

1. Éléments structurant le développement du travail :

Entre le 30 mars 2012 et le 29 juillet 2015, le projet T2DM2 « *Tomographie temporelle de la densité par mesure du flux de muons* » s'est déroulé avec le support financier de la Fondation MAIF et dans le cadre de la convention et de son avenant signés entre le CNRS et la Fondation MAIF pour le compte du LSBB les 30 mars 2012 et 06 juin 2012. Le support financier a été utilisé pour réaliser les actions suivantes :

- Financement de la thèse de Mme Fanny HIVERT entre le 1 juin 2012 et le 30 mai 2015, thèse soutenue le 2 juillet 2015 après extension du contrat de thèse sur le mois de juin sur ressources propres LSBB. Le manuscrit de thèse final est joint aux documents associés à ce rapport (*Cf. 03-these_Hivert_Fanny.pdf*). Les documents suivants sont également joints, ils concernent les avis des rapporteurs préalables à la soutenance, le rapport de soutenance et les modalités de soutenance :
 - *Rapporteur n°1* :
05-Rapport_soutenance_these_fanny_hivert_02072015.pdf
05-Avis_manuscript_these_fanny_hivert_02072015.pdf
 - *Rapporteur n°2* :
05-Rapport_maitre_recherche_these_fanny_hivert_02072015.pdf
05-Avis_manuscrit-2_these_fanny_hivert_02072015.pdf
 - *Rapport de soutenance* :
05-Rapport_sur_la_these_fanny_hivert_02072015.pdf
05-Avis_soutenance_these_fanny_hivert_02072015.pdf
05-Avis_jury_these_fanny_hivert_02072015.pdf
 - *Administration* :
05-Arrete_these_fanny_hivert_02072015.pdf
05-Modalité_these_fanny_hivert_02072015.pdf
05-Validation_depot_electronique_these_fanny_hivert_02072015.pdf
- Acquisition des équipements nécessaires et construction d'une caméra¹ muons MUST² basée sur le détecteur Micromegas utilisé dans une chambre à projection temporelle. Au financement issu de la Fondation MAIF pour cette première caméra, un financement complémentaire a pu être trouvé par le LSBB pour construire 5 autres caméras muons (FEDER PFM LSBB, ressources propres LSBB). Le concept instrumental initialement défini avec M. Pierre Salin entre 2008 et 2013, a été repris en termes de conception, de design et de réalisation opérationnelle dans le cadre du contrat à durée déterminée attribué à M. Ignacio Lázaro Roche financé sur ressources propres du LSBB du 1^{er} octobre 2014 au 31 juillet 2015. Le contrat de M. Ignacio Lázaro Roche a été mis en place à la suite du départ du projet en juillet 2014 de M. Pierre Salin, jusqu'alors chef de projet pour le développement de la caméra. Par ailleurs, la mise en forme des mesures issues des caméras a été développée par M. Thomas Serre, Post-doctorant cofinancé par le LSBB sur ses ressources propres et par l'INSU du 1^{er} novembre 2014 au 31 octobre 2015.
- Caractérisation du flux de muons avec l'installation des scintillateurs liquides du projet ANTARES² dont l'utilisation a été facilitée par le CPPM³, à la fois pour leur déploiement, mais aussi pour leur maintenance et leur fonctionnement. Les observations ont permis de valider expérimentalement une partie des résultats issus des simulations faites par Mme Fanny Hivert dans le cadre de son travail de thèse. Cet

¹ *Caméra muon MUST²* : Cette dénomination remplace la dénomination initiale de *télescope à muons*. La notion de *caméra* étant mieux adaptée à décrire le processus de mesure. L'acronyme MUST² signifie « *Muon Survey Tomography based on Micromegas detectors for Unreachable Sites Technology* »

² ANTARES : <http://www.cnrs.fr/cw/fr/pres/compress/antares.html>

³ Centre de Physique des Particules de Marseille : <http://www.cppm.in2p3.fr>

accord majeur entre simulation et observation a permis l'ouverture de perspectives très positives pour la continuation du projet, perspectives dont la concrétisation est résumée au paragraphe 3 ci-dessous.

2. Valorisation des résultats

Les travaux menés suivant ces 3 axes principaux ont été valorisés sous plusieurs formes, conférences internationales et réunions de travail interne au consortium RD51 du CERN dont les références sont indiquées au paragraphe 4 ci-dessous et réunions de travail interne au groupe T2DM2, réunions de présentation de T2DM2 à l'extérieur du LSBB, conférences et réunions ouvertes organisées par le LSBB. L'ensemble des publications, résumés et résumés étendus (*proceedings*) constituent les documents joints à ce rapport avec la nomenclature suivante :

CONF-...	Conférences internationales
RTINTERNE-...	Réunions de travail internes au groupe T2DM2
RTEXTERNE-...	Réunions de présentation de T2DM2 à l'extérieur
WSLSBB-...	Conférences et réunions ouvertes organisées par le LSBB
RD51-...	Réunions de travail interne au consortium RD51 du CERN

Les liens ci-dessous conduisent directement aux sites des conférences auxquelles l'ensemble des membres du groupe T2DM2 a pu participer :

https://indico.cern.ch/event/365380/session/7/contribution/16/attachments/726489/996951/RD51_miniweek_Thomas.pdf

https://indico.cern.ch/event/365380/session/10/contribution/23/attachments/726492/996954/RD51_miniweek.pdf

<https://indico.cern.ch/event/365380/other-view?view=standard>

http://indico.cern.ch/event/176664/session/3/contribution/34/attachments/229656/321307/Coll_Meeting_RD51_W1_T2DM2-21_02_12.pdf

<http://www.lsbb.eu/index.php/fr/lsbb-days-3-4-juin-2015>

http://www.fondation-maif.fr/notre-action.php?rub=1&sous_rub=2&id=114

<https://indico.in2p3.fr/event/6275/session/4/contribution/80/material/slides/0.pdf>

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2013AGUFM.H31G1274H>

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2014EGUGA..16.7358H>

<http://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2014/03/e3sconf-idust2014-01003/e3sconf-idust2014-01003.html>

3. Evolutions du projet depuis le 1er septembre 2015

Une bourse CIFRE a démarré au 1^{er} septembre 2015 avec la société *IRIS Instruments*⁴. Elle a été attribuée à M. Ignacio Lázaro Roche, inscrit à l'*Université Nice Sophia-Antipolis* afin de fiabiliser, durcir, rendre ergonomique les caméras développées et de les déployer sur un nombre réduit de sites dans le but de faire la démonstration de leur efficacité.

2 brevets sont en cours d'étude par la SATT Sud-Est⁵ pour l'ensemble des travaux réalisés jusqu'au 31 août 2015. Ils concernent d'une part le traitement du gaz nécessaire au fonctionnement de caméras muons (classe de détecteur MPGD⁶, détecteurs gazeux pixellisés) et d'autre part la constitution de la mesure via les caméras MUST² mises au point dans le projet T2DM2.

Aujourd'hui, le LSBB dispose de 6 caméras de première génération mais dans des états de fonctionnement très différenciés : Une caméra uniquement reste opérationnelle ; 3 caméras ont présenté des pannes se traduisant par une extinction partielle des détecteurs Micromegas, ces pannes sont en cours d'expertise au CERN afin d'identifier les causes et d'y apporter les solutions qui seront implémentées sur la deuxième génération de détecteurs ; les 2 dernières caméras sont en attente de réception des détecteurs Micromegas qui ont suivi un parcours plus complexe de transfert de technologie entre le CERN et la société *ELVIA* avant finalement de revenir en fabrication au niveau du CERN.

Les logiciels de lecture des données issues des caméras permettent aujourd'hui d'établir des cartes de flux de muons en fonction du zénith et de l'azimut d'incidence des muons sur la caméra. Ces cartes sont le point d'entrée du processus de tomographie de la densité. Dans l'objectif d'initier ce processus, le contrat Post-doctoral de M. Thomas Serre en charge de ces développements, est prolongé sur ressources propres du

⁴ IRIS Instruments : <http://www.iris-instruments.com>

⁵ SATT Sud-Est : <http://www.sattse.com>

⁶ MPGD : voir <http://rd51-public.web.cern.ch> pour une description complète des enjeux liés à ces détecteurs

LSBB jusqu'en avril 2016 pour identifier les codes tomographiques existants et développer la représentation graphique des flux sous une topographie tri-dimensionnelle. Le *BRGM*, le *LSBB* et *IRIS Instruments* sont en recherche d'un financement permettant de prolonger jusqu'en avril 2017 la position de M. Thomas Serre dans le but d'implémenter les codes de tomographie de manière opérationnelle dans le contexte des sites de démonstration instrumentés dans le cadre du contrat CIFRE de M. Ignacio Lázaro Roche.

Demain, sur la base du projet FEDER 2014-2020 du *LSBB* validé le 24 septembre dernier par le service Europe de la région PACA, la construction de nouvelles caméras peut être engagée dès 2016. Il s'agira dans un premier temps de définir un nouveau design pour la deuxième génération de caméras. Le nouveau design prendra en compte la dissociation entre le détecteur Micromegas et sa grille, l'arrivée de nouvelles électroniques auto-déclenchées, un meilleur confinement de la chambre de dérive et les améliorations nécessaires identifiées à partir des 6 caméras de la première génération. Ces modifications donneront plus d'ergonomie d'utilisation et amélioreront la fiabilité des caméras. Ces développements sont au cœur du travail de M. Ignacio Lázaro Roche dans le cadre de la thèse CIFRE qu'il entreprend chez *IRIS Instruments*.

4. Conférences et proceedings de conférences

- Gaffet S., P. Salin, F. Hivert, J. Busto, J.-B. Decitre, X. Martin, J. Wotschack, H. Muller, R. de Oliveira, O. Pizzirusso, V. Polychronakos, I. Giomataris, D. Attie, D. Calvet, É. Delagne, and F. Druillole (2011) T2DM2 a telescope array for rock mass density imaging based on muon TPC with Micromegas detector. EGU 2011, poster
- Hivert F., J. Busto, J. Brunner, P. Salin, and S. Gaffet (2013) Densitometric tomography using the measurement of muon flux. AGU 2013, poster et présentation orale
- Hivert F., J. Busto, S. Gaffet, J. Brunner, J.-B. Decitre, I. Lázaro Roche, and X. Martin (2014) Muon tomography of rock density using Micromegas - TPC telescope. EGU 2014, présentation orale
- Hivert F., I. Lázaro Roche, J.-P. Ernenwein, J.-B. Decitre, J. Busto, and S. Gaffet (2014) Spatial and temporal variation of the rock density estimated from muon flux measurements. RST 2014, poster
- Hivert F., J. Busto, S. Gaffet, J.-P. Ernenwein, J. Brunner, J.-B. Decitre, I. Lázaro Roche, and X. Martin (2014) Transferts hydrologiques et variations spatio-temporelles de la densité : estimations à partir de la mesure du flux de muons. RST 2014, présentation orale
- Hivert F., I. Lázaro Roche, J. Busto, J.-P. Ernenwein, J. Brunner, J.-B. Decitre, X. Martin, and S. Gaffet (2015) Temporal tomography of the rock density using muons measurements (T2DM2). ISRM 2015, présentation orale
- Hivert F., I. Lázaro Roche, J.-B. Decitre, S. Gaffet, J. Busto, J.-P. Ernenwein, J. Brunner, and X. Martin (2015) Temporal tomography of rock density using muon measurements with TPC-Micromegas. ISRM Proceedings
- Hivert F., I. Lázaro Roche, T. Serre, J.-B. Decitre, J. Brunner, J. Busto, and S. Gaffet (2015) Muography sensitivity to hydro-geological rock density perturbation: roles of the absorption and scattering on the muon flux measurement reliability. Near surface Geophys, en cours de révision
- T2DM2, status and report. RD51 symposium, février 2012, présentation orale
- T2DM2, status and report. RD51 symposium, avril 2012, présentation orale
- T2DM2 Status update. Introduction of MUST² Detector. RD51 symposium, mars 2015, présentation orale
- Preliminary results with MUST² Detector. RD51 symposium, mars 2015, présentation orale