

MIMAC (Détection Directionnelle de Matière Sombre)

1. Enjeux scientifiques

Les observations astrophysiques convergent depuis plusieurs décennies vers un modèle standard cosmologique et justifient l'hypothèse de l'existence de matière sombre aussi bien à grande échelle qu'à l'échelle locale de notre galaxie. La détection directe des particules constituant cette matière est un défi majeur de la physique depuis plusieurs décennies. Les neutrons et les neutrinos par leur dispersion cohérente sur les noyaux constituent un fond ultime pour ce type de détection. Le projet MIMAC (MIcro-tpc MAtrix of Chambers) développe un détecteur directionnel de matière sombre, permettant ainsi de compter sur une signature nouvelle, unique et nécessaire, la directionnalité, afin de corrélérer le mouvement relatif de notre système solaire autour du centre galactique avec l'évènement rare détecté dans le détecteur.

L'état actuel de la recherche directe de matière sombre non-baryonique montre des efforts considérables afin de détecter des reculs nucléaires qui proviendraient de collisions élastiques avec des WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) en les discriminant du fond. Ces évènements seront des « candidats » à valider par les autres expériences de détection directe mais la seule signature convaincante de la provenance d'une collision avec un WIMP du halo galactique est la directionnalité.

En parallèle, la recherche de reculs nucléaires de basse énergie ($E < 10$ keV) présente la difficulté additionnelle du quenching en ionisation et en scintillation qui limitent le signal accessible à la détection et en général sont estimés ou mesurés avec des incertitudes importantes.

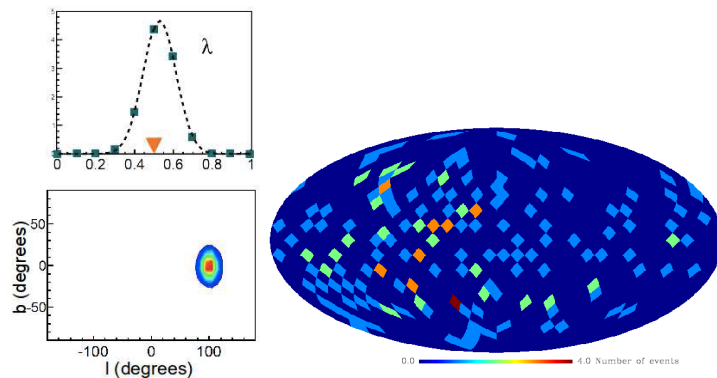


Fig. 1: (Gauche) Le résultat de l'analyse de maximisation de la fonction de vraisemblance de la carte montrée à droite, en montrant le nombre correct de Wimps par rapport au nombre total d'événements ($\lambda = S/(S+B) \sim 0.5$) et la confirmation de la directionnalité en coordonnées galactiques ($l=90^\circ, b=0^\circ$). (Droite) La carte en coordonnées galactiques des 50 reculs nucléaires provenant de WIMPs et 50 autres provenant de neutrons distribués isotropiquement [13].

Le paramètre de « découverte » est la trace de recul qui serait corrélée à la direction définie par la tangente à l'orbite de notre système solaire autour du centre galactique qui est identifié par la direction vers la Constellation du Cygne. Les directions des noyaux de reculs permettent la construction d'une carte en coordonnées galactiques des événements (50 WIMPs et 50 du fond isotrope) fig.1 droite. Nous avons également montré que la directionnalité ouvre la voie d'une caractérisation de la masse de la particule et de la forme du halo galactique [12].

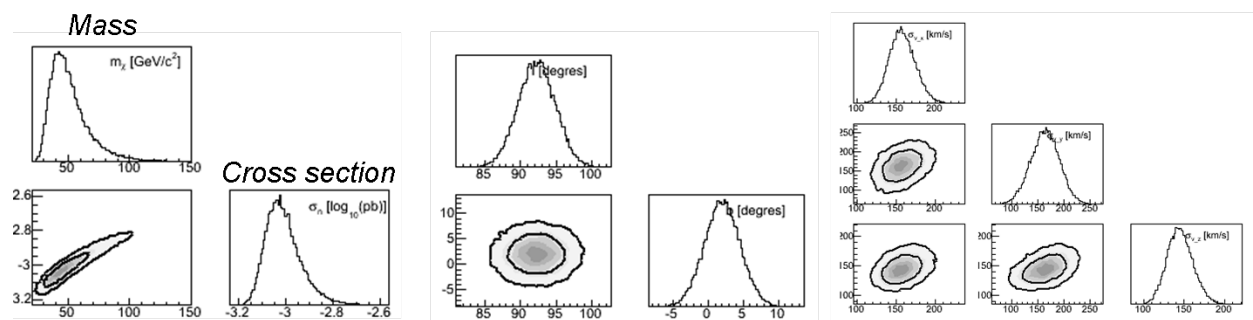


Figure 2: Distributions marginalisées (diagonale) et corrélations en 2D (en dehors de la diagonale) des 7 paramètres à partir de l'analyse de la simulation dans le cas du halo isothermique avec des WIMPs de $50 \text{ GeV} \cdot \text{c}^{-2}$ et une section efficace WIMP-nucléon $\sigma n = 10^{-3} \text{ pb}$, voir [12] pour plus de détails.

La recherche directionnelle de matière sombre est un effort international qui présente différents types de détecteurs (DRIFT, DMTPC, Newage, MIMAC, Emulsions) et fait un workshop international tous les deux ans (CYGNUS).

2. Projet

Le projet MIMAC (Micro-tpc Matrix of Chambers) propose de construire une grande matrice de micro-TPC à basse pression (50 mbar) afin de détecter par ionisation les traces de reculs nucléaires en 3D. Les noyaux cibles peuvent être changés en masse et/ou spin afin d'optimiser le transfert d'énergie cinétique et la section efficace d'interaction.

Les noyaux cibles privilégiés pour l'instant ont été : ^{19}F , ^{12}C , ^1H , ^4He .

La matrice est conçue à partir des modules bi-chambres (deux chambres avec une cathode commune) identiques qui nous permettront de mieux contrôler le fond intrinsèque et pouvoir faire la coïncidence entre les différentes chambres.

Le détecteur de chaque chambre est une micro-TPC, type Micromegas pixelisée (IRFU-Saclay), couplée à une électronique rapide auto-déclenchée qui a été spécialement développée par le LPSC-Grenoble pour ce projet.

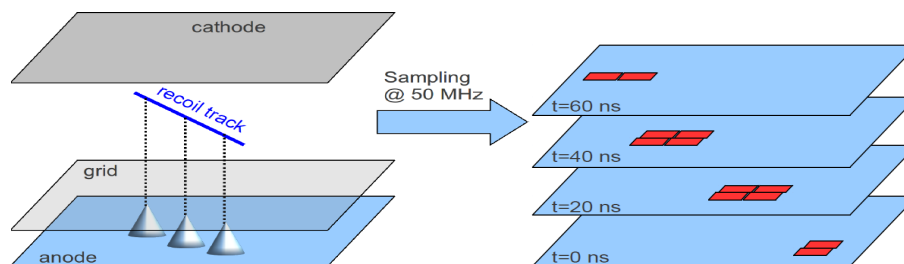


Fig. 3: Reconstruction de la trace d'un noyau de recul dans MIMAC. L'anode pixelisée est lue tous les 20 ns définissant les pixels touchés par collection de charges de l'avalanche produite par les électrons primaires. La troisième coordonnée est reconstruite à partir de la vitesse de collection de charge mesurée indépendamment ou estimée par Magboltz.

Afin d'avoir la carte électronique à l'extérieur de la chambre pour préserver la qualité du gaz et ne pas subir le dégazage des composants, une interface spéciale a été développée par l'IRFU-Saclay et le LPSC permettant de passer les 512 voies de lecture en les couplant à la carte électronique, voir fig 4b.

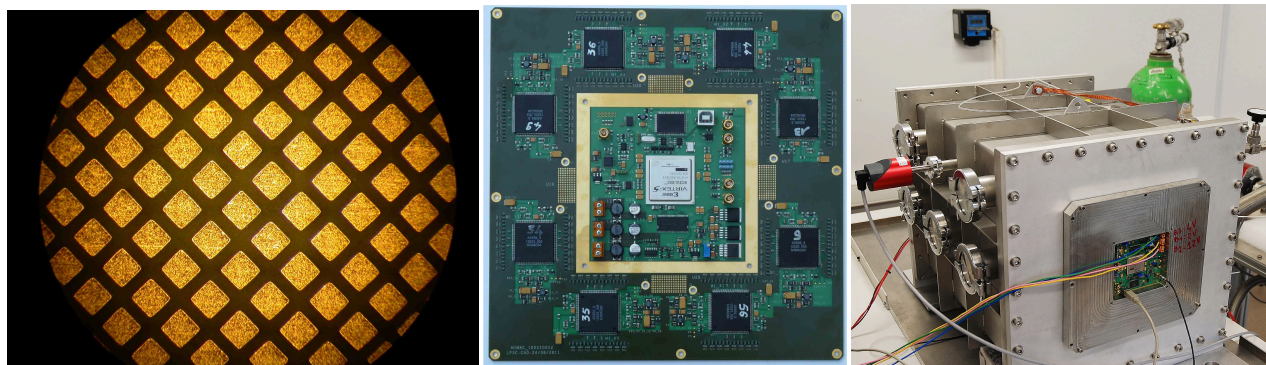


Figure 4: (Gauche): Une petite portion (3mm x 3mm) de l'anode pixélisée 10cmx10cm du détecteur MIMAC-Micromegas, montrant les pixels de 200 um (Centre): La carte électronique MIMAC avec les 8 ASIC (64 voies).(Droite): Le prototype bi-chambre qui a été installé à Modane en juillet 2012.

3. Genèse et calendrier

Le projet MIMAC a commencé en 2005 par le développement d'une ligne expérimentale pour la mesure du facteur de quenching en ionisation au LPSC.

En 2007, nous avons eu une ANR (400 k€) avec comme partenaires l'IRFU-Saclay et le Laboratoire de Métrologie et Dosimétrie de Neutrons (LMDN) de l'IRSN (Institut de Radioprotection et Sureté Nucléaires).

Grâce à la collaboration avec le LMDN, nous avons eu accès aux champs neutroniques mono-énergétiques de qualité métrologique produit par l'accélérateur AMANDE (Cadarache) qui nous ont permis de valider notre premier prototype mono-chambre du détecteur MIMAC.

Depuis, les jalons parmi les plus importants ont été les suivants :

- I. **Installation et fonctionnement du prototype de module bi-chambre au LSM :** En juillet 2012, nous avons installé le premier module bi-chambre au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM). Nous avons constaté une excellente stabilité du gain en fonction du temps grâce à un système de circulation du gaz spécialement développé pour notre projet. L'étalonnage s'effectue par fluorescence, produite sur des feuilles de Cd, Fe et Cu, grâce à un générateur de rayons X, et ce avec une fréquence hebdomadaire. Nous avons amélioré l'installation en janvier 2013, corrigeant une fuite dans le système de circulation du gaz. Depuis, le prototype bi-chambre fonctionne en permanence avec toujours un étalonnage hebdomadaire. Les données ont donné lieu à un article sur la progénie du Rn (voir point IV).
- II. **Développement d'une ligne de quenching portable : COMIMAC**
 - a. La mesure du facteur de quenching en ionisation est fondamentale dans le domaine de la détection directe de matière sombre puisque les noyaux de reculs sortant éventuellement d'une collision élastique avec un WIMP laissent une énergie en ionisation différente de l'énergie cinétique. Le rapport entre l'énergie en ionisation laissée dans le détecteur et l'énergie cinétique initiale de la particule est définie comme le facteur de quenching en ionisation. En particulier, dans un gaz, ce facteur de quenching dépend de l'état de pureté du gaz et de la pression.
 - b. Nous avons développé une ligne de quenching portable afin de pouvoir mesurer les facteurs de quenching in-situ pour contrôler à tout moment les facteurs de quenching du gaz d'un détecteur installé dans un laboratoire souterrain.

Un article a été publié décrivant la ligne expérimentale COMIMAC et la méthode originale de mesure [11].

- III. La **discrimination électron-recul**, une des clés majeures de la détection directe de matière sombre, a été mesurée dans le mélange gazeux de MIMAC avec des neutrons rapides monochromatiques à Amande (IRSN) [7].
- IV. **Première mesure de traces en 3D de reculs nucléaires provenant de descendants du Radon (^{222}Rn)**. Cette mesure est réellement unique puisqu'elle constitue une validation de la capacité à mesurer des longueurs de traces en 3D de basse énergie, ainsi que leur énergie en ionisation. Ces événements, dont l'énergie cinétique se trouve dans la plage comprise entre 100 et 146 keV, ne laissent en ionisation qu'entre ~ 30 et ~ 45 keV dans la micro-TPC et constituent un fond qui se trouve dans tous les détecteurs, pouvant ainsi servir de « benchmark » [8].
- V. **Simulation comparée des différentes techniques directionnelles** (cristaux, émulsions et TPC). Nous avons publié un article montrant clairement que l'information directionnelle du recul nucléaire est « préservée » **uniquement** dans le cas d'une TPC [10].
- VI. Le **signal cathode**. Le signal induit par le mouvement des électrons primaires pendant leur collection vers la grille, visible avant l'avalanche, a été validé et utilisé pour une mesure de la vitesse de collection de charges dans une chambre de MIMAC [9].
- VII. Un **nouveau détecteur bas-bruit (BB)** a été développé grâce à un financement du Labex Enigmass. Un nouveau détecteur type Micromegas a été développé pour MIMAC par O. Guillaudin (LPSC) en utilisant du Plexiglass et du Kapton à la place du PCB. La validation de la qualité des traces a été faite en janvier 2017 pour le prototype 10 cm x 10 cm. Le design du détecteur de 35 cm a été finalisé en novembre 2017.
- VIII. **Collaboration avec l'Université de Tsinghua** (Pekin, Chine). La présence de Charling Tao à Pekin comme professeur à l'Université de Tsinghua nous a permis d'établir une collaboration très riche entre les deux équipes. Un post-doc de trois ans ainsi qu'une thèse sont financés par Tsinghua pour travailler sur MIMAC (respectivement Dr. Igor Moric et M. Yi Tao). Ces deux collaborateurs sont venus à deux reprises pendant 6 mois et 3 mois respectivement au LPSC de Grenoble pour participer à l'analyse de données et aux expériences sur LHI et COMIMAC, sur la longueur de traces et la résolution angulaire. Les articles sont en préparation.
- IX. En juin 2017, les équipes chinoises travaillant sur MIMAC ont organisé le workshop international **CYGNUS-2017** sur la détection directionnelle de matière sombre. Le workshop a eu lieu à Xichang proche du laboratoire souterrain de Jinping, avec plus de 40 participants (<http://www.tir.tw/conf/cygnus2017/>).
- X. **Mesure expérimentale de la résolution angulaire** de MIMAC sur LHI (LPSC). Le papier est en préparation.
- XI. **Valorisation de MIMAC et COMIMAC** : Un contrat de collaboration a été signé entre le laboratoire de métrologie de l'IRSN (LMDN) et le LPSC en 2010 pour 5 ans afin de démontrer que notre détecteur prototype MIMAC peut devenir un étalon primaire pour la caractérisation de champs neutroniques rapides. Deux thèses sur ce sujet et sous la direction de D. Santos ont été financées. La démonstration de la mesure de neutrons rapides dans la plage de basse énergie (27 keV et 127 keV) a été faite dans le cadre de la thèse de Donovan Maire.

La valorisation de MIMAC a été une activité importante dans la période de 3 ans décrite précédemment. Une chambre de la matrice MIMAC peut faire la détection de neutrons rapides et donner leur énergie grâce à la reconstruction en 3D de traces de noyaux de recul. Les neutrons rapides sont difficiles à détecter puisque ce sont de particules neutres électriquement. Ce sont les particules les plus abondantes produites dans l'atmosphère (jusqu'à 100 MeV) à partir des particules cosmiques et peuvent également être produites dans des contextes très divers comme dans l'industrie (pour le contrôle non destructif), par des sources fissiles ou pendant une radiothérapie.

Les points à mettre en valeur sur la valorisation sont entre autres :

- i. La collaboration avec le Laboratoire de Métrologie et Dosimétrie de Neutrons de l'IRSN.

Le contrat signé en 2010 courant jusqu'à décembre 2015 qui a permis au Laboratoire de Métrologie et Dosimétrie Neutronique (LMDN) de l'IRSN de compter sur un prototype de MIMAC-FastN et d'une ligne de quenching portable COMIMAC a été prolongé en 2016. Le LNE (Laboratoire National de métrologie et d'Essais) et LMDN (Laboratoire de Métrologie et Dosimétrie Neutrons de l'IRSN) ont financé la thèse de Donovan Maire soutenue en décembre 2015 et la thèse de Benjamin Tampon commencée en octobre 2015.

- ii. Le **Labex Enigmass** a financé en août 2014, pour une période de 2 ans et demi, un ingénieur en valorisation (Nadine Sauzet) pour nous aider à valoriser une chambre type MIMAC comme détecteur de neutrons rapides.
- iii. Notre projet **MIMAC-FastN** a été retenu comme projet en **Pré-maturation par la DIRE (CNRS)** en juillet 2015, pour une période de 18 mois.
- iv. Notre projet de détecteur de neutrons rapides directionnel et portable (MIMAC-FastN) a été retenu par la **SATT (Linksium) en avril 2017** pour une période de maturation de 15 mois à partir de septembre 2017.
- v. Une lettre de l'innovation du CNRS a été publiée sur notre détecteur MIMAC-FastN en juillet 2017. <http://www.cnrs.fr/cnrsinnovation-lalettre/actus.php?numero=488>

Passage par le Conseil Scientifique de l'IN2P3 en Octobre 2012.

Conseil Scientifique du LPSC en décembre 2016. (Voir avis dans annexe)

Brevet sur la détection neutronique à haute énergie (Juillet 2017)

(D. Santos, O. Guillaudin, N. Sauzet)

Thèses : J. Billard (2008-2011), Q. Riffard (2012, 2015), D. Maire (2012, 2015) (Cadarache)

Publications

[1] **Three-dimensional track reconstruction for directional Dark Matter detection,**

J. Billard, F. Mayet and D. Santos

JCAP 04 (2012) 006 [arXiv:1202.3372](https://arxiv.org/abs/1202.3372)

[2] **Low energy electron/recoil discrimination for directional Dark Matter detection**

J. Billard, F. Mayet and D. Santos

JCAP 07 (2012) 020 [arXiv:1205.0973](https://arxiv.org/abs/1205.0973)

[3] **Is a co-rotating Dark Disk a threat to Dark Matter Directional Detection ?**

J. Billard, Q. Riffard, F. Mayet, D. Santos, . [arXiv:1207.1050](https://arxiv.org/abs/1207.1050)

Phys. Lett. B 718 (2013) 1171-1175

[4] **In situ measurement of the electron drift velocity for upcoming directional Dark Matter detectors**

J. Billard, F. Mayet, G. Bosson, O. Bourrion, O. Guillaudin, J. Lamblin, J. P. Richer, Q. Riffard, D. Santos, F. J. Iguez, L. Lebreton, D. Maire, . [arXiv:1305.2360](https://arxiv.org/abs/1305.2360) JINST 9 (2014) P01013

[5] **Measurement of a 127 keV Neutron Field with a micro-TPC Spectrometer**

D. Maire, J. Billard, G. Bosson, O. Bourrion, O. Guillaudin, J. Lamblin, L. Lebreton, F. Mayet, J. Médard, J.F. Muraz, M. Petit, J.P. Richer, Q. Riffard, D. Santos, [arXiv:1310.6837](https://arxiv.org/abs/1310.6837)

Nuclear Science, IEEE Transactions on, 61 (2014) 2090

[6] Neutron Energy Reconstruction and Fluence Determination at 27keV with the LNE-IRSN-MIMAC MicroTPC Recoil Detector.

D. Maire et al, 10.1109/TNS.2016.2527819, TNS-00303-2015

[7] MIMAC low energy electron-recoil discrimination measured with fast neutrons.

Q. Riffard, D. Santos et al., arXiv:1602:01738, JINST 11 (2016) P08011.

[8] First detection of tracks of radon progeny recoils by MIMAC

Q. Riffard, D. Santos et al. 2017_JINST_12_P06021

[9] Cathode signal in a TPC directional detector.

C. Couturier, Q. Riffard, N. Sauzet, O. Guillaudin, F. Naraghi, and D. Santos.
Journal of Instrumentation, 12(11):P11020, 2017b.

[10] Dark Matter directional detection: comparison of the track direction determination.

C. Couturier, J.P. Zopounidis, N. Sauzet, F. Naraghi, and D. Santos.
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 01:027, 2017a.

[11] A table-top ion and electron beam facility for ionization quenching measurement and gas detector calibration,

J.F. Muraz, J. Médard, D. Santos et al. Nuclear Instruments and Methods 832 (2016), 214-218.

[12] A Markov Chain Monte Carlo analysis to constrain Dark Matter properties with directional detection,

J. Billard, F. Mayet and D. Santos,
Phys. Rev. D 83 (2011) 075002 [arXiv:1012.3960](#)

[13] Assessing the discovery potential of directional detection of Dark Matter,

J. Billard, F. Mayet and D. Santos
Phys. Rev. D 85 (2012) 035006, [arXiv:1110.6079](#)

[14] A mu-TPC detector for the characterization of low energy neutron fields,

C. Golabek *et al.*,
Nucl. Instrum. Meth. A678 (2012) 33 , [arXiv:1203.2443](#)

[15] Micromegas detector developments for Dark Matter directional detection with MIMAC,

F. J. Iguaz *et al.*,
JINST 6 (2011) P07002 , [arXiv:1105.2056](#)

[16] Exclusion limits from data of directional Dark Matter detectors,

J. Billard, F. Mayet and D. Santos,
Phys. Rev. D 82 (2010) 055011 , [arXiv:1006.3513](#)

[17] Directional detection as a strategy to discover galactic Dark Matter,

J. Billard, F. Mayet, J.F. Macias-Perez, D. Santos,
Phys. Lett. B 691 (2010) 156-162 , [arXiv:0911.4086](#)

[18] The case for a directional dark matter detector and the status of current experimental efforts,

S. Ahlen, N. Afshordi, J.B.R. Battat, J. Billard, *et al.*,
International Journal of Modern Physics A 25 (2010) 1-51 , [arXiv:0911.0323](#)

[19] Data acquisition electronics and reconstruction software for directional detection of Dark Matter with MIMAC,

O. Bourrion, G. Bosson, C. Grignon, J.L. Bouly, J.P. Richer, O. Guillaudin, F. Mayet, D. Santos,
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 662 (2010) 207 , [arXiv:1006.1335](#)

[20] Development of a front end ASIC for Dark Matter directional detection with MIMAC,
J. P. Richer, G. Bosson, O. Bourrion, C. Grignon, *et al.*,
*Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*620 (2010) 470 , [arXiv:0912.0186](https://arxiv.org/abs/0912.0186)

[21] Quenching factor measurement in low pressure gas detector for directional dark matter search
O. Guillaudin, J. Billard, G. Bosson, O. Bourrion, T. Lamy, F. Mayet, D. Santos, P. Sortais,
EAS Publications Series 53 (2012) 119-127

[22] Readout technologies for directional WIMP Dark Matter detection
J. B. R. Battat, I. G. Irastorza, A. Aleksandrov, M. Ali Guler, T. Asada, E. Baracchini, J. Billard, G. Bosson,
O. Bourrion, J. Bouvier, *et al.*
Physics Reports 662 (2016) pp. 1-46

[23] A review of the discovery reach of directional Dark Matter detection
F. Mayet, A. M. Green, J. B. R. Battat, J. Billard, N. Bozorgnia, G. B. Gelmini, P. Gondolo, B. J. Kavanagh,
S. K. Lee, D. Loomba, J. Monroe, B. Morgan, C. A. J. O'Hare, A. H. G. Peter, N. S. Phan, S. E. Vahsen.
Physics Reports 627 (2016) 1

4. État de l'art

Dans le contexte international plusieurs projets ont comme objectif de faire la détection directionnel de matière sombre dans une chambre à ionisation : DRIFT (USA, UK) [EA1], DM-TPC (USA) [EA2], Newage (Japan) [EA3] and MIMAC (France) [EA4]. Les différents projets ont été résumés dans un travail collectif [EA5]. Les différents types de détecteurs gazeux sont :

- i) Chambre à fils, avec un pitch de 2 mm, en utilisant la collection des ions négatifs (CS₂) dans Drift [9]
- ii) Chambre d'ionisation avec une mesh plus une camera CCD (2D) dans DM-TPC[10]
- iii) Micro-dots associé à un flash ADC dans Newage [11]
- iv) Micromegas pixélisée couplée à une électronique rapide et auto-déclenchée dans MIMAC[12].

La spécificité de MIMAC est de pouvoir reconstruire des traces en 3D à des énergies de l'ordre du keV et pouvoir extrapoler cette stratégie de détection à des volumes de détection importants grâce à la répétition du même module bi-chambre.

Le fait que le nombre d'événements attendus croît exponentiellement à basse énergie montre l'importance de compter sur un seuil de détection de l'ordre de 100 eV et pouvoir compter également sur la mesure du facteur de quenching en ionisation.

Une autre voie de développement constitue les détecteurs à émulsions [EA6] et certains projets de R&D sur de liquides [EA7] et cristaux [EA8].

Nous avons publié un article en comparant les différentes stratégies de recherche directionnelle [10].

En tout cas, tous ces projets sur la directionnalité montrent la difficulté d'une telle détection et la concurrence internationale est à la fois rude et variée.

[EA1] G.J. Alner *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A* 555 (2005) 173.

[EA2] J.Monroe *et al.* *Proceedings of CYGNUS 2011*, Aussois (France) June 2011, [arXiv:1111.0220](https://arxiv.org/abs/1111.0220).

[EA3] K. Miuchi *et al.*, *Phys. Lett B* 654 (2007) 58.

[EA4] D. Santos *et al.*, *Proceedings of CYGNUS 2013*, Toyama (Japan) June 2013, [arXiv:1311.0616](https://arxiv.org/abs/1311.0616).

[EA5] S. Ahlen, N. Afshordi, J.B.R. Battat, J. Billard, *et al.*,
*International Journal of Modern Physics A*25 (2010) 1-51 , [arXiv:0911.0323](https://arxiv.org/abs/0911.0323)

[EA6] N. D'Ambrosio, N. D. Marco, F. Pupilli, A. Alexandrov, G. D. Lellis, A. D. Crescenzo et al., Nuclear emulsions as a very high resolution detector for directional dark matter search, Journal of Instrumentation 9 (2014) C01043.

[EA7] M. Cadeddu et al, Directional dark matter detection sensitivity of a two-phase liquid argon detector, <https://arxiv.org/abs/1704.03741>

[EA8] F. Cappella, R. Bernabei, P. Belli, V. Caracciolo, R. Cerulli, F. A. Danevich et al., On the potentiality of the ZnWO anisotropic detectors to measure the directionality of Dark Matter, The European Physical Journal C 73 (2013) 1–13.

5. Ressources et moyens

MIMAC est une collaboration internationale franco-chinoise.

En France :

LPSC-Grenoble :

D. Santos (DR, 50%), F. Naraghi (MdC, 50%), O. Guillaudin (IR, 70%), J-F. Muraz (IR, 10%), G. Bosson (IE, 30%), J. Bouvier (IR, 30%), T. Descombes (IE, 60%), N. Sauzet (IR-CDD, 100%), J.L. Bouly (IE, 15%).

F. Mayet (PR, 2005-2014), J. Lamblin (MdC, 2010-2013)

CPPM- Marseille :

C. Tao (DR, 50%), J. Busto (PR, 20%), D. Fouchez (DR, 2010-2017)

IRFU-Saclay :

P. Colas (5%), I. Giomataris (5%), E. Ferrer-Ribas (2007-2012), F. Iguaz (2007-2010)

En Chine :

Université de Tsinghua : Y. Tao (PhD. 100%), I. Moric (Post-doc 100%, 2015-2018)

IHEP : C. Dai (Emerite, 50%), Z. Wang (Chercheur, 20%)

Le projet MIMAC-1m³ coûtera 350 k€ sans compter le personnel technique (voir annexe)

Le module bi-chambre (35cm x 35 cm) bas-bruit a été financé par le Labex Enigmass (74 keuros).

Le budget disponible de 250 k€ provient principalement de la valorisation de MIMAC comme spectromètre directionnel de neutrons rapides et d'une vente d'une chambre MIMAC à l'Université de Tsinghua (Pékin).

6. Réalisations techniques

Les réalisations techniques envisagées sont :

1) Nouveau module bi-chambre bas-bruit pour les détecteurs 35 cm (voir tableau 1)

Comprenant :

- i) Nouveau détecteur bas-bruit (35 cm x 35 cm) avec la technologie DLC (Diamond Layer Coating) (étude et fabrication en interne)
- ii) Nouvelle interface acquisition-détecteur (étude et fabrication en interne)
- iii) Nouvelle carte d'acquisition 1792 voies (28 ASICs)
- iv) Intégration de nouveaux connecteurs.
- v) Nouvelle Cage du Champ (en plexiglas et kapton cuivré) (étude et fabrication en interne)
- vi) Filtrage du Rn (en collaboration avec le CPPM-Marseille)

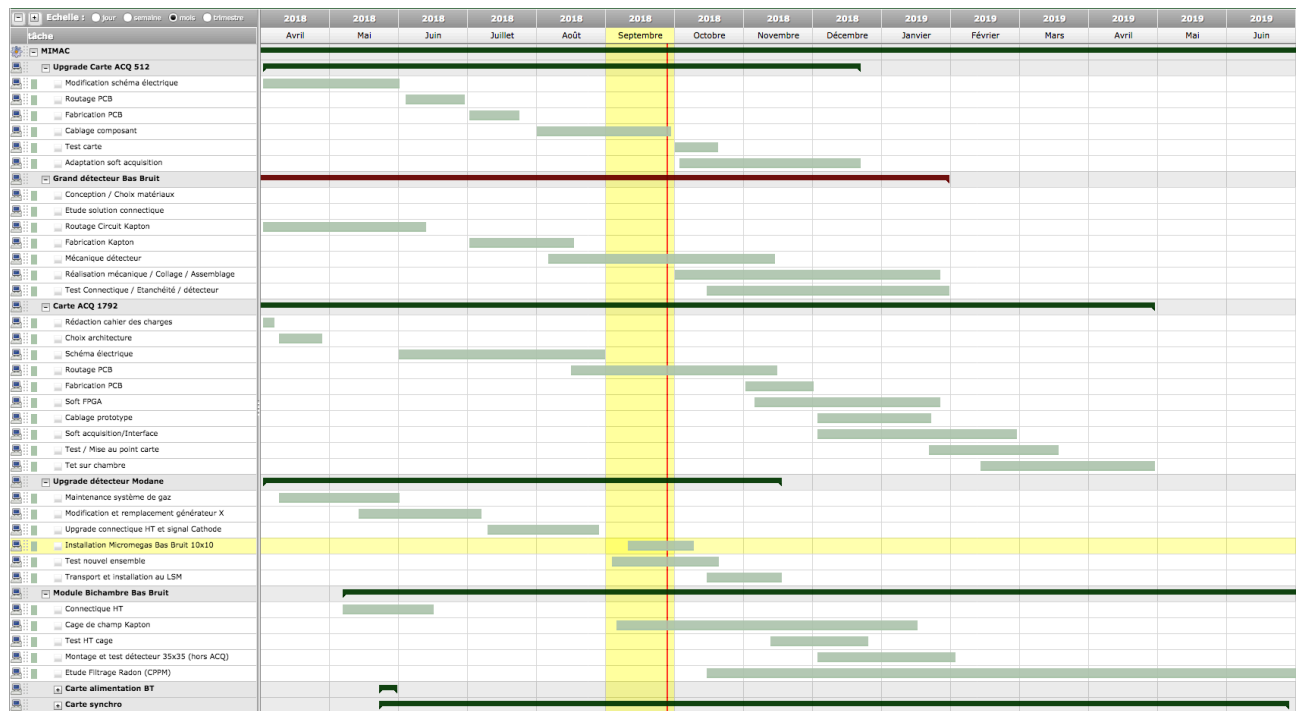


Tableau 1 : Taches associées au module bi-chambre (35 cm x 35 cm)

2) MIMAC-1m³ (après avoir validé le module bi-chambre) (voir tableau 2)

Afin de démontrer que la stratégie de détection de MIMAC peut s'extrapoler à un grand volume, il faut montrer la faisabilité à l'échelle du m³ (voir document annexe pour plus de détails).

Les réalisations techniques additionnelles comprenant :

- i) 16 modules bi-chambres (32 cartes électroniques de 1792 voies)
- ii) Acquisition montrant que le temps mort est négligeable.
- iii) Une seule chambre pour les 16 modules. (étude en interne, fabrication en sous-traitance)
- iv) Blindage polyéthylène (après une caractérisation du fond neutron)

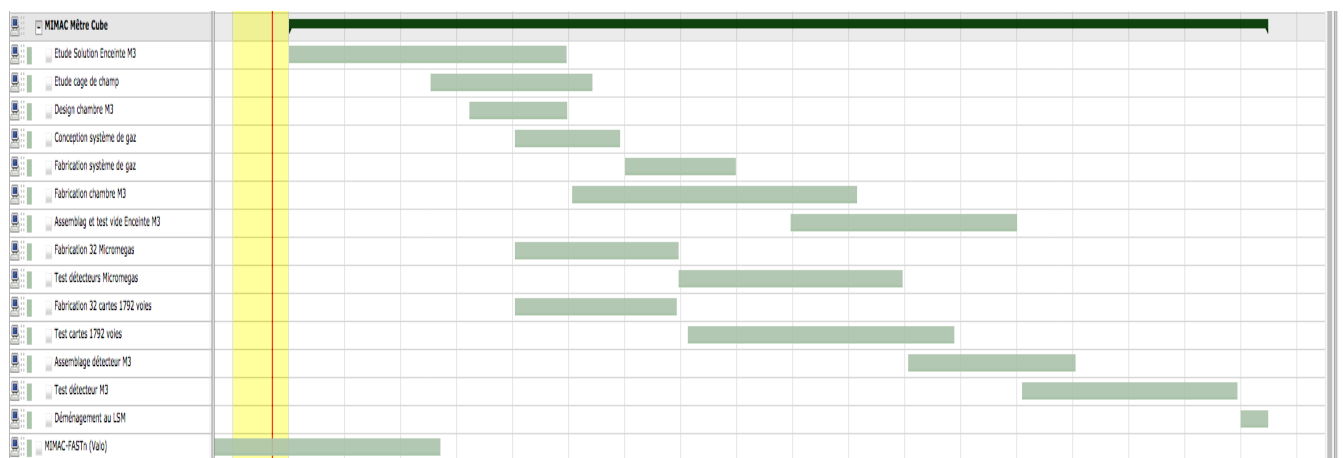


Tableau 2 : Taches associées au MIMAC-1m³

7. Auto-analyse SWOT (facultative)

Forces :

- MIMAC a bénéficié d'un développement « maison (IN2P3) » en profitant du savoir-faire en microélectronique, électronique analogique et acquisition qui a permis la réussite du développement de l'ASIC-MIMAC et de son intégration dans le système d'acquisition.
- La capacité de mesurer de très faibles énergies en ionisation et de reconstruire des traces de longueur sub-millimétrique.
- La possibilité de développer des détecteurs MPGD bas bruit.
- Nous maîtrisons le savoir-faire : détecteur, électronique et mesure du facteur de quenching en ionisation.
- L'accès et la proximité au LSM (Laboratoire Souterrain de Modane).
- L'intérêt de la Chine pour installer un détecteur directionnel dans le laboratoire de Jinping (le plus profond à l'heure actuelle).

Faiblesses :

- Les équipes de physiciens du LPSC et du CPPM sont sous-dimensionnées.

Opportunités :

- Notre stratégie de détection et technologie MIMAC sont pour l'instant celles qui permettent le seuil le plus bas avec la mesure de traces en 3D. Nous avons une avance par rapport à la concurrence internationale.
- Valorisation de la technologie dans le domaine de la mesure neutronique.

Menaces :

- Les particules de matière sombre pourraient être d'une masse inférieure à $500 \text{ MeV}/c^2$.