de plus fortes densités (qui dévient et absorbent donc plus les muons) sont en noir au sein des objets en gris.



WatTo (2015)



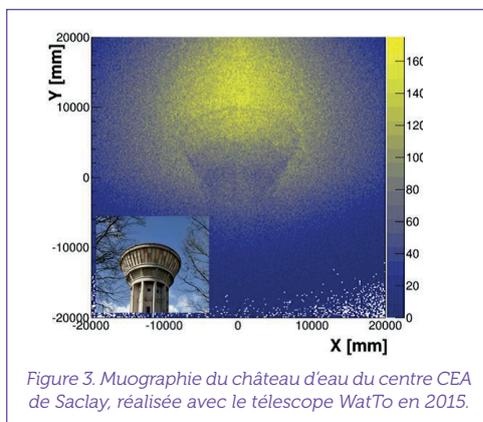
TomoMu (2015-)



M-Cube (2016-2017)



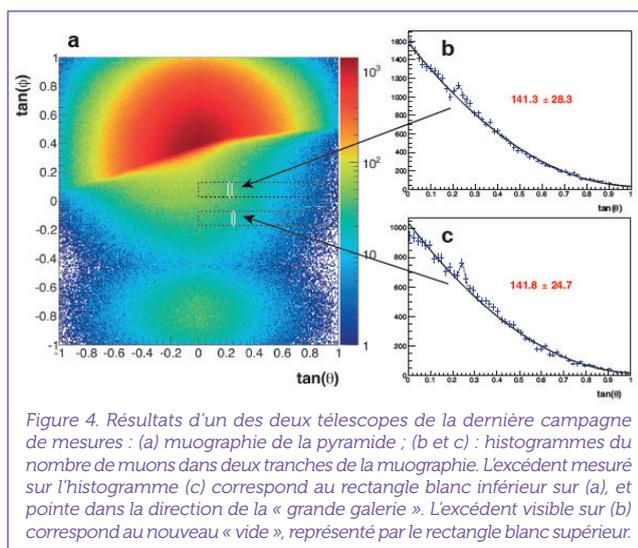
ScanPyramids (2016-)



Pendant plus de trois mois, branché sur le secteur puis sur panneaux solaires, le télescope réalise plusieurs muographies statiques et dynamiques du monument. Rien n'épargne le télescope : problème de masse et de blindage, bruit cohérent affectant l'auto-déclenchement de l'électronique, variations de gain dues aux changements de température et de pression, humidité, ensoleillement intermittent, badauds, tempêtes... En particulier, il apparaît nécessaire de l'équiper de sondes de température et de pression pour ajuster en direct les hautes tensions et compenser ainsi les variations de gain. Un premier système de rétroaction (asservissement électronique) sera d'ailleurs mis en place par Simon Bouteille pendant les campagnes de mesure. Au final, le principal enseignement de cette campagne est qu'un télescope à Micromegas peut fonctionner en extérieur. Et les images obtenues confirment le potentiel du télescope, avec des résolutions 20 fois meilleures que les télescopes à scintillateurs classiques (Fig. 3). Par le plus grand des hasards, la fin de l'expérience WatTo coïncide avec le lancement en Egypte de la mission ScanPyramids<sup>1</sup>, dont le but est de sonder quatre pyramides de la 4<sup>e</sup> dynastie, notamment celle de Kheops. Coordonnée par l'institut HIP<sup>2</sup> sous l'autorité du ministère des antiquités égyptiennes, cette mission propose en particulier d'utiliser la muographie pour accéder aux zones les plus profondes des pyramides. Les images du château d'eau sont convaincantes et au début de 2016, nous obtenons l'autorisation d'installer trois télescopes à muons autour de la pyramide de Kheops.

Plusieurs changements significatifs sont apportés à ces instruments : meilleur blindage électromagnétique et thermique, mécanique allégée, asservissement de l'électronique plus précis, fonctionnement sur clé 3G, analyse des données en ligne avant le transfert sur le réseau. L'objectif technique est de valider dans les conditions les plus extrêmes le fonctionnement autonome d'un télescope à Micromegas, et son contrôle à distance depuis Saclay. Grâce à l'implication forte d'Elvia qui a fabriqué six détecteurs en moins de deux mois, les trois télescopes sont envoyés en Egypte et déployés en juin 2016 autour de l'arête Nord-Est de la pyramide. Objectif : démontrer leur performance en imagerie en détectant une cavité connue de 3 m de long, située dans 20 m de roches et à une distance de 150 m des télescopes !

Et ça fonctionne : deux mois et demi et 70 millions d'événements analysés plus tard, la cavité est détectée avec un seuil supérieur à 5 sigmas (on enregistre durant ces mesures un excédent d'un muon par jour par rapport à une zone sans cavité). Une seconde cavité, celle-ci inconnue, est par ailleurs identifiée un peu plus haut le long de l'arête. En 2017, les résultats des instruments japonais de l'Université de Nagoya, situés dans la Chambre de la Reine, révèlent la présence d'un grand vide au-dessus de la grande galerie. Une campagne de mesures dédiées est alors mise en place pour confirmer la présence de ce vide et préciser sa position. Les instruments japonais, beaucoup plus proches, obtiennent une image précise de ce vide de forme allongée. Mais les prises de vue très rapprochées rendent difficile une triangulation précise. Malgré leur grande distance et leur angle d'observation très défavorable depuis l'extérieur, deux télescopes du CEA parviennent à détecter, non seulement la grande galerie, mais également ce vide nommé « ScanPyramids Big Void ». Les résultats sont résumés sur la figure 4. Cette détection permet une triangulation plus précise du vide. Elle constitue au passage la toute première détection d'une cavité aussi profonde d'une pyramide depuis l'extérieur, et ouvre ainsi de nombreuses perspectives en archéologie. Les analyses de la campagne ont été publiées dans la revue Nature [2].



Au-delà de l'imagerie d'un château d'eau ou d'une pyramide, les retombées médiatiques de ces activités ont suscité l'intérêt de plusieurs industriels. Pour répondre à cette demande croissante, deux télescopes supplémentaires de 1 m<sup>2</sup> vont être réalisés dans le cadre du projet Mimosa<sup>3</sup>. Des discussions sont menées, en vue de commercialiser ces instruments, notamment pour des études dans le domaine du génie civil.

#### Références :

- [1] S. Procureur, *Muon imaging: Principles, technologies and applications*, NIM A 878, pp. 169-179 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.08.004>
- [2] K. Morishima et al., *Nature* 552, pp. 386-390 (2017) (publication cosignée par l'équipe ScanPyramids de l'Irfu). <https://doi.org/10.1038/nature24647>

\* L'équipe de l'Irfu. Sur la photo du bandeau p.26, on voit l'équipe au pied de la pyramide et à côté de l'installation de détection (le télescope à muons situé sous la tente). De gauche à droite : Patrick Magnier, Simon Bouteille, Mehdi Tayoubi, David Attié, Marc Riallot, Sébastien Procureur, Irakli Mandjavidze. L'équipe de muographie est également composée de : Denis Calvet, Xavier Coppolani, Hector Gomez et Mariam Kebbiri.

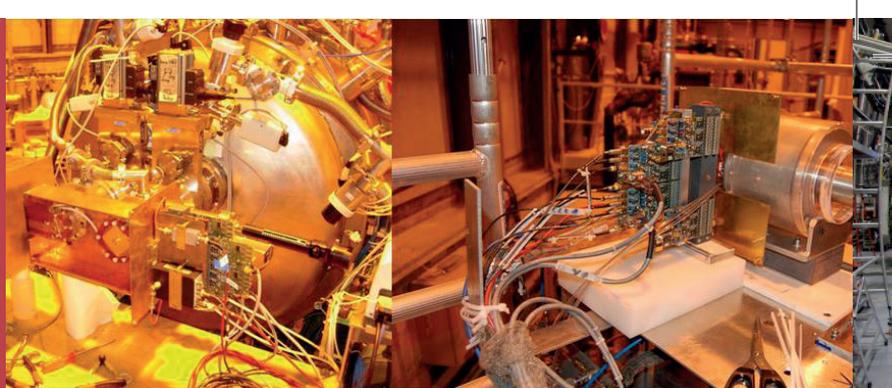
<sup>1</sup> La mission ScanPyramids a pour objectif de scanner plusieurs grandes pyramides d'Egypte : <http://www.scanpyramids.org/?lang=fr>  
Les communiqués du CEA : <http://www.cea.fr/Pages/actualites/sciences-de-la-matiere/Le-CEA-route-pour-resoudre-mystere-pyramides-Egypte.aspx>

<sup>2</sup> L'institut de conservation du patrimoine, Heritage Innovative Preservation HIP, <http://www.hip.institute>

<sup>3</sup> Le projet Mimosa (2017-2020, porté par David Attié) consiste à créer une Maison de la muographie en Île-de-France. Cette plateforme, unique au monde, a pour but de concevoir, de réaliser et de mettre à disposition de la société des systèmes d'imagerie pénétrante pour l'imagerie ou la métrologie d'édifices et d'objets massifs.

# À la chasse aux événements rares : Micromegas passe à « l'axion »

Par Esther Ferrer Ribas pour l'équipe\*  
Cast et Iaxo de l'Irfu



28

N° 97-98 -  $\mu\text{M}$  - 2018

À quoi reconnaît-on une expérience dédiée à la détection d'événements rares ? Il s'agit d'une expérience de très haute sensibilité, capable de détecter des événements de très basse énergie (entre 1 et 10 keV) se produisant avec une probabilité très basse (par exemple de l'ordre de quelques événements par mois...). Il faut s'assurer que ces événements rares donnent un signal différent de celui issu de la radioactivité naturelle ou d'un rayonnement cosmique. Ainsi une telle expérience repose sur toute une série de stratégies : d'abord, sélectionner des matériaux d'une très grande radiopureté<sup>1</sup>, comme le cuivre, le kapton, le plexiglas... Ensuite, utiliser des blindages pour minimiser la contribution par la radioactivité ambiante et le rayonnement cosmique; souvent ces expériences sont réalisées en site souterrain, tirant profit du blindage naturel constitué par la roche environnante. Enfin, développer et optimiser des systèmes de détection capables de différencier finement les événements des signaux d'intérêt de ceux du bruit de fond.

À ce titre, les détecteurs gazeux constituent une option particulièrement intéressante, parce que la forme de la trace laissée par les particules de l'événement dans le gaz est très riche en informations sur le type de particules. De plus, dans les détecteurs gazeux, on peut utiliser des plans de lecture à pixellisation fine (400-500  $\mu\text{m}$ ) permettant une très bonne distinction entre la forme des signaux des particules et le bruit de fond, donc un très bon rapport signal sur bruit. Les MPGD<sup>2</sup> sont d'excellents candidats, à la fois simples et robustes, pour la détection d'événements rares. Pourquoi utiliser en particulier les détecteurs Micromegas ? Leurs avantages sont nombreux : leur excellente résolution en énergie (en moyenne de 20 % -largeur à mi-hauteur- à 5,9 keV pour les détecteurs de type *bulk*, et autour de 13 % pour ceux de type *Microbulk*), la très bonne stabilité et la bonne homogénéité en gain, ainsi que la possibilité de les fabriquer avec des matériaux d'une très grande radiopureté<sup>1</sup>, suivant un procédé de fabrication désormais parfaitement maîtrisé. La première application de l'utilisation des détecteurs Micromegas dans le domaine de la détection d'événements rares a été l'expérience Cast, *Cern Axion Solar Telescope*, dont l'objectif était la mise en évidence des axions solaires avec un télescope. Pour comprendre ce que sont les axions, il faut remonter à Gérard t'Hooft, prix Nobel de physique en 1999, qui a montré que la chromodynamique quantique ne devait pas traiter de la même façon un quark et un antiquark (violation de la symétrie charge-parité, CP). Cependant, cette violation n'a jamais été observée. Une solution à ce problème de non-violation de la symétrie CP, proposée en 1977 par Roberto Peccei et Helen Quinn, postule l'existence d'une nouvelle symétrie de la chromodynamique quantique, ce qui implique l'existence d'une nouvelle particule : l'axion. À ce jour, cette nouvelle particule, neutre, stable et de faible masse (entre quelques  $\mu\text{eV}/c^2$  et quelques  $\text{eV}/c^2$ ), n'a jamais été observée non plus. Si elle existe, elle devrait être produite au centre du Soleil, dans sa partie la plus chaude.

Pour détecter ces éventuels axions, la stratégie consiste à pointer le télescope Cast en direction du soleil, grâce à une plateforme orientable, l'«hélioscope», qui peut suivre la course du soleil une heure et demie, à l'aube, et au coucher. Le principe de la détection des axions repose sur l'effet Primakoff, selon lequel les axions peuvent se convertir en photons

(rayons X) lorsqu'ils sont soumis à un fort champ magnétique. Le télescope Cast est donc constitué d'un dipôle de fort champ pour optimiser cette conversion. *Les photos du bandeau p.29* montrent ce dipôle sur la plateforme. Le photon ainsi produit est émis exactement dans la trajectoire de l'axion qui lui transmet toute son énergie. Ce principe de détection avait été utilisé auparavant dans deux expériences dans les années 90, donnant les premières limites à la masse de ces particules. Cast repose sur le même concept : mesurer efficacement le photon émis suite à la transformation de l'axion dans un champ magnétique intense avec un détecteur ayant un très bas bruit de fond. Cast utilise pour cela un des prototypes de dipôles du LHC. Doté d'un champ magnétique très intense de neuf teslas, cet aimant est constitué de deux éléments cylindriques de 9,2 m de long au bout desquels sont disposés les systèmes destinés à détecter les rayons X issus des axions hypothétiques. On s'attend à mesurer au plus un événement toutes les 30 heures, suivant les modèles théoriques.

Au début des années 2000, Ioannis Giomataris a parié sur l'obtention d'un très bas bruit de fond avec la technologie Micromegas [1] (*cf p.4*). En 2002 un premier prototype Micromegas non blindé construit à base de matériaux radiopurs est installé avec deux autres types des détecteurs. Il s'agit d'une TPC<sup>3</sup> entourée d'un blindage passif et d'un dispositif CCD (*Charge Coupled Device*<sup>2</sup>). La première prise de données démarre en 2003, avec des résultats très encourageants sur la suppression du bruit de fond pour le détecteur Micromegas. L'équipe Micromegas de Cast décide alors en 2005 de faire un test de prise de données avec un premier blindage provisoire. Ce test montre l'excellent potentiel de cette technologie, ce qui amène la collaboration à remplacer la TPC vieillissante par deux détecteurs Micromegas (*le bandeau p.28* montre le dispositif).

Entretemps, les détecteurs Micromegas évoluent, et une nouvelle technologie voit le jour : il s'agit du *Microbulk* Micromegas, une technologie à base de kapton et de cuivre développée en collaboration avec l'équipe de Rui de Oliveira au Cern, permettant une excellente résolution en énergie tout en offrant un niveau de radiopureté inégalé. L'Irfu se lance alors, en collaboration avec l'Université de Saragosse, dans le développement de trois détecteurs Micromegas de type *Microbulk*, cette fois avec du blindage. En 2007, trois des quatre détecteurs X de Cast sont des détecteurs Micromegas. Grâce aux simulations et aux tests effectués dans le laboratoire souterrain de Canfranc en Espagne, le bruit de fond s'améliore constamment (*cf Fig. 1*, plus de deux ordres de grandeur en 10 ans !), en raffinant la couverture du blindage passif (cuivre et plomb) et en incluant un blindage actif de muons (avec des scintillateurs plastiques).

Dans la phase finale de recherche d'axions solaires, entre 2013 et 2015, la sensibilité de l'expérience a encore été largement améliorée. Ce bon résultat est dû à un nouveau détecteur Micromegas [2] dont la conception a bénéficié de notre bonne maîtrise des sources de bruits de fond, acquise tout au long de l'expérience. Ceci a conduit à un bruit de fond mesuré de l'ordre de  $10^{-6} \text{ keV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , le plus bas jamais mesuré dans l'expérience Cast (*Fig.1, points rouges, fin 2013*). Les résultats obtenus à partir des données de Cast, enregistrées entre 2014

<sup>1</sup> La radiopureté correspond à de faibles niveaux de radioactivité des échantillons considérés. On veut mesurer l'activité des éléments comme le  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  et le  $^{40}\text{K}$ . Avec des plans de lecture de type *Microbulk*, le maximum d'activité à mesurer pour ces matériaux radiopurs est inférieur à  $30 \mu\text{Bq}/\text{cm}^2$  pour Th et U et inférieur à  $60 \mu\text{Bq}/\text{cm}^2$  pour  $^{40}\text{K}$ .

<sup>2</sup> *Charged Coupled Device* dispositif à transfert de charge, qui assure la conversion d'un signal lumineux en un signal électrique.

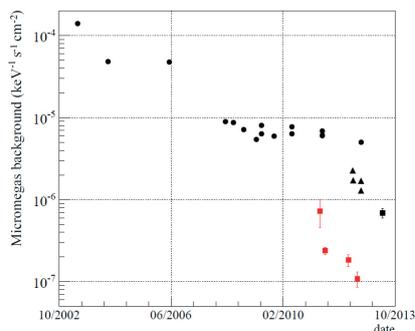


Figure 1. Evolution du bruit de fond mesuré dans le détecteur Micromegas de 2002 à 2013 (points noirs). Les points rouges montrent l'amélioration d'un facteur 100 sur la réduction du bruit de fond avec le nouveau détecteur, de 2010 à 2013.

et 2015, ont fait l'objet d'une publication dans *Nature Physics* en 2017 [3]. Si l'existence de l'axion n'a pas été confirmée à ce jour, l'expérience Cast a permis d'atteindre, grâce à la performance de ces détecteurs, la meilleure limite au monde sur la constante de couplage de cette particule (*autrement dit*, la probabilité de conversion entre *axion* et *photon*) pour toutes les masses possibles des axions sur l'intervalle couvert par Cast.

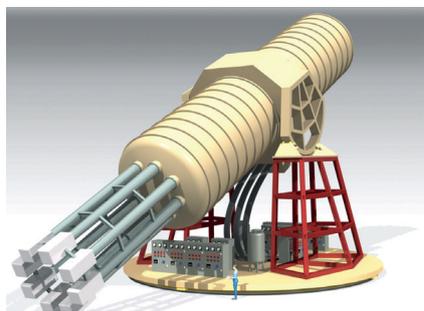


Figure 2. Vue d'ensemble du futur dispositif expérimental IAXO au Cern.

Pour aller plus loin encore, les équipes de Cast développent une nouvelle génération de détecteur : Iaxo (*International Axion Observatory*), optimisé pour les expériences de recherche des axions. Le dispositif (Fig. 2) comportera un nouvel aimant toroidal de 20 m de long, équipé de télescopes à rayons X pour concentrer le signal éventuel d'axions sur une toute petite surface, et enfin des détecteurs Micromegas<sup>3</sup> aux performances accrues. Le but de cette expérience est d'améliorer la sensibilité de quatre à cinq ordres de grandeur par rapport à l'expérience Cast, et, pourquoi pas, de détecter enfin ce fameux axion !

### Expérience à venir : PandaX-III, une expérience pour la désintégration en double bêta

Le dispositif expérimental de PandaX-III comportera une grande TPC, utilisant la technique Microbulk et développée à Saragosse. Ce dispositif expérimental fonctionnera avec un mélange de gaz à haute pression, condition nécessaire aux mesures de désintégration en double bêta. L'expérience PandaX-III se déroulera en plusieurs phases. Dans la première, il est prévu de construire une TPC avec 3,5 m<sup>2</sup> de détecteurs Microbulk, et quatre autres TPC sont prévues.

### Au-delà de Micromegas : une sphère pour rechercher la matière cachée de l'Univers, par Ioannis Giomataris

Pour interpréter les observations astrophysiques, il est nécessaire, dans certains modèles, de postuler l'existence de nouvelles particules. Ces particules massives correspondraient à la masse manquante de notre Univers, postulée dans les modèles au-delà du modèle standard (*cf. Scintillations n°95*). La détection de ces hypothétiques particules nommées Wimp<sup>9</sup> serait l'indice d'une nouvelle physique. Leurs caractéristiques ont été examinées dans le cadre de différents modèles, certains envisageant des particules très massives de 100 GeV. Dans des modèles alternatifs, elles pourraient être moins massives qu'anticipées, avec des masses entre 0,1 et 10 GeV. La recherche d'une telle matière noire légère nécessite une nouvelle technique de détection. C'est le but du projet NEWS-SNOLAB<sup>9</sup>, conçu par l'Irfu avec une collaboration internationale : construire un détecteur sphérique de 1,4 m de diamètre dans l'infrastructure souterraine de SNOLAB (2 km sous la surface) avec comme objectif d'obtenir une sensibilité bien meilleure que les autres expériences. L'idée est de développer un nouveau détecteur gazeux constitué d'une coque métallique et d'un senseur métallique (2 mm de diamètre) placé au centre de la sphère et porté à haute tension. Ce détecteur sphérique proportionnel (inventé par l'auteur !) pourra ainsi allier un grand volume de dérive à une amplification proportionnelle au niveau de la bille centrale servant de senseur. L'avalanche a lieu autour de la petite bille avec un champ inversement proportionnel au carré de la distance à la bille. La mise au point des senseurs et des prototypes est effectuée à Saclay dans les laboratoires de l'Irfu. L'accès à de grands volumes (donc de grandes masses), le très faible seuil en énergie inférieur au keV, la possibilité de différencier la position en fonction du rayon, la simplicité du détecteur en font un détecteur idéal pour les Wimp<sup>9</sup> de faible masse, inaccessibles à toutes les autres techniques.

À suivre dans la décennie 2020-2030 !

Pour en savoir plus : *Neutrino properties studied with a triton source and a large spherical TPC*, I. Giomataris, J. Vergados, NIM A 530 (2004) 330-338. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.04.223>

Références : [1] J.I. Collar et Y. Giomataris, *Possible low-background applications of Micromegas detector technology*, NIM A 471 (2001) 254–259. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)00986-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00986-X)

[2] I. G. Irastorza, E. Ferrer Ribas, T. Dafni, *Micromegas in the rare event searches*, Mod. Phys. Letters A28 (2013) 1340026.

<https://doi.org/10.1142/S0217732313400269>

[3] The CAST Collaboration, *New CAST limit on the axion–photon interaction*, Nature Physics vol. 13, pp. 584–590 (2017).

<https://doi.org/10.1038/nphys4109>

Pour en savoir plus, voir le site du Cern sur les expériences Cast : <http://cast.web.cern.ch/CAST> et Iaxo <http://iaxo.web.cern.ch/>.

\* L'équipe de l'Irfu ayant contribué à la R&D et aux tests des Micromegas : S. Aune, E. Ferrer-Ribas, I. Giomataris, Th. Papaevangelou.

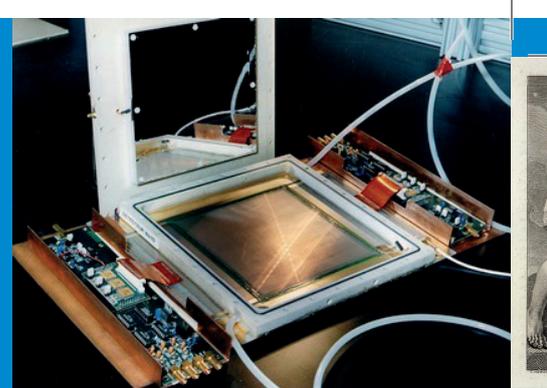
<sup>3</sup> D'autres technologies de détecteurs sont à l'étude : les CCD), les *Transition Edge Sensors* (TES) et les *Metallic Magnetic Calorimeters* (MMC).

Crédits photos : Cern (bandeaux p.28 et 29, collaborations Cast, Iaxo).

# Le glossaire de Micromegas

Dictionnaire des aventures à travers la planète

Expériences, sites d'accélérateurs, laboratoires, instituts, électronique, dispositifs



30

N° 97-98 -  $\mu\text{M}$  - 2018

**AGET** *Asic for GET, cf GET*, p. 16

**ASIC** *Application Specific Integrated Circuit*, circuits intégrés à usage (application) spécifique.

**ATLAS** *A Toroidal Large Apparatus*, grand détecteur toroidal du LHC pour les expériences de physique des particules

<https://home.cern/about/experiments/atlas> ; <http://atlas.cern> p. 14

**Bulk** la technologie *Bulk* « globale » ou massive permet un assemblage « tout en un » de la grille et du plan de lecture (plancher), la grille est encapsulée sur le PCB. Elle est développée notamment pour les grands systèmes dépassant quelques dizaines de cm. Les Micromegas « *microbulk* » ont eux aussi une structure assemblée avec une technologie plus précise adaptée aux petites dimensions. Le procédé permet une fabrication industrielle. p.12 [NIM06].

**CAST** *Cern Axion Solar Telescope*

<https://home.cern/fr/about/experiments/cast> ; <http://cast.web.cern.ch/CAST> p. 28-29

**CEBAF** *Continuous Electron Beam Accelerator Facility* au JLab p. 12

**CERN** Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (nom d'origine en 1952) ; devenu par la suite Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire. <https://home.cern/fr/about> Ce centre proche de Genève regroupe un ensemble d'installations (accélérateurs, aires expérimentales) pour les expériences de physique nucléaire et des particules : LHC, nTOF, SPS...

**CLAS** *CEBAF Large Acceptance Spectrometer* (voir CEBAF).

**CLAS12** « Clas - 12GeV » avec l'augmentation de l'énergie du faisceau d'électrons à 12 GeV. <http://www.jlab.org/Hall-B/clas12> p. 12

**CMS** *the Compact Muon Solenoid*, détecteur du LHC au Cern

<https://home.cern/about/experiments/cms> ; <http://cms.cern/>

**COMPASS** *Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy* au Cern <http://www.compass.cern.ch>

<https://home.cern/fr/about/experiments/compass> p. 10, p. 22-23

**DAPNIA** Département d'Astrophysique, de physique des Particules, de physique Nucléaire et d'Instrumentation Associée. Ce département du CEA-Saclay fut créé en 1992 et a existé sous ce nom jusqu'en 2008, avant d'être renommé Irfu.

**DAP** Département d'Astrophysique, ex Service SAP.

**Dedip** Département d'Électronique des Détecteurs et d'Informatique pour la Physique de l'Irfu, ex Sedi, ex-SED et SEI

**DIS** Département d'Ingénierie des systèmes.

**DPHn** Département de Physique Nucléaire, ex Service SPHn.

**DPHP** Département de Physique des Particules, ex Service SPP.

**Dream** *Dead timeless Readout Electronics Asic for Micromegas*.

Génération d'électronique ASIC développée par le Dédip.

**Dream**, laboratoire du Dédip : Détection temps Réel, Électronique d'Acquisition et Microélectronique.

**FALSTAFF** *Four Arm cLover for Fission Fragments*, système de détection prévu pour l'aire NFS au Ganil. p. 17

**GANIL** Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, à Caen, géré par le CEA et le CNRS. <https://www.ganil-spiral2.eu>

**Gap** espace ou intervalle d'amplification entre la grille (mesh) et le plan d'anode, de l'ordre de 100 à 500  $\mu\text{m}$ . cf p. 4-6

**GEM** *Gas Electron Multiplier*, autre technologie de détecteur que les Micromegas p. 10

**GET** *Generic Electronics for TPC*, électronique pour différents types de TPC. Le développement du projet ANR a été mené par l'Irfu.

**Hybride** détecteur associant un étage Micromegas avec une ou plusieurs feuilles de type GEM.

**IAXO** *International Axion Observatory* <http://iaxo.web.cern.ch> p. 28-29

**InGrid** technologie de fabrication globale industrielle avec Micromegas intégré sur silicium. p.24-25

**JLAB** *Jefferson Laboratory*, aux Etats-Unis. <http://www.jlab.org>

**KABES** *KAon BEam Spectrometer*, dispositif de spectrométrie pour les mesures de précision des paramètres des kaons chargés sur l'expérience NA48 implantée sur le synchrotron de proton SPS du Cern. p. 18

**LHC** *The Large Hadron Collider*, grand collisionneur d'hadrons (protons ou ions lourds) au Cern.

<https://home.cern/fr/topics/large-hadron-collider> ; <http://www.lhc-france.fr>

**Medipix** circuit intégré à micropixels. p. 24-25

**Mesh** : grille ; **Micromesh** : maille, microgrille ; **Microbulk** : cf. Bulk

**Microstrips** : micropistes

**Micromegas MicroMegas**, **MICRO-MESH Gaseous Structure**, Structure de détecteur à gaz et à microgrille

**MPGD** *Micro Pattern Gaseous Detectors*, détecteurs gazeux à micro-motif. p. 9

**MIMAC** *Micro-TPC Matrix of Chambers*, ensemble de microchambres TPC pour la recherche directe de particules Wimps, candidats pour la matière noire. p. 5

**Minos** *MagIc Numbers Off Stability*, études des « nombres magiques loin de la vallée de stabilité », détecteur (cible active et TPC) utilisé pour les études de spectroscopie des noyaux exotiques. p. 20-21

**MultiGen** Multiplexage Génétique. p. 26

**MVT** *Micromegas Vertex Tracker*. p. 12-13

**MWPC** *Multi-Wire Proportional Chamber*, chambre proportionnelle multifilaire, dite chambre à fils. p. 5, p. 9

**NA48** (évolutions **NA48-1**, **NA48-2**), expériences au Cern pour étudier la violation de la symétrie CP (charge-parité).

<http://na48.web.cern.ch/NA48> p. 18-19

**NEWS** (*New Experiments With Spheres*) au SNOLAB

<https://www.snolab.ca/science/experiments/news>

**NSW** *New Small Wheels*, nouvelles « petites » roues de détection des muons pour Atlas. p. 6, p.14-15

**NFS** *Neutrons For Science*, aire expérimentale de Spiral2.

<http://pro.ganil-spiral2.eu/laboratory/experimental-areas/nfs> p. 17

**n\_TOF** *Neutron Time of Flight*, installation de temps de vol de neutrons au Cern. <https://home.cern/fr/about/experiments/ntof> p.16

**PCB** *Printed Circuit Board*, carte support de circuit imprimé. p. 12, p. 26

**Pad** (micropad) : plot.

**Piggyback** technologie de fabrication du Micromegas doté d'un nouveau circuit de lecture où l'anode est constituée d'une couche résistive sur un substrat en céramique. p.24-25

**Résistif** Micromegas avec dépôt d'une couche résistive sur les électrodes de lecture pour réduire l'amplitude des décharges (de plusieurs centaines de volts) et les taux de claquages. p. 22-23

**S<sup>3</sup>** *Super Separator Spectrometer*, aire expérimentale de Spiral2.

<http://pro.ganil-spiral2.eu/spiral2/instrumentation/s3> p. 17

**SNOLAB** Infrastructure du Laboratoire souterrain SNO Sudbury Neutrino Observatory au Canada ; cette extension est spécialisée dans les études de matière noire et de neutrinos.

<https://www.snolab.ca/science/experiments> p. 29

**SPIRAL2** Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne, de 2<sup>e</sup> génération, installation du Ganil qui doit délivrer ses premiers faisceaux pour les expériences à partir de 2019.

<https://www.ganil-spiral2.eu/ganil/presentation/spiral2/la-phase-1>

**T2K** *Tokai To Kamiokande*, expérience et dispositif pour les mesures d'oscillations de neutrinos au Japon (Scintillations n°96). p. 18-19.

**TPC** *Time Projection Chamber*, chambre à projection temporelle.

p. 12, p. 18

**WIMP** *Weakly Interacting Massive Particle* : particule massive interagissant faiblement avec la matière, candidat pour la matière noire recherchée dans l'Univers. (Scintillations n°95). p.29

## Définitions

**Luminosité.** La performance d'un accélérateur est quantifiée par le nombre de collisions qu'il produit. Elle se traduit par la luminosité  $L$  qui est le nombre de collisions par seconde ; elle est exprimée comme nombre de particules en collision par unité de surface et par seconde et a pour unité le  $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ . Pour évaluer la luminosité intégrée sur une période de temps, on l'exprime aussi en inverse de femtobarn ( $\text{fb}^{-1}$ ) ; le barn ( $10^{-24} \text{cm}^2$ ) est l'unité de section efficace, probabilité d'une interaction lors de la collision entre deux particules. Une luminosité de  $10 \text{fb}^{-1}$  correspond à un million de milliards de collisions (par  $\text{cm}^2$  et par s).

**Section efficace d'une réaction.** Probabilité d'interaction entre le projectile et la cible de la réaction. Elle est obtenue à partir du nombre d'événements détectés, proportionnel au nombre de particules incidentes par unité de surface de la cible, au nombre de noyaux composant la cible, à la section efficace et à l'efficacité de la détection.

Les projets évoqués au fil du numéro : Atlas, Cast, Clas12, Compass, Falstaff, Minos, NFS, NSW, n\_TOF, S<sup>3</sup>, ScanPyramids, sont détaillés dans les pages « expériences/ projets » du site de l'Irfu : [http://irfu.cea.fr/Phocea/Vie\\_des\\_labos/Ast/index.php?aff=technique](http://irfu.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/index.php?aff=technique)

# La bibliothèque de Micromegas

## Bibliographie

### Livres et articles, rapports et brevets



**Pour en savoir plus sur les origines et l'histoire des chambres à fils, leur émergence comme un nouveau concept au sein des détecteurs gazeux créés pour la physique des particules, quelques références aux articles et ouvrages de Georges Charpak ainsi qu'aux livres et revues qui décrivent ses travaux et les phases de développement des chambres à fils.**

#### Georges Charpak,

Discours prononcé à l'occasion de la remise du Prix Nobel en 1992.  
*Nobel Lecture: Electronic Imaging of Ionizing Radiation with Limited Avalanches in Gases*, Nobelprize.org.  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1992/charpak-lecture.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1992/charpak-lecture.html)  
Discours le 10 décembre 1992 lors du banquet :  
"My very modest contribution to physics has been in the art of weaving in space thin wires detecting the whisper of nearby flying charged particles produced in high-energy nuclear collisions. It is easy for computers to transform these whispers into a symphony understandable to physicists.(...) The techniques being developed for matching the needs in radiation detectors of the future high-energy colliders foreseen at CERN or in the USA will clearly bring the ideal solution for the imaging of radiations: each quantum will be detected, one by one, with an accuracy of a few microns. (...) As a fallout, you will learn everything you want to know about the Higgs field, the hidden matter of the Universe, and marvellous new particles which are haunting the dreams of physicists and will become familiar notions to you."

#### Articles

Notations abrégées. *Nuclear Instruments and Methods* en : NIM ; *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* noté dans les références des articles du n° et ici en NIM A.  
• *Evolution of the Automatic Spark Chambers*, G. Charpak, *Annual Review of Nuclear Science*, Vol. 20:195-254 (1970).  
<https://doi.org/10.1146/annurev.ns.20.120170.001211>  
*Multiwire proportional chambers and drift chambers*, G. Charpak, F. Sauli, NIM 162, 405-428 (1979). [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(79\)90726-2](https://doi.org/10.1016/0029-554X(79)90726-2)  
• *Some observations concerning the construction of proportional chambers with thick sense wires*, S. Brehin, A. Diamant Berger, G. Marel, G. Tarte, R. Turley, G. Charpak, F. Sauli, NIM 123, 225-229 (1975).  
[https://doi.org/10.1016/0029-554X\(75\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0029-554X(75)90003-8)  
• *Applications de la diffusion nucléaire à la radiographie - Nuclear scattering applied to radiography*, J. Saudinos, G. Charpak, F. Sauli, D. Townsend, J. Vinciarelli, *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 20, pp. 890-905 (1975). <https://doi.org/10.1088/0031-9155/20/6/002>  
- *Nuclear scattering radiography*, G. Charpak, J. Saudinos, *Progress in Nuclear Medicine* 7: 164-174 (1981). <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6976592>

#### Références sur les évolutions des détecteurs gazeux

• Fabio Sauli, *Gaseous Radiation Detectors, Fundamentals and Applications*, Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology, Cambridge University Press, 2014.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107337701>  
p.7, Section 1.2 "Souvenirs personnels" « La MWPC originale pouvait atteindre des gains d'avalanche autour de  $10^3$ ; la détection du signal émis par les particules rapides (quelques dizaines de paires d'électrons) nécessitait l'utilisation d'amplificateurs à faible bruit, ce qui était possible mais exigeant pour l'électronique de l'époque. Une découverte majeure du groupe de Charpak, et peut-être une raison de la propagation rapide de la technologie, était un mélange gazeux dans lequel des gains saturés supérieurs à  $10^3$  pouvaient être atteints, fournissant des impulsions d'amplitude indépendantes de la décharge d'électrons par l'ionisation primaire, conduisant ainsi à un cahier des charges plus simple pour l'électronique de lecture. De manière tout à fait appropriée, le mélange (argon-isobutane avec une trace de fréon) a été nommé "gaz magique" (Bouclier et al. 1970). »  
• Glenn F Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 3<sup>e</sup> édition 2000. John Wiley and sons, ISBN 0-471-07338-5.  
1<sup>re</sup> édition : <https://archive.org/details/RadiationDetectionAndMeasurementGlennF.Knoll3rdEd1999>

#### Sélection d'ouvrages de Georges Charpak (aux éditions Odile Jacob)

\* G. Charpak, Richard L. Garwin, et Venance Journé, *De Tchermobyl en tchernobyls* (2005)  
\* G. Charpak, *Feux follets et champignons nucléaires* (2000)  
\* G. Charpak et Henri Broch, *Devenez sorciers, devenez savants* (2002)  
\* G. Charpak, Pierre Léna, et Yves Quééré, *L'enfant et la Science : Laventure de La main à la pâte* (2005)  
\* G. Charpak et D. Saudinos, *La Vie à fil tendu* (1993).

#### Articles en hommage à Georges Charpak

Georges Charpak (1924-2010), *Physicist who transformed the measurement of high-energy particles*.  
I. Giomataris, *Nature* 467, 1048 (2010) <https://doi.org/10.1038/4671048a>  
*Charpak, un grand homme de science*, I. Giomataris, *Courrier du Cern*, 30 novembre 2010. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/44361>

#### Les livres et articles sur Micromegas

*Le Micromégas de M. de Voltaire*, écrit dans les années 1738-1739, publié en 1751 à Londres, i. e. Paris, 1752.  
François-Marie Arouet, dit Voltaire (1694-1778). *Micromégas, Histoire Philosophique*, édition originale 1752.  
Imprimeur-libraire : M. Lambert. Monographie imprimée, 92 p.; in-12°. BnF, Réserve des livres rares, Res Y2 3583 ; ark:/12148/btv1b86157424

#### Référence initiale du développement du détecteur ...sans fil.

[NIM96] *MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environment*, Y. Giomataris, Ph. Rebourgeard, J.P. Robert & G. Charpak, NIM A 376, 29-35 (1996).  
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(96\)00175-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(96)00175-1)  
N.B. Pour l'acronyme, les auteurs remerciaient C. Allegrini... et François Voltaire !  
Cet article avait fait l'objet du rapport interne 95-04 du Dapnia - Sed en décembre 1995 (ci-contre la page de couverture).



#### 2<sup>e</sup> publication suite aux tests sous faisceau à Saclay et au Cern.

[NIM98] *First beam test results with Micromegas, a high-rate, high-resolution detector*, G. Charpak, J. Derré, A. Giganon, Y. Giomataris, D. Jourde, C. Kochowski, S. Loucatos, G. Puill, Ph. Rebourgeard, J.P. Robert, NIM A 412, 47-60 (1998). [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)00311-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)00311-8)

#### Article sur Micromegas dans le Scintillations n°38, Juillet 1998.

Jacques Derré, *Un nouveau détecteur gazeux est en train de naître dans les pépinières du Dapnia*, <http://irfu.cea.fr/Scintillations>  
N.B. Un encadré fournit la recette de la fabrication de la pâte feuilletée Micromegas.

[NIM06] *Micromegas in a bulk*, I. Giomataris, R. De Oliveira, S. A. Andriamonje, S. Aune, G. Charpak, P. Colas, G. C. Fanourakis, E. Ferrer, A. Giganon, Ph. Rebourgeard, P. Salin, Rapport interne 2004 DAPNIA-04-80; NIM A 560 (2006) 405-408. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.12.222>

#### Les brevets d'invention - titre (n° et date de publication) inventeurs

Source : la base de brevets de l'Inpi (institut national pour la propriété intellectuelle), <https://bases-brevets.inpi.fr>

#### Brevets déposés par le CEA sur la conception du détecteur

[B97] *Détecteur de position, à haute résolution, de hauts flux de particules ionisantes* (WO9714173 A1, le 17/04/1997)  
G. Charpak, I. Giomataris, Ph. Rebourgeard, J.-P. Robert.

[B98] *Détecteur de particules à électrodes parallèles multiples et procédé de fabrication de ce détecteur* (EP0872874 A1, le 21/10/1998) G. Charpak, I. Giomataris, Ph. Rebourgeard, J.-P. Robert.

#### Brevets déposés par le CEA et le Cern sur les évolutions du détecteur et des technologies de lecture des signaux

[B11] *Procédé pour fabriquer un espace d'amplification d'un détecteur de particules à avalanche* (WO2011050884 A1, le 05/05/2011) I. Giomataris, R. De Oliveira (Cern).

[B13] *Interface détecteur-lecteur pour un détecteur de particules à avalanche* (WO2013029748 A1, le 07/03/2013) I. Giomataris, R. De Oliveira (Cern).

Brevets déposés par le CEA sur les évolutions de la technologie de fabrication et du traitement des signaux

[B14A] *Détecteur courbe de particules gazeux* (EP2720252 A2, le 16/04/2014) S. Cazaux, Th. Lerch, S. Aune.

[B14B] *Circuit de connexion multiplexé et dispositif de détection d'au moins une particule utilisant le circuit de connexion* (EP2749903 A1, le 02/07/2014) S. Procureur, S. Aune, R. Dupré.

[B16A] *Dispositif de détection de particules de type résistif et procédé de détection de particules* (EP3109892 A1, le 28/12/2016) S. Aune.

# Les transformations de Micromegas

