

# Contribution aux exercices de prospective nationale IN2P3

2020-2030 <https://prospectives2020.in2p3.fr/>

## GT08 – Détecteurs et instrumentation associée

### **Détecteurs Cryogéniques et instrumentation associée**

Contributions collectives de l'APC, IP2I, LPSC, CSNSM et Institut Néel.

#### 1. Informations générales

*Titre* : Détecteurs cryogéniques et instrumentation associée

*Préciser le domaine technologique (plusieurs choix possibles)*

- **Détecteurs cryogéniques (KIDS, bolomètres...)**
- **Électronique Front End, Micro-électronique, Instrumentation cryo.**

*Préciser la motivation principale de recherche visée par la contribution :*

- **La thématique des détecteurs cryogéniques et de l'instrumentation associée n'est pas dans le coeur de métier de l'IN2P3. L'objectif de cette contribution collective de la communauté est de faire remonter ses spécificités et ses ambitions dans une prospective succincte à 10 ans.**

#### 2. Description de la communauté, type de détecteurs et applications

La communauté française des détecteurs cryogéniques est d'environ cent personnes avec une cinquantaine pour l'IN2P3. Cette petite taille permet à la communauté de bien se connaître et de se réunir régulièrement, par exemple autour de l'école thématique commune DRTBT (Détection de Rayonnement à Très Basse Température, <http://www-ecole-drtbt.neel.cnrs.fr/>) ou de conférences comme LTD (International Workshop on Low Temperature Detectors <https://www.ltd18.unimib.it/>).

La communauté s'est fédérée dans les années 1990 autour de quelques expériences (ballon PRONAOS, travail pionnier de l'IAS, début EDELWEISS, ballon Archeops, préparation de Planck,...). Le nombre de projet a explosé depuis. Le succès de Planck a démontré la maturité de la technologie et la communauté est aujourd'hui impliquée dans une myriade de projet (CUPID, EDELWEISS, Ricochet, QUBIC, NIKA2, KISS, CONCERTO, PACS, X-IFU Athena, LiteBird, S4, SPICA ...).

Les détecteurs cryogéniques mesurent la puissance ou l'énergie déposée dans un absorbeur par les effets thermiques induits. ils sont communément considérés comme cryogénique s'ils fonctionnent à des températures inférieures à l'hélium liquide (4K) et sont répertoriés en deux catégories.

Les bolomètres massifs, individuels, avec des applications principalement de types détections d'événements rares en astroparticules (Décroissance double beta sans neutrino ( $0\nu 2\beta$ ), Matière Noire, Diffusion Cohérente Neutrino-Noyau ( $CE\nu NS$ ))

Les matrices de bolomètres sont réalisées à l'aide de procédés de fabrication collectifs dans des centrales de technologies, et peuvent atteindre plusieurs milliers de pixels de petites tailles (mm). Les applications sont principalement en cosmologie dans le domaine sub-mm et IR avec une mesure de puissance mais peuvent couvrir une bande bien plus large sur le principe (y compris détection de particule X ou  $\gamma$ ).

Pour ces deux catégories, quatre types de senseurs sont utilisés, des thermomètres résistifs proches d'une transition métal-isolant, des thermomètres supraconducteurs (TES), des thermomètres magnétiques (non utilisés par l'IN2P3) et des résonateurs supraconducteurs à inductances cinétiques (KID). Pour ces derniers, c'est le nombre de quasi particules qui est mesuré en lieu et place de la température pour les trois autres.

### 3. Message de la communauté à l'IN2P3

La communauté est très active et reconnue à l'échelle internationale avec de grandes ambitions pour les dix prochaines années. La communauté est néanmoins fragile et **les risques sont importants devant la multiplication du nombre de projets** (effet ANR, ERC). Des **arbitrages financiers et de ressources humaines (chercheur et IT) sont nécessaires devant le grand nombre de projets** avec de possibles contradictions entre politique locale de laboratoires et nationale de l'IN2P3.

Les personnels non-permanents sont nombreux avec le risque important de perte de compétences (très spécifiques ici) pour la communauté à la fin de chaque CDD.

L'IN2P3 se positionne aussi sur des projets spatiaux mais le mode de fonctionnement (couple Instrumentation & Observation) n'est pas toujours adapté à une complète séparation dans le temps des contributions instrumentales (préparation de mission > 10 ans) suivies après lancement de l'exploitation scientifiques (observations). Le recrutement de chercheurs, intéressés à l'instrument lui-même, apparaît particulièrement indispensable pour la préparation de missions spatiales.

## Prospectives à 10 ans

### 4. Bolomètre massif

Le terme "bolomètre massif" s'emploie ici pour des détecteurs de masse individuelle macroscopique (>1g typiquement) et produits à l'unité, par opposition aux matrices de bolomètres. Longtemps uniquement associée à la détection d'événement rares (matière noire, double beta, décroissance très rare) la R&D a principalement été orientée vers une augmentation de la masse individuelle des détecteurs tout en maintenant les performances en résolution et en discrimination du fond nécessaires aux objectifs scientifiques. Les techniques employées sont principalement la double mesure ionisation chaleur pour les détecteurs cryogéniques semiconducteurs (dans la pratique Ge et Si) et la double mesure chaleur-lumière avec un choix de cristaux beaucoup plus large. **Les applications principales des bolomètres massifs avec des contributions de l'IN2P3 importantes sont :**

#### 4.1. Recherche directe de Matière Noire

La recherche de matière noire a longtemps été motivée par la recherche de candidats WIMPs provenant de modèles contraints de SUSY dans la gamme 10 GeV - 1 TeV.

EDELWEISS, dans son cryostat installé au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM), a utilisé jusqu'à 36 détecteurs Ge cryogéniques de 800g. Aujourd'hui les meilleures sensibilités sont détenues par des expériences comme LZ ou XENON, à base de gaz rare liquéfié, avec des masses actives avoisinant la tonne. L'absence de signal combinée à l'absence d'évidence de SUSY au LHC a mis un coup d'arrêt aux projets de grands ensembles de détecteurs cryogéniques au-delà des dizaines de kilogrammes déjà réalisées. En revanche, cela a permis l'éclosion de nouvelles idées, entraînant aujourd'hui un foisonnement de R&D détecteurs et instrumentation avec de nouveaux objectifs. Parmi ces objectifs figurent celui de balayer plus largement les masses de WIMPs jusqu'à environ 100 MeV ou encore de rechercher d'autres types de candidats de masse encore plus légère (SIMPs, Asymmetric Dark Matter, Axion-Like Particle, Dark Photon etc, [\[ref1\]](#) pour une revue) interagissant préférentiellement avec les électrons plutôt que le noyau. L'exploration de cette nouvelle plage de masses requiert une sensibilité à des signaux bien inférieure au keV, pour laquelle les bruits de fonds sont encore peu compris car d'origines très différentes de ceux étudiés dans les recherches précédentes. Ce domaine peut être entièrement exploré avec un ensemble de détecteurs d'une dizaine de kg voire moins.

EDELWEISS va se concentrer sur les 10 prochaines années sur l'abaissement de ses seuils de détections jusqu'à l'électron unique. De grand progrès on déjà pu être réalisés en réduisant la taille des détecteurs: les seuils en recul sont ainsi passés de quelques keVr il y quelques années à 50 eVr aujourd'hui. La stratégie de réduction des seuils, puis d'élimination des fonds, est présentée en plus de détail dans une contribution au GT06 [\[ref2\]](#).

#### 4.2. Diffusion cohérente neutrino-noyau ( $CE\nu NS$ ) et nouvelle physique au-delà du modèle standard

Cette thématique est en forte expansion depuis la première mesure de  $CE\nu NS$  par la collaboration COHERENT en 2016 [\[ref\]](#) avec des neutrinos d'énergie allant jusqu'à 50 MeV. Les détecteurs cryogéniques ont un grand rôle à jouer dans les dix prochaines années de par leur faible seuil de détection. En effet la nouvelle physique est surtout attendu avec de faibles transferts d'énergies induits par des neutrinos de quelques MeV.

L'IN2P3 est impliqué dans l'expérience RICOCHET dont l'objectif est la mesure de  $CE\nu NS$  auprès d'un réacteur (énergie moyenne des neutrino de 3 MeV). Les objectifs de R&D à atteindre dans les 3 ans sont des résolutions de 10 eV chaleur et 20 eV ionisation couplés à un pouvoir de discrimination recul électronique / recul nucléaire supérieur à 100. Une partie de la R&D (ERC CENNS à l'IP2I) sera réalisée en synergie avec EDELWEISS. A noter que le signal à mesurer est parfaitement connu et prévu par le Modèle Standard depuis 40 ans. Pour environ 1 kg de détecteur jusqu'à 20 interactions de neutrinos sont attendues suivant la puissance thermique des réacteurs envisagés et la distance de l'expérience au coeur. Il ne s'agit plus de détections d'événements très rares ! On trouvera une contribution plus détaillée dans le groupe GT06 [\[ref3\]](#).

### 4.3. Désintégration double-bêta sans neutrino ( $0\nu 2\beta$ )

L'IN2P3 a été historiquement impliqué dans les projets ANR-LUMINEU puis CUPID-Mo, actuellement en prise de donnée au LSM. Les R&Ds dans cette thématique dans les dix prochaines années vont être en grande partie réalisées dans le cadre de CUPID (CUORE Upgrade with Particle IDentification). En effet CUORE a démontré la possibilité de faire fonctionner 1000 détecteurs  $\text{TeO}_2$  cryogéniques de 750g chacun à une température d'environ 10 mK, ce qui est une véritable prouesse technologique et ouvre la voie aux futures expériences cryogéniques de grandes tailles. Néanmoins CUORE est limité par son absence de rejet actif du fond alpha qui pollue la zone d'intérêt située aux environ de 3 MeV. Des centaines de scientifiques sont impliqués dans CUPID dont une première étape est envisagée avec des bolomètres scintillants de type  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$  d'environ 300 g couplés à des détecteurs de lumière bolométrique sous forme de wafer de Ge de 5 cm de diamètre. La double lecture permet de s'affranchir d'une grande partie du fond alpha. L'implication de l'IN2P3 pourrait être très forte, en effet cette technologie est celle historiquement étudiée par CUPID-Mo au LSM.

Des R&D sont en cours pour augmenter encore la discrimination (les simulations montrent que les bêtas de surface, après les alphas, seront le prochain bruit de fond auquel il faudra s'attaquer), tout en simplifiant les détecteurs (ERC CROSS au CSNSM, avec un réfrigérateur dédié installé au LSC, Canfranc).

On trouvera une contribution plus détaillée dans le groupe GT06 [\[ref4\]](#).

### 4.4. Spectroscopie de neutrons rapides

La spectrométrie en énergie des neutrons rapides (50keV-20MeV) est confrontée traditionnellement à un compromis inévitable à faire entre résolution et efficacité au moment du transfert de l'énergie du neutron vers des particules ionisantes donnant un signal exploitable. Avec l'avènement des détecteurs bolométriques dans les années 1990, une nouvelle configuration est apparue, où la conversion de l'énergie du neutron lors de la réaction de capture par le lithium-6 peut se réaliser dans le détecteur lui-même. Les détecteurs cryogéniques ont atteint dans de nombreux domaines de la spectrométrie (X, alphas,..) des pouvoirs de résolution  $DE/E < 0.1\%$ . Conjugués à l'excellente résolution, il devient maintenant possible de concevoir des détecteurs de neutrons rapides de haute résolution énergétique, de bas seuil, ayant une bonne efficacité de détection. Ils fonctionnent sur la base de « une mesure–une énergie » (i.e. avec une information non dégénérée) grâce à la simple soustraction du Q de la réaction à l'énergie mesurée.

Ces détecteurs devraient combler une lacune dans l'arsenal des spectromètres de neutrons à disposition des physiciens nucléaires. Ils permettront également aux équipes engagées dans des recherches de physique fondamentale à l'aide de bolomètres massifs refroidis (détection de la matière noire §4.1, étude de la diffusion cohérente nucléaire des neutrinos §4.2) de disposer de détecteurs *in situ* dans leur réfrigérateur à dilution, contrôlant le fond de neutrons rapides qui est souvent un des bruits fondamentaux très difficilement maîtrisable de ces expériences.

Le développement massif de bolomètres radio-purs en molybdate de lithium enrichi en  $^{100}\text{Mo}$  pour la recherche de la double désintégration bêta sans neutrino de  $^{100}\text{Mo}$  est l'option de base retenue pour l'expérience bolométrique de prochaine génération CUPID, suite du projet CUORE (cf. §4.3). Ces futurs détecteurs, qui détectent parfaitement la réaction de

capture des neutrons thermiques avec une résolution inégalée de 5.9keV FWHM @ 4.78 MeV [ref5] pourraient également fonctionner en spectromètres de neutrons rapides, en enrichissant ces détecteurs en  $^6\text{Li}$ . C'est un des objectifs de la R&D d'étudier cette possibilité et d'explorer toutes les applications possibles.

Les principaux développements transverses envisagés sur les 10 ans à venir dans le cadre des bolomètres massifs sont :

#### 4.5. Senseurs thermiques

Le développement de senseurs thermiques à l'IN2P3 se fait sur trois technologies:

- Thermomètres Ge-NTD (Neutron Transmutation Doped Germanium)

Du germanium dopé par cette technique ne se comporte plus comme un semi-conducteur mais comme un isolant dit de Mott-Anderson, proche de la transition métal-isolant. Le dopage est habituellement ajusté pour avoir des thermomètres sous forme de pavés de quelques  $\text{mm}^3$  de résistances d'environ 1-100 MOhms à 20mK adaptées aux transistors type Si-FET ou HEMT (cf §8). Ces thermomètres sont collés sur les cristaux massifs.

La communauté française a démontré récemment (ANR LUMINEU) qu'il y a le potentiel technologique en France pour une production fiable de thermomètres NTD. Elle peut aussi continuer à compter sur les NTD produits dans les centres de recherche US (LBNL) avec lesquels elle collabore. La R&D à venir portera plus sur l'optimisation de la taille de ces senseurs, leur collage, la technologie des contacts, la mise au point de méthodes automatiques d'intégration.

- Films minces  $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$

Cette technologie est développée au CSNSM depuis une vingtaine d'années. Il s'agit d'un composant amorphe réalisé par co-évaporation sous vide sur différents types substrats. Pour des concentrations de Nb supérieures à 13% on obtient un matériau supraconducteur dont la transition supraconductrice est ajustable entre 0 et quelques degrés K. Ce système est utilisé comme Transition Edge Sensor (TES) dans divers projets de bolométrie en Astroparticules (EDELWEISS, QUBIC...). Sa forte sensibilité au régime dit "athermique" (phonons hors équilibre) peut être mis en profit dans le cas d'absorbeurs massifs pour améliorer le seuil en énergie et identifier le fond radioactif lié aux événements de surface. Il est envisagé d'utiliser une variante de ce système pour détecter l'ionisation dans des cristaux semiconducteurs en Ge ou Si. Par ailleurs, la faible conductivité à l'état normal du NbSi permet d'utiliser aussi bien une électronique front-end à base de SQUIDS, qu'à base de JFETs ou de HEMTs.

- KIDs

Il est difficile de différencier les développements des résonateurs KIDS proprement dit des détecteurs finaux. Cela vient du haut-niveau d'intégration des détecteurs. On note que les efforts porteront sur un abaissement des  $T_c$  des résonateurs en utilisant des matériaux autres que l'aluminium ( $T_c=1.4\text{K}$ ). Cela permet d'élargir la bande en fréquence de sensibilité aux photons (cf §6 le but est d'ouvrir jusqu'à 50 GHz-650 GHz).

L'abaissement des  $T_c$  est possible par l'utilisation de multicouches Al-Ti ou de matériaux plus exotiques.

L'abaissement de la  $T_c$  est utilisée aussi pour augmenter la sensibilité aux phonons hors-d'équilibre: pour des énergies supérieures au gap supra ces phonons vont pouvoir casser des paires de Cooper et ainsi modifier l'inductance cinétique. Cela ouvre la voie à

des applications basées sur des bolomètres massifs équipés de senseurs KIDS en détection de particules.

#### 4.6. Détecteurs bolométriques à amplification Neganov-Luke

Les détecteurs bolométriques semiconducteur (Ge ou Si) et pourvus d'électrodes sont capables d'amplifier les signaux provenant de la perte d'énergie par ionisation de particules. Le processus utilisé est l'accélération des charges sous le champ électrique appliqué puis la détection thermique de cette énergie dissipée par effet « Neganov-Luke ». Cela revient donc à mesurer l'ionisation par ses effets thermiques induits. L'amplification est proportionnelle au champ appliqué.

Une des problématiques à laquelle doit répondre la R&D est de limiter les courants de fuite dus au champs électrique appliqué dans le volume du détecteur ou aux interfaces électrodes-détecteur. Ces courants de fuite constituent la principale limitation de la technique. Les objectifs sont de pouvoir appliquer quelques centaines de volts pour une amplification effective de l'ordre de 100 [ref6].

Cette amplification peut-être utilisée dans le cadre de la **recherche directe de Matière Noire** pour abaisser les seuils de détections et atteindre des sensibilités inférieures à l'électron unique. Le quenching étant différent pour les reculs électroniques et nucléaires, la sensibilité à la paire électron-trou unique permet alors de retrouver de la discrimination à très bas seuil (projet Selendis et CRYOSEL).

Dans des cibles transparentes non scintillantes, n'émettant de la lumière que par effet Cherenkov, cette amplification permet de repérer les électrons/gammas et de rejeter le bruit de fond alphas de cibles engagées dans des expériences de **recherche de la double désintégration bêta sans neutrino**. Comme vu en §4.3, le fond alpha est actuellement le bruit de fond dominant de l'expérience CUORE au Gran Sasso dans des cibles en TeO<sub>2</sub>, à l'énergie de la réaction recherchée pour le <sup>130</sup>Te (2527 keV).

**L'amplification par effet Luke est donc une piste de R&D permettant d'atteindre une sensibilité à la paire électron-trou unique et au photon de scintillation unique.**

## 5. Matrices TES

Les bolomètres supraconducteurs (TES, Transition Edge Sensors) sont aujourd'hui couramment utilisées, en particulier pour la détection millimétrique. En France, le projet QUBIC [ref7] utilise des matrices de 256 TES NbSi refroidies à 350 mK pour former deux plans focaux de 1024 détecteurs afin de rechercher les modes B de la polarisation du CMB à 150 GHz. Bien que maîtrisée et bénéficiant d'une sensibilité démontrée, cette technologie demeure complexe à mettre en oeuvre, en particulier pour le déploiement de très grands plans focaux. Les développements actuels se concentrent sur le couplage à des antennes pour former des pixels multi-bandes et sensible à la polarisation, sur la multiplication de cette architecture sur de très grands plans focaux et sur la mise en oeuvre du multiplexage micro-onde (similaire à celui mis en oeuvre pour les KIDs). Les perspectives sont le projet S4 [ref8] dont l'objectif est de concentrer environ 500000 pixels dans le plan focal de télescopes pour l'étude de la polarisation du CMB.

## 6. Matrices KIDS

Les détecteurs à inductance cinétique (KID) sont une technologie de détection cryogénique de premier plan pour le domaine de l'astrophysique millimétrique de par la sensibilité des détecteurs et leur capacité à être assemblés en de grandes matrices. Les KIDs utilisent le multiplexage dans le domaine fréquentiel permettant la lecture de milliers de pixels sur un seul câble coaxial. A contrario de la situation aux États-Unis, en France, pour la gamme de fréquences de 80 à 300 GHz, la technologie KID est actuellement la solution la plus avancée en termes de performances. A titre d'exemple, Il a été démontré avec la caméra NIKA2, 3000 pixels, que les KIDs pouvaient avoir des performances BLIP (*Background Limited Instrument Performance*) pour des applications astrophysiques au sol dans la gamme de fréquences comprises entre 120 et 300 GHz. **La prospective pour la prochaine décennie est d'adapter ce développement vers la préparation de la prochaine génération d'instruments pour les observations astrophysiques au sol et dans l'espace (CONCERTO, S4 network, ...).**

Ce développement s'accompagne de R&D dédiées pour :

- Ouvrir la gamme de fréquences de fonctionnement jusqu'à 50 GHz-650 GHz. Pour cela l'idée est d'utiliser des résonateurs à basse  $T_c$  (env 500mK)
- Optimiser la sensibilité des matrices KIDs pour un environnement spatial
- Développer des matrices de KIDs pour intégrer les fonctionnalités multicolores et polarisations "on-chip"
- Étudier la susceptibilité aux particules pour minimiser leurs effets pour des application spatiales. Ce travail a des applications pour la détections propre des particules (détection de la matière noire, diffusion cohérentes des neutrinos, détection X, etc...) comme expliqué en §4.5
- Développer une nouvelle version d'électronique de lecture afin de maximiser le nombre de pixels lus sur chaque ligne. Plus de détails en §9.

Contribution détaillée au GT05 [\[ref9\]](#).

## 7. Matrices Si (CEA)

Seul le CEA est impliqué dans ces développements. Les agents CEA n'ayant pas été autorisés par leur direction à participer aux prospectives IN2P3, ce point n'est pas traité.

## 8. Chaînes de lecture et multiplexage

Les développements de détecteurs ultra-sensibles se font généralement conjointement à un développement de chaîne de lecture spécifique associée. De même, les détecteurs cryogéniques nécessitent une électronique de proximité qui doit présenter des caractéristiques hors norme:

- fonctionnement cryogénique
- ultra bas bruit
- résistances parasites quasi-nulle
- très basse consommation ...

Des développements spécifiques d'électroniques de lecture pour détecteurs cryogéniques sont activement menés à l'IN2P3 depuis des décennies à cette seule fin. Ainsi, des

composants supraconducteurs (SQUID, LC, PhaseShifter...) et semiconducteurs (HEMT AsGa, JFET, ASIC CMOS et SiGe) sont développés, étudiés et intégrés à des instruments (Edelweiss, Planck HFI, Herschel Pacs, QUBIC, ...) permettant d'exploiter pleinement le potentiel de sensibilité des détecteurs cryogéniques.

**Ces développements sont toujours indispensables à de nouveaux projets (X-IFU Athena, Ricochet, LiteBird, Spica ...) et nécessitent de renforcer des axes stratégiques (HEMT, ASIC ...) pour pérenniser les développements entrepris et explorer de nouvelles technologies.** Ces développements stratégiques amonts doivent aussi (en plus des détecteurs eux même) apparaître comme une opportunité pour participer à des instruments cryogéniques toujours plus ambitieux.

Par ailleurs, l'**augmentation croissante en nombre de pixels** pour l'ensemble des thématiques (CMB, X,  $\nu$ , DM) **impose le multiplexage front-end** comme technique de lecture. Après des années de développements et de compétitions entre multiplexeurs temporel TDM (PACS, QUBIC...) et fréquentiel FDM (X-IFU, LiteBird), une tendance lourde en faveur du multiplexage micro-onde ( $\mu$ Mux) à vu le jour notamment lors de la dernière conférence LTD (<https://www.ltd18.unimib.it/>). Le  $\mu$ Mux présente en effet l'avantage de combiner une polarisation DC des bolomètres (comme en TDM) et une répartition fréquentielle des canaux (comme en FDM). De plus, ce découplage de la polarisation des TES et de la fréquence des porteuses a permis de monter à des fréquences "micro-onde" rendant possible des taux de multiplexage de plusieurs centaines, à l'instar des KIDs. Ainsi, cette évolution a pour effet de faire converger les besoins en électronique de lecture et en technique de multiplexage des détecteurs TES et KID. On devine ici, sur ce seul aspect, que **les évolutions des multiplexeurs cryogéniques sont un enjeu majeur pour la participation de l'IN2P3 au déploiement et au succès des futures instruments cryogéniques.** Ce travail s'accompagne aussi de développements d'électronique de lecture spécifique, même si celles-ci fonctionnent en partie à température non-cryogénique (ADC/DAC, FPGA board ... ). Enfin, le déploiement sur site, et surtout les participations aux instruments spatiaux nécessitent encore d'améliorer (consommation, radiation) cet aspect incontournable de la lecture des détecteurs cryogéniques.

## Références

- [ref1] Contributions au GT06 <https://indico.in2p3.fr/event/19776/contributions/76201/>  
*Nature de la matière noire : panorama théorique et complémentarité des techniques de détection*
- [ref2] Contributions au GT06 <https://indico.in2p3.fr/event/19776/contributions/75432/>  
*The direct search for Dark Matter in the keV/c<sup>2</sup> to GeV/c<sup>2</sup> range through its interaction with nucleons or electrons using solid-state cryogenic detectors*
- [ref3] Contributions au GT06 <https://indico.in2p3.fr/event/19776/contributions/75407/>  
*Prospects for exploring new physics with Coherent Elastic Neutrino Nucleus Scattering*
- [ref4] <https://indico.in2p3.fr/event/19776/contributions/75406/>  
*CUPID: a next-generation  $0\nu 2\beta$  experiment*
- [ref5] *Development of  $100\text{Mo}$  -containing scintillating bolometers for a high-sensitivity neutrinoless double-beta decay search.* Armengaud, E. et al., [European Physical Journal C 77, Issue 11, 1 November 2017, Article number 785](#)

- [ref6] *An innovative bolometric Cherenkov-light detector for a double beta decay search.* Novati, V. et al., [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, Volume 912, 21 December 2018, Pages 82-84](#)
- [ref7] QUBIC: <https://arxiv.org/abs/1609.04372> + *Contributions au GT05 Bolometric Interferometry for CMB Polarization B-Mode Detection.*  
non encore disponible sur l'agenda indico du GT05 à l'écriture de cette contribution  
[https://prospectives2020.in2p3.fr/?page\\_id=18](https://prospectives2020.in2p3.fr/?page_id=18)
- [ref8] S4: <https://cmb-s4.org>
- [ref9] *Contributions au GT05 Cosmologie millimétrique du futur: développements instrumentaux critiques.*  
non encore disponible sur l'agenda indico du GT05 à l'écriture de cette contribution  
[https://prospectives2020.in2p3.fr/?page\\_id=18](https://prospectives2020.in2p3.fr/?page_id=18)

Les contributions scientifiques suivantes aux GT06 font intervenir des détecteurs et des techniques cryogéniques différents des bolomètres, non traités dans cette contribution mais avec de possibles implications futures de l'IN2P3

- GrAHal : un projet d'Haloscope à Grenoble pour détecter la Matière Noire axionique  
[https://indico.in2p3.fr/event/19776/contributions/75425/attachments/55183/72622/GrAHal\\_prospectives\\_IN2P3\\_v2.pdf](https://indico.in2p3.fr/event/19776/contributions/75425/attachments/55183/72622/GrAHal_prospectives_IN2P3_v2.pdf)
- Search for axion dark matter with a novel approach used by the MADMAX experiment  
[https://indico.in2p3.fr/event/19776/contributions/75431/attachments/55189/72628/Prop\\_GT06\\_MADMAX.pdf](https://indico.in2p3.fr/event/19776/contributions/75431/attachments/55189/72628/Prop_GT06_MADMAX.pdf)