

# GT DETECTEURS – Document de synthèse

Coordinatrices et rédactrices du document de synthèse : Véronique Puill (LAL), Ana Torrento (IPN)

Le groupe métier Détecteur a été créé fin mai pour répondre à la demande d'une partie des participants du GT thématique Instrumentation. Le groupe est constitué de 18 personnes IT et chercheurs (voir la liste en annexe 1) du CSNSM, LAL et IPN. Il n'y a pas de participant de l'IMNC ni du LPT.

Nous avons fait 5 réunions (1 par semaine) avec une présence moyenne faible de 5 participants. La prise de note s'est faite en ligne avec validation du compte rendu (CR) lors de la réunion suivante. Les CRs sont sur la page web du « calendrier général » aux dates suivantes : 23/05, 2/06, 6/06, 16/06, 23/06.

Le thème de la valorisation ainsi que l'analyse des éléments statistiques RH n'ont pas été traités (manque de temps).

## I. Le métier Détecteur

### I.1 Définition du métier

Nous nous sommes heurtés à la difficulté de définir ce qu'englobait la notion de « métier détecteur ». Il nous est apparu que lister les activités et compétences nécessaires pour l'exercer était une bonne approche.

Le travail de développement de chaînes de détections englobe de très nombreuses activités (liste précise et détaillée en annexe 2) :

- Conception
- Fabrication et assemblage
- Développement de l'environnement opérationnel du détecteur
- Caractérisation
- Mesures de contrôle
- Mise en œuvre
- Valorisation des résultats
- Encadrement et enseignement

Ces activités se déclinent dans des projets divers, allant de la R&D détecteurs non liée à une expérience de physique à la participation aux développements de chaîne de détections dans des projets nationaux ou internationaux.

Les compétences liées au métier Détecteurs sont nombreuses et diverses (voir liste détaillée en annexe 3) :

- Physique des détecteurs
- Simulation : étude thermique, simulation de la réponse de la chaîne de détection
- Chimie
- Utilisation de machines spécifiques
- Mécanique et micromécanique

- Électronique analogique
- Optique générique
- Polyvalence du développement d'outillages, pièces spécifiques et solutions techniques
- Contrôle-commande/ acquisition de données/ interface utilisateur
- Analyse de données

La diversité de ces compétences reflète bien la richesse de notre travail. Ces compétences se retrouvent dans le même groupe (plus ou moins peuplé selon les laboratoires) ce qui apporte une valeur ajoutée au projet (réactivité, efficacité, souplesse) et concoure au développement de conditions de travail agréables (convivialité, partage de connaissances, participation active des membres du groupe à chaque partie du projet).

L'IPN et le CSNSM fabriquent certains détecteurs. Ces activités nécessitent des investissements humains et en équipements importants :

Laboratoire silicium (IPN) : fabrication détecteurs silicium, prototypes et petites séries sur demande (IPNO ou extérieur). Caractérisation et tests. Ouverture à l'utilisation des installations seulement pour des utilisateurs experts (selon planning).

Laboratoire germanium (IPN) : maintenance de premier niveau de détecteurs germanium (pompage et recuit). Gestion et maintenance des parcs de détecteurs « Gamma Pool » et « Loan Pool ».

Fabrication scintillateurs (IPN) : à partir du matériel scintillant (cristal ou plastique) acheté, on procède à la mise en forme du détecteur (usinage, polissage, collage, habillage, moulage de pièces pour tenue mécanique).

Fabrication détecteurs gazeux (IPN) : fabrication de chambres à fils (fabrication des cadres, collage des circuits imprimés, tissage des fils, connexions électriques, dépôts métalliques (Al, Au, Cu) sur feuille de Mylar (PPAC)) puis test (étanchéité, claquage). Fabrication de prototypes, qui inclut aussi la conception avec le BE et la fabrication de circuits simples. « Service après vente » des détecteurs fabriqués.

Equipe Bolomètre (CSNSM) : fabrication de détecteurs bolométriques germanium, silicium, saphir sur projet, prototype et petites séries, évaporations de couches minces, photolithogravure, montage et tests cryogéniques.

## II. Contexte

### II.1 Activités et projets actuels

Nos laboratoires sont impliqués dans de nombreux projets de développements de chaînes de détections (voir annexe 4). Sur la vingtaine de projets listés, 30 % impliquent au moins 2 de nos 4 labos développant de l'instrumentation. 35 % des projets sont locaux (Orsay), 20 % nationaux et 45 % internationaux.

## II.2 Organisation du métier dans nos laboratoires

### Composition des services/groupes Détecteurs:

#### IPN

Service R&D détecteurs (RDD, 17 personnes) au sein de la division Instrumentation et Informatique (service électronique pour la physique et service informatique). Le RDD est constitué d'un pôle instrumentation comportant un BE électronique, un laboratoire de fabrication de Si, un laboratoire Ge et un pôle mécanique (conception et fabrication des détecteurs gazeux et scintillateurs). Le développement d'électronique intégrée multivoie est confiée au service électronique.

#### CSNSM

Il y a 6 IT « détecteurs » au sein du service instrumentation (15 IT). Ces IT font partie du groupe détecteur (créé en 1990) composé également de chercheurs. Les électroniciens sont dans des groupes différents. Les chercheurs et/ou les ingénieurs font certains dessins des ensembles de détection.

#### LAL

Groupe R&D détecteurs (GRED, 8 personnes) au sein du SERDI (service électronique et instrumentation de 42 personnes - 5 groupes). Compétences en électronique et mécanique dans le groupe (mais BE mécanique dans un autre service). Le développement de la chaîne de détection se fait en interne mais la réalisation de grands détecteurs (ex : calorimètre d'ATLAS) et d'électronique intégrée multivoie est confiée à d'autres groupes ou services techniques.

Groupes de Physique (ATLAS Pixels, SOLID, BiPo) dans lesquels les activités de développement de détecteurs sont menées principalement par les chercheurs, soit parce qu'ils sont eux-mêmes instrumentalistes, soit parce qu'il n'y a pas assez de ressources au GRED pour les aider à ces développements.

### Organisation

En général, les différents métiers (détecteurs, électronique, mécanique) sont intégrés dans les services concernés par le métier détecteurs, ce qui permet une interaction directe et facile entre les personnes et alimente la multidisciplinarité. Cela, avec la proximité des lieux de travail techniques (petits ateliers, salles de mesures, manips, etc.), permet une bonne réactivité et un confort de travail qui résulte très productive.

Les **points communs ou de ressemblance** entre nos services/groupes dans la manière dont est organisé l'activité et le travail des agents sont les suivant :

- ✓ Développement de la polyvalence (mécanique, électronique,...) dans chaque groupe et forte interaction entre les différents métiers.
- ✓ Les mécaniciens et électroniciens spécialisés dans le domaine des détecteurs font partie du service ou groupe Détecteurs (LAL et IPN).

- ✓ Travail en collaboration étroite avec les chercheurs dès le début du projet (participation à la conception, simulation et au design).
- ✓ Travail de R&D propre mené par des IT (financement labo ou IN2P3).
- ✓ Validation de la participation des agents à un nouveau projet par le responsable de service après vérification des implications en cours et des priorités (LAL et IPN).
- ✓ EEA réalisé par le chef de groupe ou de service (1 responsable SIRHUS/ ≈ 6 agents)

Néanmoins on dénombre quelques **différences notables** :

- Pas de validation par le responsable de service de l'affectation d'un agent à un nouveau projet (CSNSM).
- Chercheurs et IT dans le même groupe « Détecteurs » (CSNSM).
- Au LAL, de nombreux électroniciens et mécaniciens des autres services techniques sont aussi spécialisés dans les développements pour les détecteurs.

### II.3 Locaux techniques

Le développement de détecteurs dans nos groupes/service se fait grâce à des équipements/installations spécifiques dont la proximité est nécessaire :

- petits ateliers mécaniques
- salles de tests spécifiques (contrôlée radioactivité, salle blanche, climatisées,...)
- salles de montage avec pont roulant
- établis dans nos bureaux/salles de tests (soudure, petits montages, polissages,...)
- accès à une base de données des locaux techniques des labos → connexion avec le GT « Ateliers et locaux techniques »

Dans le cas du CSNSM, les locaux "techniques" sont très spécifiques: cryostats à dilution, salle blanche avec parc d'évaporateurs... qui sont saturés en demandes de manips, ce qui rend difficile une ouverture très grande vers l'extérieur.

Dans le cas de fabrication de détecteurs Si à l'IPNO, l'accès est ouvert (selon planning) mais seulement aux experts en fabrication de détecteurs semi-conducteurs.

### II.4 Utilisation de plateformes technologiques

Dans la fabrication/caractérisation de détecteurs l'utilisation de machines très spécifiques est parfois nécessaire. Ces machines ne sont pas forcément présentes dans nos laboratoires (utilisation peu fréquente ou prix trop élevé), donc pour certaines opérations on fait appel aux plateformes technologiques. Chaque plateforme a un mode d'accès différent (modèle économique sans intervention de l'utilisateur, modèle économique avec formation des utilisateurs, mode collaboration avec formation

des utilisateurs et participation dans le développement technique (via achat de matériel) et informatique de la plateforme, etc.).

#### **CAPTINNOV : machine à pointes et machine à bonder semi-automatique**

Le LAL l'utilise dans le cadre du projet ATLAS pixels, en commun avec le CEA, pour la production de détecteurs pixel pour l'upgrade du LHC (caractérisation « à nu » avec machine à pointes, bonding avec machine semi-automatique).

Intérêt de l'IPNO pour la caractérisation et réparation de détecteurs silicium multipistes, mais pour l'instant pas d'utilisation envisagée à court terme.

#### **SEMIRAMIS : accélérateurs d'ions, MET, FIB**

Le CSNSM utilise en interne la plateforme locale du CSNSM Semiramis pour des expériences d'implantation, irradiation, spectroscopie Rutherford, microscopie... Malgré des plannings bien définis mensuellement pour la plateforme, il y a toujours la possibilité en cas de besoins d'avoir une réactivité suffisante pour gérer des demandes non prévues.

L'IPNO l'utilise pour implantations de couches résistives dans les détecteurs silicium à localisation.

#### **PANAMA : compact SIMS**

Le LAL l'utilise dans le cadre du projet ATLAS pixels, caractérisation du profil de dopage pour l'affinement des simulations et l'étude des effets des irradiations dans les détecteurs.

#### **C2N (IEF + LPN):**

Le CSNSM collabore avec le C2N pour toute la partie photolithographie et autres mesures spécifiques liées à ces techniques. Pour cela il y a budget pour l'utilisation des ressources de l'IEF.

L'IPNO l'utilise pour la découpe de wafers de silicium. Début de formation à la machine à bonder (manuelle) sans suite.

### **III. Evolutions du métier, expertise en risque d'extinction, taille critique des groupes**

#### **III.1 Evolution récente des métiers « détecteurs »**

##### **CSNSM**

Design du détecteur (bolomètre) fait en collaboration IR (avec thèse et formation physique du solide et des matériaux) et chercheurs, permettant une évolution continue des connaissances et une "formation continue" interne très efficace. R&D propres menées par les IRs.

##### **IPN**

- Tests (photodétection et Germanium) : évolution vers plus de formation aux utilisateurs (étudiants, stagiaires, chercheurs,...) des bancs de tests pour parer au manque de personnel dédiés aux tests, mais valorisant pour le formateur (laisse plus de temps pour développer d'autres compétences ou d'autres bancs de tests).
- Développement de plus de compétence, augmentation de la polyvalence pour répondre aux besoins des expériences (personnel limité mais de plus en plus de demandes).

- Spécialisation des mécaniciens aux techniques particulières liées au montage des détecteurs + prototypage impression 3D.
- Semiconducteur : spécialisation accrue de la personne faisant la maintenance Ge, évolution vers des techniques de bonding pour les détecteurs Si (machine manuelle ou semi-automatique).

#### LAL

- Accroissement de la polyvalence de chacun pour faire face au manque de personnel.
- Déséquilibre IR (5) /AI - T (2)
- Diminution des postes de CR en Instrumentation → tous les IR du groupe détecteurs ont une thèse
- R&D propres menées par les ITs car plus assez de chercheurs instrumentalistes proposant des développements de nouveaux détecteurs

### III.2 Expertise en risque d'extinction, taille critique, faiblesses

#### IPN

- Détecteurs semi-conducteurs : groupe sous critique (1 expert Si + 1 personne Ge) → risque fort d'arrêt d'activités (Si), limitation des projets pour les détecteurs Ge et Si (pour y palier, formation des chercheurs dans la maintenance du Ge), perte de compétences si l'expert quitte le labo.
- Photodétection / détecteurs gazeux : 2 personnes expertes (à court terme) en montage, cad. une personne experte forme en interne depuis 2 ans une deuxième personne.
- Besoin de doubler les bancs de test Ge (qui seraient utilisés par les chercheurs/stagiaires formés)
- Problème d'accès aux ateliers mécaniques (nettoyage encore à faire suite à désamiantage).

#### LAL :

Taille critique du groupe : 1 technicien mécanicien (à la retraite dans 4 ans), 1 instrumentaliste généraliste (AI) à 50 % (détecteur/accélérateur), 1 IR part en mobilité mi 2017, 1 IR (simulation Geant4/analyse ROOT) en CDD (fin de contrat 2018)

#### CSNSM :

- Jouvence de certains matériels quelque fois obsolètes : alim. HT, système de climatisation, de mesures...

### IV. Formation & enseignement

Les ITs de nos groupes participent à des actions d'encadrement et de formation.

#### CSNSM :

- ✓ encadrement de stagiaires et thésards
- ✓ encadrement de TP
- ✓ Cours de détection donnés au CNAM

#### LAL :

- ✓ Tutoriaux détecteurs dans les workshops et conférences
- ✓ Cours détecteurs dans les écoles CERN

- ✓ Encadrement de stagiaires (5/an) et de thésard rattaché au groupe (1), participation aux MasterClass, accueil de stagiaires de 3<sup>ième</sup> (10/an)
- ✓ Projet d'une école IN2P3 Photodétection

### **IPN**

- ✓ Accueil et encadrements de stagiaires
- ✓ TP de détection donnés au CNAM

## **V. Projection**

La collaboration inter-laboratoire dans les différents projets est enrichissante et pourrait être renforcée en privilégiant plus de dialogues entre services techniques des différents laboratoires: plus de réseaux locaux, séminaires communs techniques sur des thématiques projets ou simplement technologiques.

Quelque soit la structure actuelle ou future de nos laboratoire, nous avons listé les points importants qui nous permettent (permettraient) de travailler dans de bonnes conditions tout en assurant notre mission auprès des expériences de nos laboratoires :

- Les groupes ou services Détecteurs (photodétecteur, gazeux, semiconducteur, bolomètres,...) ne doivent pas être de grandes structures (maximum 15 personnes) afin de garder la proximité avec son responsable hiérarchique.
- Les groupes doivent disposer de compétences couvrant tout le champ nécessaire au développement de détecteur : physique des détecteurs, mécanique, électronique, DAQ,...
- La proximité et l'interaction forte avec les physiciens est indispensable.
- Les agents doivent pouvoir travailler sur plusieurs thématiques s'ils le désirent et ne pas être « rattachés » à un groupe de physique où une thématique particulière.
- Nos salles de tests, petits ateliers mécaniques et électroniques à proximité des bureaux et manip sont nécessaires.
- Nous souhaitons continuer à nous investir dans des actions de formation et d'enseignement.

Pour le CSNSM, une organisation en petits groupes reste la meilleure façon de faire de la R&D efficace, réactive et multiforme. Une grande unité, avec forcément une hiérarchisation poussée et de nombreuses strates parait contre-productive dans cette optique. Le renforcement des dialogues ne nécessite pas de restructuration.

Quelque soient les avis positifs ou négatifs au projet de refondation exprimés, il y a une forte inquiétude sur ce que cela pourrait impliquer par rapport au choix des priorités dans les projets et de l'influence sur notre façon de travailler et sur l'évolution de nos carrières.

## ANNEXE 1

### Liste des participants au GT Détecteurs

Nom	Prénom	Labo
BERGÉ	Laurent	CSNSM
BETTANE	Julien	IPNO
BLANC	Emmanuel	IPNO
DUMOULIN	Louis	CSNSM
FALOU	Alain	LAL
HAUSCHILD	Karl	CSNSM
JOSELIN	Michaël	IPNO
LE VEN	Valerie	IPNO
LOAIZA	Pia	LAL
MACHEFERT	Frédéric	LAL
MARNIEROS	Stefanos	CSNSM
NGUYEN TRUNG	Thi	IPNO
OLIVIERI	Emiliano	CSNSM
PEYRÉ	Jean	CSNSM
PRESSARD	Kevin	IPNO
PUILL	Véronique	LAL
THIERRY	Redon	CSNSM
TORRENTO	Ana	IPNO



## ANNEXE 2

### Les activités du métier détecteur

#### **Conception et Simulation:**

- Conception ou étude de la réponse

#### **Fabrication et assemblage:**

- Traitement de surface: mécanique, chimique
- Évaporation des métaux
- Implantation
- Lithographie
- Montage en boîtier
- Fabrication des chambres à fils
- Usinage/polissage/collage/habillage de scintillateurs
- Prototypage

#### **Développement de l'environnement opérationnel du détecteur :**

- Montage en boîtier
- Développement d'embase de PMT et MCP-PMT
- Développement de l'électronique frontale (chambres à fils)

#### **Caractérisation (propriétés intrinsèques)**

- Courant de fuite
- Résolution: énergie, position, temps
- Gain
- Efficacité de détection
- Résistance aux radiations
- Claquage
- Etanchéité
- Bruit de fond
- Etalonnage, calibration

#### **Mesures de contrôle:** après utilisation ou long stockage, monitoring

#### **Mise en œuvre (proto ou détecteur final) :**

- Polarisation des détecteurs
- Chaîne d'acquisition
- Test fonctionnel
- Caractérisation (source, faisceau, ...)
- Traitement et analyse de données
- Montage sur site, debug
- Commissioning

#### **Valorisation des résultats**

- Rédaction de rapports, notes techniques, articles

- Présentation en conférences

**Activités associées :**

- Formation des étudiants (stage, thèse, apprenti)
- Formation des utilisateurs à l'utilisation des bancs de tests
- Participation aux réseaux métiers, thématiques

## ANNEXE 3

### Les compétences du métier Détecteur dans nos laboratoires

- **Détecteurs :**  
Photodétecteurs, détecteurs gazeux, semiconducteur, détecteurs cryogéniques
- **Simulation :** étude thermique, simulation de la réponse de la chaîne de détection  
Outils: CATIA, Silvaco, Synopsys, GEANT4, Garfield, “home made”
- **Chimie** (traitement de surface)
- **Utilisation de machines spécifiques :** évaporateurs, cryostat à dilution, pompes à vide, station tests sous pointes
- **Mécanique et micromécanique :** étude (dessin), conception, fabrication, prototypage  
Outils : CATIA, Autocad, tour, fraiseuse, centre d’usinage à commande numérique, imprimante 3D
- **Electronique analogique :** étude, conception, CEM, fabrication, prototypage - Outils : PADS, ALTIUM
- **Optique générique :** mise en œuvre de sources lumineuses, de composants optiques et optomécaniques
- **Polyvalence du développement d’outillages, pièces spécifiques et solutions techniques**
- **Contrôle-commande/ acquisition de données/ interface utilisateur :** développement software de systèmes (pouvant être automatisés) - Outils : Labview, MATLAB, MAESTRO
- **Analyse de données** - Outils : MATLAB, ROOT, Labview, Excel, MAESTRO, IDL

## ANNEXE 4

### Liste des projets de développement de chaînes de détection en cours

Les projets communs LAL, CSNSM, IPN sont soulignés.

#### Projets locaux :

- ✓ Développement d'une TPC pour le projet **ALERT (IPN)**: R&D fils de Carbone : mécanique + tests du détecteur gazeux
- ✓ **SUCRE (CSNSM)** : R&D en Physique des Solides, détection à base de NbSi de photon
- ✓ **GAMINS (IPN, CSNSM, IMNC)** : développement de détecteurs sensibles à la position (scintillateurs inorganiques + matrice SiPM et MaPMT) : tests et mesures, reconstruction de position (réseau de neurones)
- ✓ **R&D mesure de position pour l'imagerie  $\gamma$  (CSNSM)** : cristaux scintillants + matrices de SiPMs, tests et reconstruction de position d'impact
- ✓ **PRAE (LAL, IPN, IMNC)** : développement de la plateforme instrumentale de l'accélérateur PRAE
- ✓ **CORTO (LAL, IPN, CSNSM)** : télescope à rayons cosmiques
- ✓ **PASPAG (IPN)**: nouveaux scintillateurs (R&D pour Phy Nu): CLLB (scintillateur inorganique sensible aux neutrons), LaBr3 :Ce,Sr : tests et mesures, interaction privilégiée avec St Gobain
- ✓ **NPS – Gluonométrie (IPN)** : tests PbWO4, traitement on-line de scintillateurs vieillis par la radiation : tests

#### Projets nationaux :

- ✓ **CALIPSO (CSNSM)** : développement d'une grille de Frisch (couche minces de très haute résistivité de 10 à 20 GOhm, croissance de Diamant)
- ✓ **ComptonCam (CSNSM, IPN, THEORIS, SYSTEL)** (démantèlement installation nucléaire): gamma caméra : scintillateurs + SiPMs, détecteur Si (+ ASIC) à température ambiante : intégration (refroidissement), tests
- ✓ **COCOTE Ballon (CSNSM)** : développement de chaînes de détection embarquées sur Ballon dans le cadre d'ASTROGAM.
- ✓ **Cherenkov Lab (LAL, IPN, CSNSM)** : développement d'une chaîne de détection Cherenkov picoseconde : simulation, mécanique (brasage Quartz/métal), tests Quartz + photodétecteurs (MCP-PMT, matrices SiPMs)

### Projets internationaux :

- ✓ **UA9 (LAL)** : pour le CERN, développement d'une chaîne de détection Cherenkov compatible ultra vide pour le SPS et le LHC (résistante aux radiations) permettant la mesure de flux : simulation, intégration, tests
- ✓ **EDELWEISS (CSNSM)** : R&D bolomètres (det Ge, gros détecteur/plus petits et plus nombreux), couplage des thermomètres (NbSi) plus efficace en terme de rejection de bruit de fond, développement de l'effet Luke
- ✓ **Double  $\beta$  (LAL)** : chaîne de détection scintillateur liquide + photodétecteur (matrice SiPM, MaPMT)
- ✓ **CTA (IPN)** : développement d'un système de calibration des caméras NECTARCAM
- ✓ **ATLAS Pixels (LAL)** : design et caractérisation de détecteur Si pixels pour le tracker d'ATLAS : simulation, design, caractérisation.
- ✓ **QUBIC (CSNSM, LAL)** : développement de matrices de bolomètres (300 mK) pour la détection de polarisation du CMB. Optimisation du rendement des matrices (pour l'instant yield = 2/78)
- ✓ **Bolomètres scintillants pour la double  $\beta$  (CSNSM)** : LUMINEU, LUCINEU, CUPID, CLYMENE
- ✓ **Mesure de moment magnétique du Baryon  $\Lambda_c$  (LAL)** : au CERN, mesure de flux dans le LHC à 40 MHz