



HAL
open science

Conception, développement et analyse d'essais de caractérisation en environnement spatial des cartes électroniques de l'instrument ECLAIRs

Maël Galliano

► **To cite this version:**

Maël Galliano. Conception, développement et analyse d'essais de caractérisation en environnement spatial des cartes électroniques de l'instrument ECLAIRs. Autre. 2021. dumas-03602514

HAL Id: dumas-03602514

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03602514v1>

Submitted on 9 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
CENTRE REGIONAL ASSOCIE DE IPST CNAM Toulouse

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

Le **DIPLOME D'INGENIEUR CNAM**

SPECIALITE : Mesure-Analyse

OPTION : Instrumentation qualité

Par

Maël GALLIANO

Conception, développement et analyse d'essais de caractérisation en environnement spatial des cartes électroniques de l'instrument ECLAIRs

Soutenu le 24 Septembre 2021

JURY

PRESIDENT : **Monsieur Marc HIMBERT**
Responsable filière EI Cnam "instrumentation et mesure"

MEMBRES : **Monsieur Vincent WAEGEBAERT**
Responsable Électronique de l'instrument ECLAIRs et Tuteur IRAP

Monsieur Talal MASRI
Directeur de l'IPST-CNAM et tuteur IPST CNAM

INVITES : **Monsieur Roger PONS**
Chef de projet de l'instrument ECLAIRs

Monsieur Baptiste MOT
Ingénieur de recherche CNRS au sein de l'IRAP

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais dans un premier temps remercier monsieur Roger Pons, chef de projet ECLAIRs et ancien directeur technique de l'Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP), qui m'a accordé sa confiance sur ce fabuleux projet et fait découvrir le CNAM en tant qu'ancien élève du centre régional associé de Toulouse. Je le remercie également pour avoir pris le temps de relire ce rapport.

Je remercie également mon tuteur au sein de l'IRAP, Monsieur Vincent Waeghebaert, responsable électronique du projet ECLAIRs pour sa proposition de sujet de mémoire, son accompagnement, sa disponibilité et ses conseils ainsi que le temps qu'il a passé à relire ce mémoire.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Kevin Aubaret, ancien apprenti ingénieur au sein de l'IRAP et maintenant salarié de Airbus DS pour son soutien, son encouragement et notre collaboration commune sur le projet ECLAIRs.

Simon Delaigue, Stephan Maestre et Damien Rambaud (Equipe Electronique du projet ECLAIRs) pour m'avoir aidé et conseillé dans le développement électronique de mon projet.

Carine Amoros et Ludovic Bautista (Equipe mécanique du projet ECLAIRs) pour m'avoir aidé pour la fabrication et le développement de la mécanique du banc de test.

Sandra Bordon et Stéphane Papais (Equipe Assurance Produit du projet ECLAIRs) pour leur aide et le suivi des tests pour des produits spatiaux.

Wilfried Marty (Développeur Informatique du projet ECLAIRS) pour ses conseils en développement de logiciel de test ainsi que sa confiance qui m'a apporté en me recrutant dans son entreprise pour finir mon mémoire.

Mes collègues de l'IRAP pour l'aide et les conseils qu'ils ont pu m'apporter.

C'est avec une émotion particulière que je tiens à remercier mes parents et ma famille pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Je remercie également les équipes pédagogiques et administratives de l'IPST CNAM et les intervenants professionnels intervenus lors de mon cursus de formation, ils ont pu m'apprendre énormément de connaissances et m'ont permis de passer un cap professionnel. Ainsi que Patrice Michel responsable de la filière Mesure analyse option instrumentation et qualité qui s'est démené pour faire vivre cette filière au sein de l'IPST CNAM.

Glossaire

ADC	Analog to Digital Converter
AIV	Assembly, Integration and Verification
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CdTe	Tellurure de Cadmium
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
CESR	Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements
CHEMCAM	Chemistry Camera
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CNSA	China National Space Administration
COFRAC	Comité français d'accréditation
Diff	Mesure différentielle
DPIX	Detection PIXELized plan
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
EGSE	Electrical Ground Support Equipment
ELS	Electronique de Lecture Secteur
EQM	Engineering Qualification Model
ESA	European Space Agency
EXOMARS	Exobiology on Mars

FIFO	First In, First Out
FM	Flight Model
FPGA	Field-Programmable Gate Array
GAHEC	Galaxies, Astrophysique des Hautes Énergies et Cosmologie
GRB	Gamma Ray Burst
GRM	Gamma-Ray burst Monitor
HT	Haute Tension
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
IRAP	Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie
LABVIEW	Laboratory of Virtual Instruments Engineering Workbench
LATT	Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse-Tarbes
LV-HVPS	Low Voltage High Voltage Power Supply
MCO	Maintien en condition opérationnelle
MICMAC	Milieu Interstellaire, Cycle de la Matière, Astro-Chimie
MSL	Mars Science Laboratory
MUX	Multiplexeur
MXT	Microchannel X-ray Telescope
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NRSE	Non-Referenced Single Ended
OMP	Observatoire Midi-Pyrénées
PCB	Printed Circuit Board

PEPS	Planètes, Environnements et Plasmas Spatiaux
PS2E	Physique du Soleil, des Étoiles et des Exoplanètes
RSE	Referenced Single Ended
SAA	South Atlantic Anomaly
SISU	Signal-Images en Sciences de l'Univers
STB	Spécification Technique du Besoin
SVOM	Space Variable Object Monitor
TRB	Test Review Board
TRR	Test Readiness Review
TXG	Télescope X et Gamma
UGTS	Unité de Gestion et Traitement Scientifique
UMR	Unité Mixte de Recherche
UPS	Université Paul Sabatier
VHF	Very High Frequency
VI	Instrument Virtuel
VT	Visible Telescope
XRDPIX	Module de détection (32 détecteurs)

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	3
GLOSSAIRE.....	5
TABLE DES MATIERES.....	8
INTRODUCTION	10
I CONTEXTE	12
I.1 INSTITUT DE RECHERCHE EN ASTROPHYSIQUE ET PLANETOLOGIE	13
I.1.1 Historique	13
I.1.2 Organisation	16
I.2 LA MISSION SVOM	19
I.2.1 Objectifs scientifiques	19
I.2.2 Objectifs techniques	20
I.3 L'INSTRUMENT ECLAIRS	23
I.3.1 Rôle de l'instrument	23
I.3.2 Descriptifs de l'instrument ECLAIRS.....	24
I.3.3 Plan de détection DPIX	27
I.3.3.1 Vue d'ensemble.....	27
I.3.3.2 Module de détection : XRDPIX.....	29
I.3.3.2.1 Semi-conducteur	30
I.3.3.2.2 ASIC.....	34
I.3.3.3 Électronique de Lecture Secteur	35
I.4 PROTOCOLE DE VALIDATION DES CARTES ÉLECTRONIQUES.....	38
II CONCEPTION ET DEVELOPPEMENT DU BANC DE TEST DE CARACTERISATION EN ENVIRONNEMENT	40
II.1 ANALYSE DU BESOIN.....	43
II.1.1 Objectifs des tests.....	43
II.1.2 Environnement des tests.....	43
II.1.2.1 Température	44
II.1.2.2 Pression.....	45
II.1.3 Études des Cartes Électroniques.....	45
II.1.3.1 Cartes LV-HVPS	45
II.1.3.2 Cartes MUX ADC	47
II.2 CONCEPTION.....	48
II.2.1 Définition du banc de test	48
II.2.1.1 Synoptique	48
II.2.1.2 Définition des signaux à mesurer.....	48
Inventaire des signaux de la carte LV-HVPS	48
Inventaire des signaux de la carte MUX-ADC.....	49

II.2.2	<i>Choix des solutions</i>	50
II.2.2.1	Définition d'un processus de mesure	50
II.2.2.2	Acquisition et contrôle hardware	54
II.2.2.3	Acquisition et contrôle Software.....	57
II.2.2.4	Enceinte vide thermique	58
II.3	REALISATION.....	61
II.3.1	<i>Architecture du banc de test</i>	61
II.3.2	<i>Câblage du Système d'acquisition</i>	62
II.3.2.1	Principe d'acquisition des entrées analogiques	62
II.3.2.2	Utiliser des sources à basse impédance.....	63
II.3.2.2.1	Calcul de l'impédance.....	63
II.3.2.2.2	Application au banc de tests.....	65
II.3.2.3	Utilisation d'un câblage court de haute qualité	67
II.3.2.4	Choisir soigneusement l'ordre de balayage des canaux	68
II.3.3	<i>Programmation du logiciel de test</i>	68
II.3.3.1	Programme de tests de la Carte LV-HVPS	69
II.3.3.2	Programme de test de la Carte MUX-ADC.....	73
II.3.4	<i>Validation fonctionnelle du banc de tests</i>	75
II.3.5	<i>Assistance technique et maintenance</i>	76
II.3.5.1	Assistance technique et déroulement des essais	76
II.3.5.2	Maintien en condition opérationnelle.....	77
II.3.5.3	Métrologie au niveau du projet.....	77
III	CARACTERISATION ET VALIDATION DES CARTES	80
III.1	CARTE MUX ADC.....	81
III.1.1	<i>Saturation sur les valeurs extrêmes</i>	81
III.1.2	<i>Analyse du codage sur la partie linéaire</i>	85
III.2	CARTE LV-HVPS	87
III.2.1	<i>Stabilisation des Basses tensions</i>	87
III.2.2	<i>Étude de la haute tension</i>	89
III.2.2.1	Variations et OFFSET non conformes.....	89
III.2.2.2	Débullage du potting	94
IV	CONCLUSION	96
IV.1	BILAN DE MON TRAVAIL POUR LE PROJET	96
IV.2	BILAN PERSONNEL	97
V	BIBLIOGRAPHIE	98
	TABLE DES ANNEXES	100
	LISTE DES FIGURES	142
	LISTE DES TABLEAUX	145

Introduction

La recherche spatiale est basée sur des observations scientifiques qui utilisent des moyens spatiaux tel que des satellites artificiels, des sondes spatiales, des robots ou des ballons stratosphériques pour collecter des données. Plusieurs disciplines scientifiques utilisent ces moyens spatiaux : comme l'astronomie, la physique fondamentale et expérimentale, l'observation de la terre, les sciences de l'environnement, l'agronomie, les risques naturels et la pollution.

La fabrication de ces moyens nécessite des précautions particulières. Ces systèmes complexes et coûteux ne seront pas réparables ou modifiables après leur lancement. Ils subiront de fortes contraintes, comme de fortes vibrations et chocs pour la mise en orbite avec une fusée, Ensuite ils évolueront dans un environnement difficile, vide, radiations et températures extrêmes quand ils seront dans l'espace, au-delà de notre atmosphère terrestre. La fiabilité est donc primordiale pour la réussite de ces missions.

A l'aide des spécifications de la mission et de l'instrument, des tests sont réalisés à différentes étapes pour valider la conception, le développement et la fabrication des différents sous-systèmes qui composent l'instrument.

Aujourd'hui, j'occupe un poste d'ingénieur d'étude rattaché à l'équipe électronique sur le projet spatial SVOM (Space Variable Objects Monitor). Ce projet qui a débuté en 2006 est aujourd'hui en phase D (Production / Qualification), c'est à dire que l'instrument est progressivement construit en commençant par des modèles intermédiaires de chaque sous système qui sont testés avant la fabrication des modèles finaux pour l'intégration définitive de l'instrument. Mon rôle sur le projet est de tester et valider les sous-systèmes « cartes électroniques » de la caméra DPIX de l'instrument ECLAIRs, allant de leur suivi de fabrication à leur validation pour l'intégration de la caméra complète en passant par les essais fonctionnels des cartes et leurs caractérisations en environnement spatial. Ces caractérisations sont une étape importante pour le développement des cartes électroniques du projet, elles permettront d'observer, d'analyser et de valider le comportement des électroniques dans les conditions qu'elles rencontreront dans l'espace.

La conception, le développement et la réalisation d'un banc de test pour réaliser les caractérisations en environnement ainsi que l'analyse des résultats m'ont été confiés. Toutes ces activités font l'objet de ce mémoire d'ingénieur CNAM.

Ma première partie présentera le contexte ainsi que les enjeux de la mission SVOM, puis je me focaliserai sur l'instrument ECLAIRS et plus particulièrement la caméra DPIX qui est conçue à l'IRAP. Je présenterai son fonctionnement ainsi que ses caractéristiques.

Dans ma deuxième partie, je présenterai tout le travail de conception et de développement que j'ai effectué pour mettre au point ce banc de tests en environnement.

Dans une dernière partie je présenterai les résultats permettant de valider le bon fonctionnement des cartes électroniques dans les conditions d'utilisation.

I CONTEXTE

I.1 Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie

I.1.1 Historique

L’Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie est une unité mixte de recherche (UMR 5277), de l’université Paul Sabatier (Toulouse) et du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) dirigée par Philippe Louarn depuis 2016. Créé le 1er janvier 2011, cet institut regroupe environ 300 membres (personnel permanent, contractuels, prestataires et étudiants) et résulte de la fusion de plusieurs laboratoires de l’Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) :

- Centre d’Étude Spatiale des Rayonnements (CESR)
- Laboratoire d’Astrophysique de Toulouse-Tarbes (LATT)
- Laboratoire de Dynamique Terrestre et Planétaire (DTP)
- Laboratoire des Mécanismes de Transfert Radiatif (LMTG)

Les domaines de recherches de l’IRAP portent sur l’étude et la compréhension de l’Univers et de son contenu : la Terre en tant que planète, l’environnement spatial ionisé de la Terre, le Soleil et ses planètes, les systèmes planétaires, les galaxies, les étoiles et le Big Bang. Tous ces domaines d’étude font aujourd’hui partie des piliers de la science moderne sur la compréhension de l’espace, de la matière et de l’origine de la vie.

La direction de l’IRAP se situe dans le bâtiment historique du CESR, situé avenue du Colonel Roche à Toulouse. Le CESR, grand frère de l’IRAP, a été créé en 1963 au début de l’ère spatiale et était un centre technique du Centre National d’Études Spatiales (CNES) avant de devenir un laboratoire du CNRS en 1979. Il avait pour principale mission la mise en œuvre des satellites scientifiques, des sondes spatiales, des ballons stratosphériques ainsi que des télescopes sols et spatiaux.

L’IRAP a donc récupéré les infrastructures de ce laboratoire qui était entièrement organisé pour assurer le cycle de vie d’une charge utile scientifique spatiale. De sa conception à son suivi opérationnel en vol et l’analyse des résultats en passant par son développement et sa fabrication.

Aujourd'hui, l'IRAP a été artisan de plusieurs projets spatiaux d'envergure tant pour des découvertes scientifiques que pour leur notoriété auprès du grand public.

Par exemple, l'instrument HFI (High Frequency Instrument) du satellite Planck lancé le 14 mai 2009, issu d'une coopération entre l'agence spatiale américaine et européenne (NASA et ESA), avec M. Pons Roger en tant que chef de projet IRAP.

Planck a confirmé la théorie de l'inflation cosmique, un des piliers du modèle standard de la cosmologie, la théorie la plus courante admise concernant le mode de formation de l'univers observable.

Il y a aussi la mission Mars Science Laboratory (MSL) et son rover Curiosity, lancé le 16 novembre 2011, posé le 6 août 2012 sur la planète Mars et toujours opérationnel. Sous la maîtrise d'œuvre du CNES en partenariat avec la NASA, l'IRAP a entièrement conçu et déployé l'instrument CHEMCAM (Chemistry Camera) du rover avec à la tête de ce projet M. Parot Yann (Ingénieur de Recherche, CNRS) maintenant chef de projet sur le programme ExoMars (Exobiology on Mars).

L'IRAP a participé à la conception d'instruments embarqués dans les deux orbiteurs de la mission BEPI COLOMBO qui ont décollés en octobre 2018 en direction de Mercure. L'objectif de cette mission est double : BepiColombo doit étudier la structure interne, la composition et le champ magnétique de Mercure mais plus généralement, grâce aux données recueillies, obtenir des informations générales sur la formation et l'évolution des planètes telluriques.

D'autres projets vont bientôt être lancés tels que Solar Orbiter, où l'IRAP est impliqué dans l'Expérience SWA (Solar Wind Analyzer) : suite de 3 senseurs (spectromètres "électrons", Proton, Ions lourds) pour caractériser la matière éjectée du soleil, comprendre sa dynamique et son effet sur l'organisation de l'héliosphère interne ; mais aussi tel que l'instrument Supercam de la mission Mars 2020, placé sur le mât du rover afin d'analyser à distance la chimie des roches de Mars.

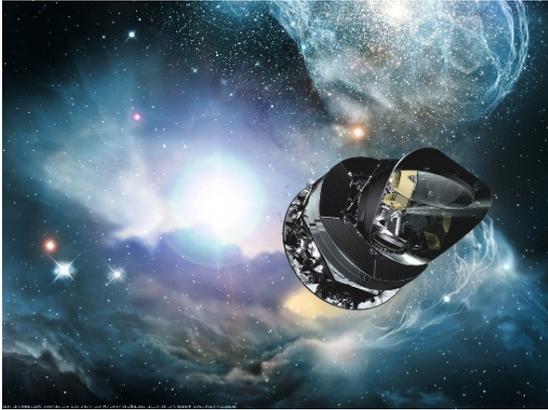


Figure I-1 Vue d'artiste du satellite Planck

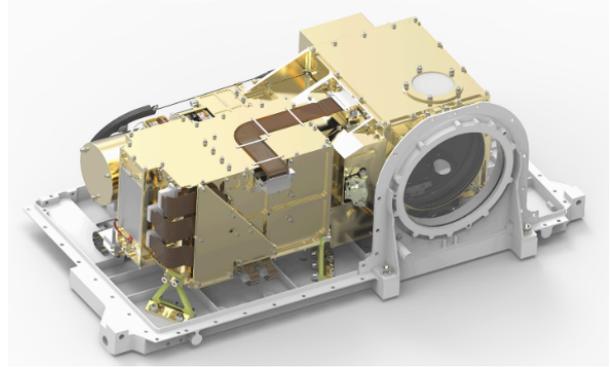


Figure I-2 Instrument SuperCAM

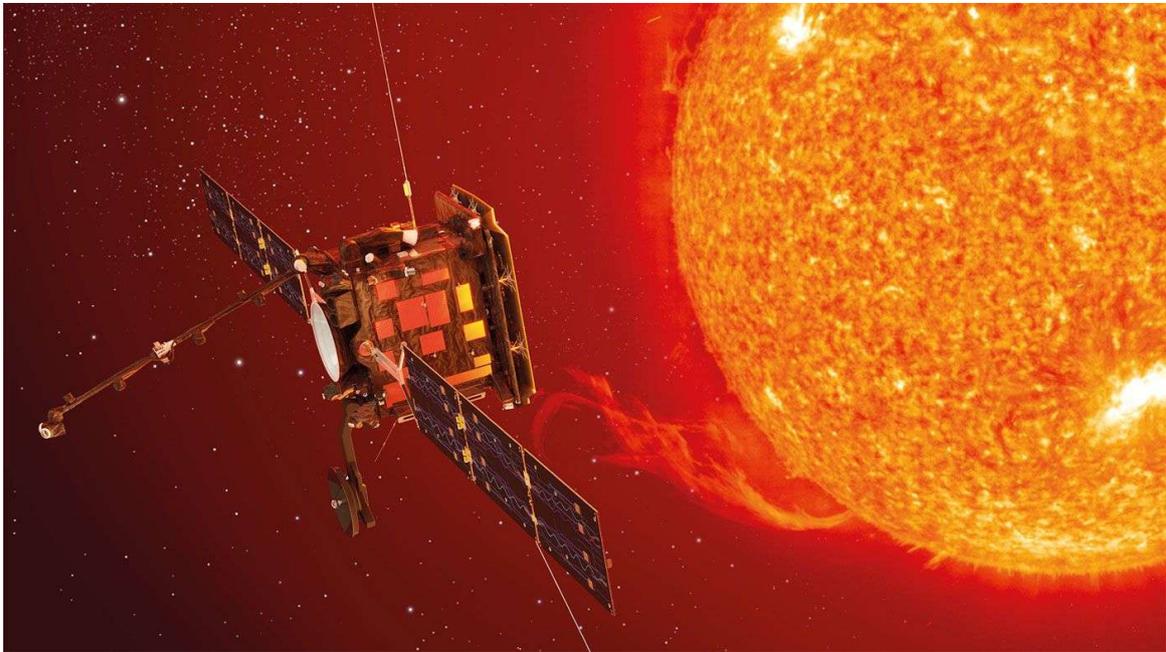


Figure I-3 Vue d'artiste du satellite Solar Orbiter

I.1.2 Organisation

L'IRAP est une unité mixte de recherche (UMR), c'est une entité administrative créée par la signature d'un contrat d'association entre l'université Paul Sabatier de Toulouse et le centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Le CNRS est un organisme public placé sous la tutelle du Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Il produit du savoir et met ce savoir au service de la société. Parmi la structure du CNRS, il existe 10 instituts nationaux hiérarchisés selon leur thématique de recherche. L'IRAP est placé au sein de l'Observatoire Midi - Pyrénées sur le plan régional, sous la tutelle de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) au niveau national. Ce laboratoire compte actuellement 276 personnes qui sont réparties comme suit :

Postes	Nombre de personnes
Chercheurs/Enseignants-chercheurs	116
Doctorants	47
Post-Doc	21
Ingénieurs, techniciens et administratifs (ITA)	72
Contractuels ITA	20

Tableau 1 répartition des personnels de l'IRAP

L'IRAP étant une Unité Mixte de Recherche, le personnel qui y est affecté provient des différents partenaires. Les personnes travaillant au sein de l'IRAP ne sont pas toutes employées par le CNRS. Il y a aussi du personnel de l'université Paul Sabatier de Toulouse.

Ci – dessous est représenté l’organigramme fonctionnel interne de l’IRAP :

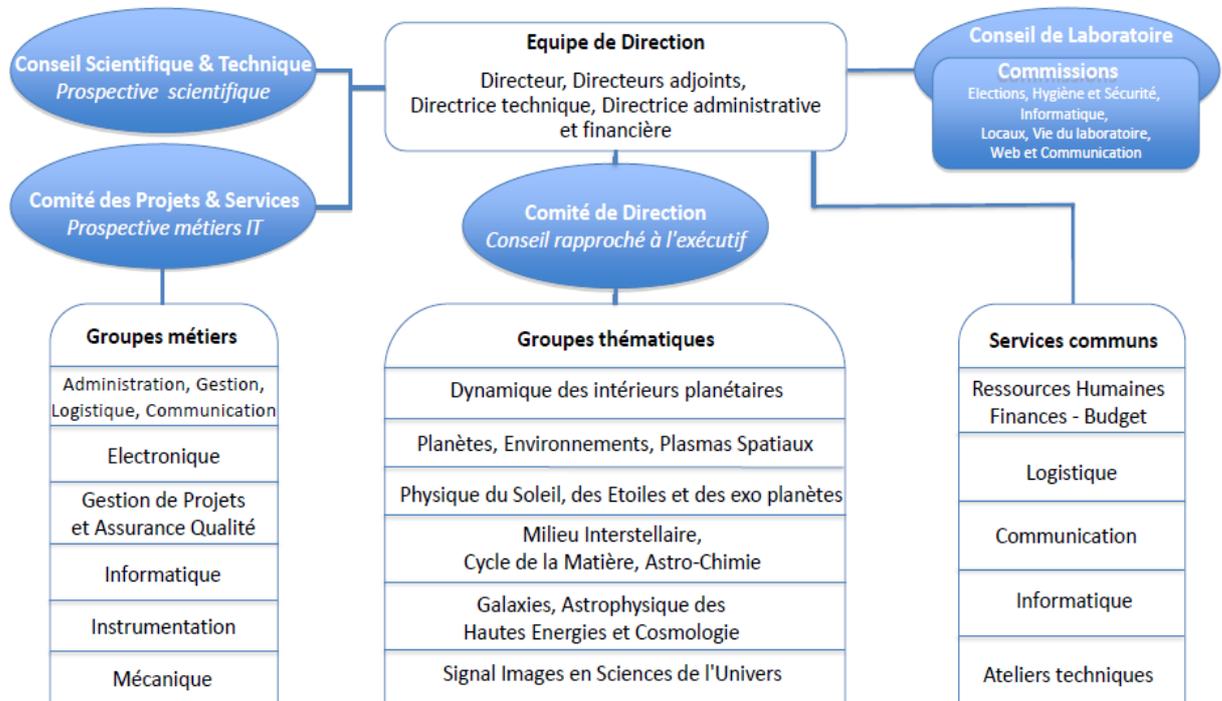


Figure I-4 Organigramme fonctionnel de l'IRAP

Chaque projet accueilli dans le laboratoire est rattaché à un groupe thématique selon son domaine d’étude scientifique. Les chercheurs et doctorants sont par conséquent rattachés à ces groupes. Lorsque la mise en place d’une expérience devient nécessaire sur un sujet de recherche, les personnels et compétences des groupes métiers sont alors regroupés sous forme d’équipes projets afin de répondre à une offre interne (projets R&D financés par le laboratoire) ou, plus souvent, à des offres externes (partenariat avec d’autres laboratoires, ou agences spatiales). Pour mon projet de fin d’études, je suis donc rattaché au groupe métier électronique et j’interviens, dans l’équipe projet DPIX, une partie de la mission spatiale SVOM qui est associée au groupe thématique GAHEC de l’IRAP.

L’IRAP est aussi composé de différents conseils et comités permettant le bon fonctionnement du laboratoire. Le Conseil de Laboratoire est l’instance statutaire d’administration de l’IRAP. Il émet des avis sur toutes les questions relatives à la politique scientifique, la gestion des ressources, l’organisation et le fonctionnement de l’IRAP. Il conduit certaines de ces actions au moyen de Commissions qu’il nomme et qu’il pilote: "Vie

du laboratoire", "Informatique", "WEB & COM", "Locaux", "Élections", "Hygiène et sécurité", "Formation permanente". Sa composition est de 5 élus parmi des ITAs permanents, 5 élus chercheurs et enseignants-chercheurs permanents, 1 élu parmi les doctorants, 1 élu parmi les post-doctorants et CDDs, 5 nommés par le directeur dont au moins 2 ITAs et 2 Ch-Ens-ch, le directeur, la directrice technique, et la Directrice Administrative et Financière. Les directeurs adjoints sont invités permanents, et les responsables des groupes thématiques sont invités en fonction de l'ordre du jour. Le conseil de laboratoire est présidé par le directeur, et son vice-président est un ITA nommé par le directeur.

Le Conseil Scientifique et Technique est en charge de la stratégie scientifique de l'IRAP. Il a un rôle consultatif et discute, délibère et émet des recommandations sur toute question qui impacte sur la stratégie scientifique de l'IRAP à court, moyen et long termes : engagement des projets, priorités sur les sujets de thèse, actions scientifiques de l'IRAP. Sa composition comprend le directeur, la directrice technique, les trois directeurs adjoints, 6 élus et 4 nommés parmi les personnels permanents de l'IRAP (5 chercheurs/enseignant-chercheurs, 5 ITs) ainsi que les responsables des groupes thématiques.

Le Comité de Projets et Services est en charge de l'animation et de la prospective des métiers ITAs à l'IRAP. Sa composition comprend le directeur, la directrice technique, la Directrice Administrative et Financière, un directeur adjoint, les responsables de groupes techniques et la responsable du pôle des ressources humaines. Le Comité des Projets et Services est présidé par la directrice technique et co-présidé par la Directrice Administrative et Financière. Il se réunit avec les chefs des projets et des services concernés lorsqu'il doit discuter du plan de charge des ITAs.

I.2 La mission SVOM

I.2.1 Objectifs scientifiques

La mission SVOM (Space Variable Object Monitor) est une coopération sino-française entre le CNES (Centre National d'Études Spatiales) et la CNSA (China National Space Administration) qui a débuté en 2006. Elle consiste à placer en orbite autour de la Terre (lancement fin 2021), à une altitude de 600 km, un satellite dont la mission principale est la détection et l'étude de sursauts gamma (GRB, Gamma Ray Burst).

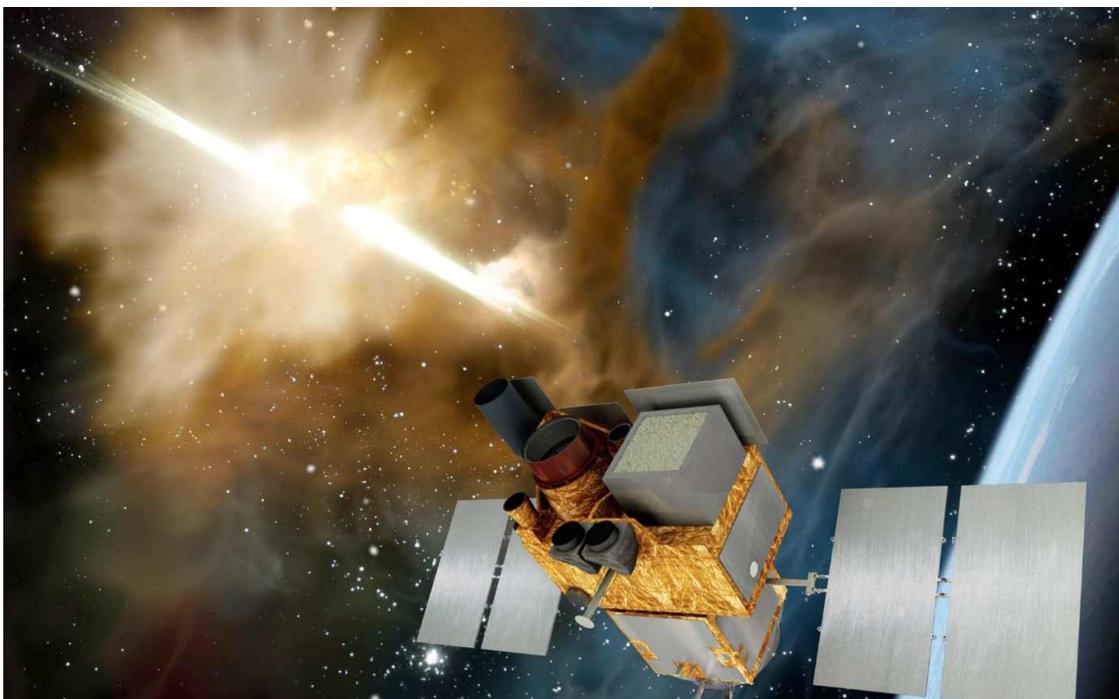


Figure I-5 Vue d'artiste du satellite SVOM

Ces sursauts sont liés à l'effondrement du cœur d'une étoile massive (environ 20 fois la masse du soleil) ou à la fusion d'objets compacts lorsqu'ils deviennent trop proches l'un de l'autre. Ces phénomènes physiques, à l'origine des sursauts gamma, engendrent la formation de trous noirs, qui par définition, sont impossibles à observer directement. Les sursauts gamma sont donc une caractéristique clé permettant, de nos jours, de détecter et observer un trou noir. À sa création, il en échappe de son centre un jet de particules appelé "jet relativiste", caractérisé par une émission lumineuse dans les domaines des rayons X et γ . Afin de les détecter et observer, il est nécessaire que l'observateur, ici le satellite, se trouve

en face de la direction du jet. Par sa durée et son énergie on peut alors en déduire le type d'événement.

Le nombre d'événements que l'instrument pourra observer lors de la mission dépend directement de l'orientation entre la source et ce dernier. Le satellite est conçu pour une mission de 3 ans et devra détecter environ 70 à 80 sursauts par an [1] allant d'une durée de quelques secondes à quelques minutes.

La lumière que nous recevons des sursauts gamma les plus lointains a été envoyée il y a plus de 10 milliards d'années, ce qui permet d'avoir des informations sur l'état de l'univers dans le passé. Généralement, ces phénomènes sont à l'origine même de la création des atomes ayant permis le développement des planètes et, par conséquent, le développement de la Vie. Cela explique l'intérêt majeur porté par la communauté scientifique quant à leur observation. Ce sont, en effet, les événements les plus énergétiques de l'univers qu'il nous ait été donné d'observer jusqu'à présent.

I.2.2 Objectifs techniques

Conjointement à ces objectifs scientifiques, trois grands enjeux techniques ont été identifiés.

- Détecter et localiser des sursauts X et γ pendant au minimum 3 ans.
- Être capable d'observer dans les spectres du visible aux γ après la détection.
- Transmettre rapidement la localisation de l'évènement au sol pour orienter les télescopes sol dans la même direction.

À partir de 2006, une collaboration entre l'agence française et chinoise s'est donc formée dans le but de mener à bien le développement de la mission SVOM comprenant le satellite mais aussi les observatoires et les équipements au sol.

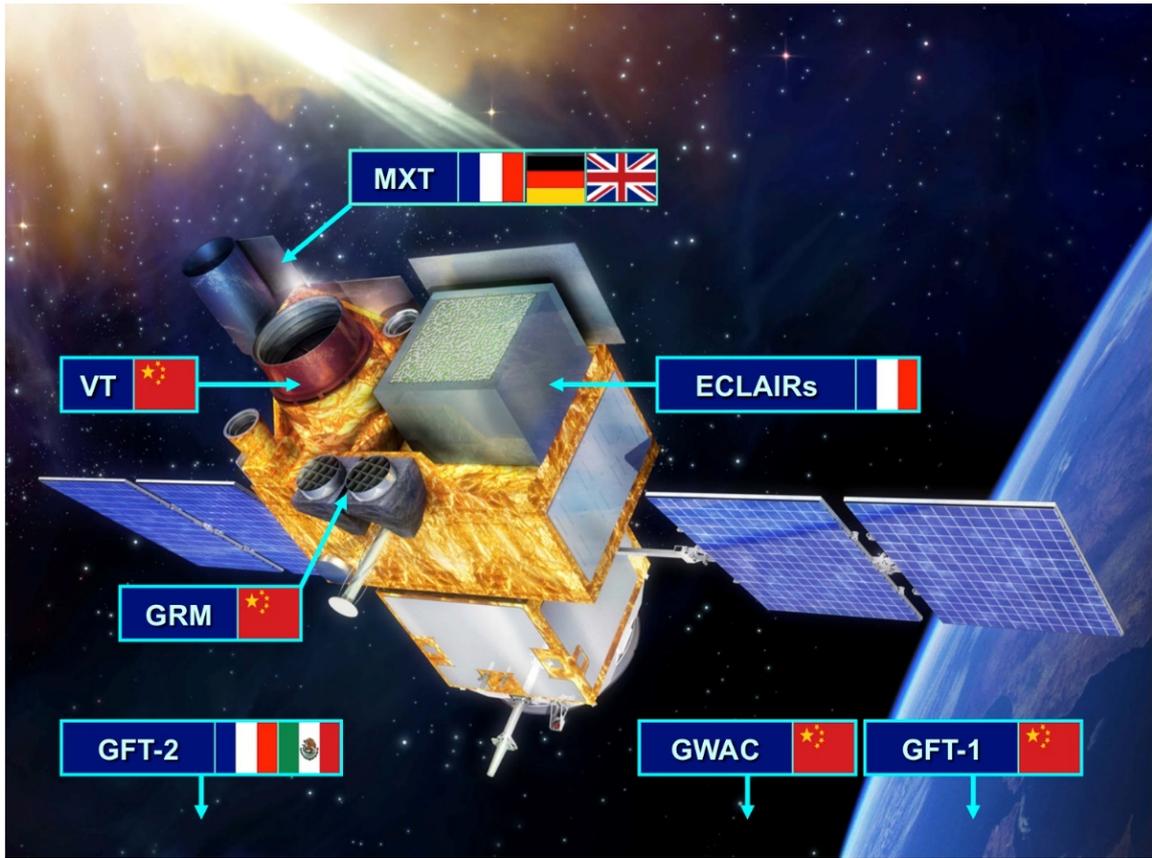


Figure I-6 Représentation des instruments du satellite SVOM ainsi que les moyens sol

La plate-forme du satellite est fournie par l'agence spatiale chinoise, elle peut supporter jusqu'à 1 tonne de charge utile. Afin de mener à bien les objectifs scientifiques, le satellite SVOM embarquera quatre instruments.

- ECLAIRs détecte et localise les sursauts dans la bande d'énergies 4 - 150 keV.
- MXT permet d'observer dans la bande d'énergies de 0,3 keV à 10 keV.
- VT est un télescope permettant d'observer dans le visible et l'infrarouge proche.
- GRM permet d'observer dans la bande d'énergies de 30 keV à 5 MeV.

Les instruments sol GWAC et GFT sont des télescopes qui permettent de réaliser un suivi quasi permanent dans l'hémisphère nord. ECLAIRs est donc l'instrument principal de la mission permettant la détection et la localisation des événements que l'on souhaite observer dans l'univers. Les autres instruments à bord prennent le relais une fois qu'ECLAIRs a détecté le sursaut candidat à observer.

Instruments	Rayons observés	Bandes d'énergies
ECLAIRs	X et γ	4 - 150 keV
MXT	X	0,3 - 10 keV
GRM	γ	30 keV - 5 MeV
VT	Visible et IR	1,3 - 3 eV

Tableau 2 Domaines d'observation de chaque instrument du satellite

La plate-forme du satellite embarquera 3 antennes pour la communication avec le sol. Les données télémétriques (altitude, localisation etc.) et les données de servitudes ou "housekeeping" (tensions, courants, températures etc.) seront transmises au centre de contrôle satellite en bande S (2 - 4 GHz). Les données scientifiques seront transmises en bande X (8 – 12 GHz), et les messages d'alertes de détection d'un sursaut seront transmis en bande VHF (30 - 300 MHz). Afin de pouvoir recevoir des alertes rapidement au sol (en moins d'une minute, étant donnée la rapidité des événements observés, allant de quelques secondes à quelques minutes), pour orienter les télescopes terrestres, un réseau d'antennes VHF au sol sera placé le long de l'orbite de SVOM, à environ 600 km d'altitude avec une inclinaison de 30° par rapport au plan équatorial. Un message sera alors transmis lorsque l'instrument ECLAIRs aura déterminé que l'événement dépasse un seuil dit de déclenchement (déterminé par le rapport signal sur bruit de la source observée multiplié par un facteur statistique), afin de ne pas déclencher un nombre trop important d'alertes insignifiantes. La détermination de ce seuil s'inscrit partiellement dans les travaux réalisés par le Dr. Jean-Luc Attéia, Principal Investigateur de l'instrument ECLAIRs. Dès qu'un sursaut est sélectionné, la plate-forme détermine donc si elle peut pointer la source, compte tenu de sa trajectoire, et manœuvrer pour s'orienter de manière optimale vers celle-ci. La stratégie de pointage du satellite a été définie de manière optimale suivant une loi communément appelée « loi d'attitude » afin de maximiser la détection d'un nombre suffisant [1] de sursauts gamma durant la mission, tout en évitant d'observer le Soleil, la Lune ou le plan galactique.

I.3 L'Instrument ECLAIRS

I.3.1 Rôle de l'instrument

L'instrument principal du satellite SVOM est le télescope ECLAIRS. Son rôle est primordial dans l'observation et l'étude d'un évènement par la mission SVOM car il est à l'origine de toute la chaîne d'observation mise en place par la mission. L'instrument ECLAIRS permet la détection, la localisation et l'étude de sursauts gamma à tout moment et n'importe où, du moment que l'évènement a lieu dans son champ de vision.

L'instrument ECLAIRS est conçu pour respecter les fonctions principales ci-après, elles sont tirées de la spécification technique de besoin [2] :

1. Détection des photons incidents dans la gamme d'énergie 4 - 150 keV
2. Élimination des photons et particules chargées venant de directions extérieures au champ de vue de l'instrument
3. Différenciation des évènements simples, qui touchent un seul détecteur, des évènements multiples, qui touchent plusieurs détecteurs simultanément
4. Numérisation des caractéristiques des photons (énergie, position, date)
5. Détection des évènements transitoires, tel que les sursauts gamma, à partir des données 'photon' X et gamma
6. Localisation et évaluation des caractéristiques des évènements détectés
7. Génération à bord, en quasi temps réel, du signal d'alerte (Trigger) pour les évènements détectés correspondants aux critères d'alerte
8. Génération à bord, en quasi temps réel, d'une demande de dépointage ou pour les évènements détectés correspondants aux critères
9. Transmission au sol, en quasi temps réel, d'un message d'alerte en cas de détection d'un sursaut gamma (GRB)
10. Transmission des données « photon » à la mémoire de masse pour émission vers les stations sol

Pour respecter le besoin défini dans les fonctions principales il a aussi été défini des fonctions contraintes.

Ces fonctions contraintes de l'instrument ECLAIRs sont :

1. Contrôle thermique de l'instrument
2. Contrôle thermique des détecteurs
3. Maintien des alignements mécaniques
4. Maintien des détecteurs dans l'obscurité (spectre visible)
5. Gestion de la configuration de l'instrument
6. Gestion du plan de détection (pixels bruyants)
7. Calibration de l'instrument en vol (Calibration en énergie)
8. Gestion de la polarisation des détecteurs (Dépolarisation régulière des détecteurs et entrée / sortie de SAA)

I.3.2 Descriptifs de l'instrument ECLAIRs

ECLAIRs est un télescope grand angle à masque codé $89^\circ \times 89^\circ$ (Figure I-7) avec un plan de détection de surface efficace de 1024 cm^2 composé de 6400 détecteurs en CdTe (Tellure de Cadmium). En fonctionnement, ECLAIRs peut détecter dans son champ de vision un sursaut avec une énergie entre 4 KeV et 150 KeV. Pour réduire le bruit électrique propre aux CdTe, le plan de détection est refroidi à -20°C par l'intermédiaire d'un système thermique passif. L'électronique associée à ce système comprend des boîtiers d'Électronique de Lecture Secteur (ELS) et une Unité de Gestion et Traitement Scientifique (UGTS). La précision de la localisation de la source dépend de la taille des pixels des détecteurs et du masque codé. Elle est définie [3] entre 13 arc minutes ($0, 22^\circ$) et 3 arc minutes ($0, 05^\circ$) selon l'intensité lumineuse de la source observée.

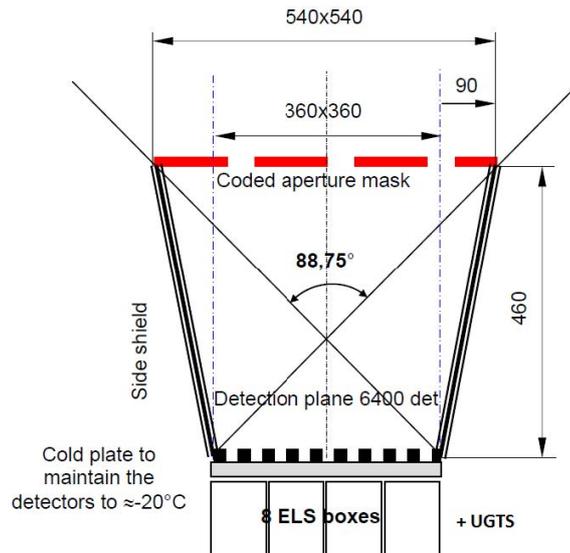


Figure I-7 Représentation schématique du télescope ECLAIRs,

Pour réaliser les fonctions définies, ECLAIRs est composé de plusieurs équipements :

- TXG : Caméra X Gamma composée d'un Plan de détection DPIX (Detection PIXelized plan), d'un masque Codé, d'une Structure Haute avec un Système Thermique,
- UGTS : Unité de Gestion et de Traitement Scientifique de la TXG.

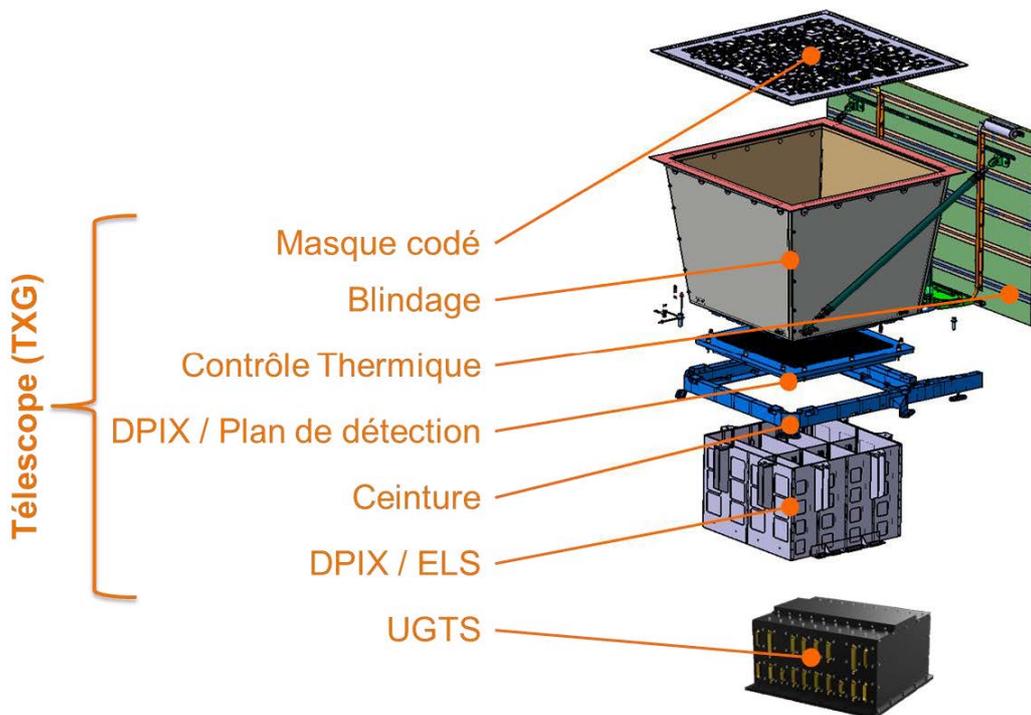


Figure I-8 Architecture ECLAIRs

Un télescope conventionnel focalise la lumière au moyen de lentilles ou de miroirs. Cette méthode ne s'applique pas aux rayons gamma qui passeraient au travers du miroir. Pour obtenir une image du ciel en gamma, il est nécessaire d'utiliser d'autres techniques. Pour observer les rayons gamma, les instruments utilisent des "masques codés". L'ombre du masque est décalée par rapport à la position de la source dans le ciel sur le principe de l'ombre portée, cette technique va permettre de déterminer dans quelle zone du ciel se situe la source. En connaissant l'orientation du satellite dans l'espace et en analysant les données des détecteurs, il est alors possible de déterminer la position et l'intensité des sources de rayons gamma et donc de reconstituer l'image de la région observée.

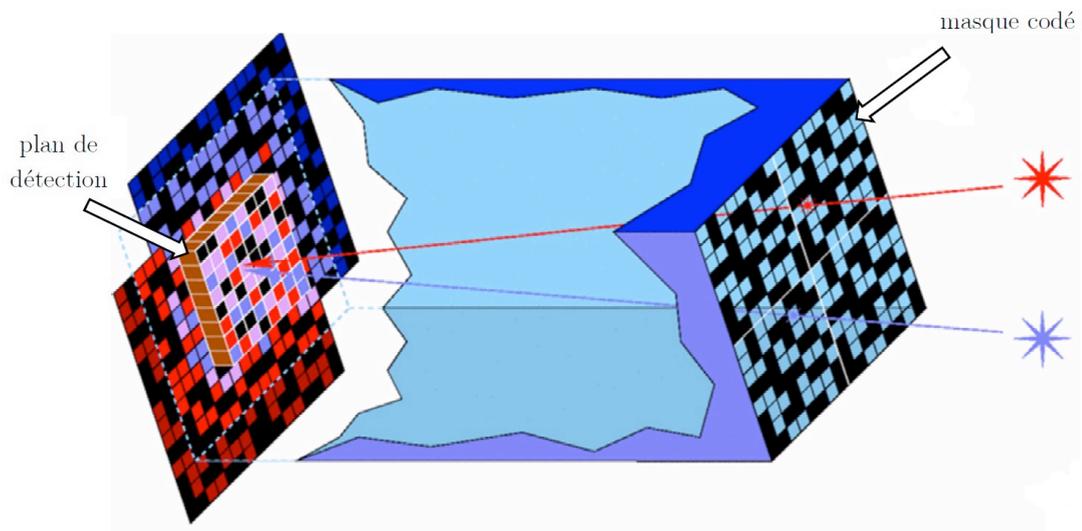


Figure I-9 Principe de l'imagerie à masque codé

Le masque codé recouvre partiellement l'ouverture de la caméra. Il est constitué de plaques opaques et de trous distribués de façon optimale. Les détecteurs enregistrent l'ombre du masque projeté par les sources de rayons gamma situées dans le champ de vue. Le schéma représente, dans le cas de deux sources, la superposition des ombres du masque sur le plan de détection.

I.3.3 Plan de détection DPIX

I.3.3.1 Vue d'ensemble

Sur le plan technique, l'Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie est en charge du DPIX (Detection PIXelized plan), sous système et cœur du TXG. Cela implique que l'IRAP en est responsable depuis sa phase de spécification jusqu'à sa livraison au CNES, et sa maintenance en vol. À la tête de ce projet, M. Pons Roger, Chef de projet DPIX depuis 2006. Sur le plan scientifique, les chercheurs du projet ainsi que leurs confrères à l'international seront en charge du traitement des données de la mission pendant le vol et les années à venir après celui-ci. Le DPIX est principalement composé du plan de détection constitué de détecteurs CdTe, ainsi que des boîtiers Électroniques de Lecture Secteur (ELS).

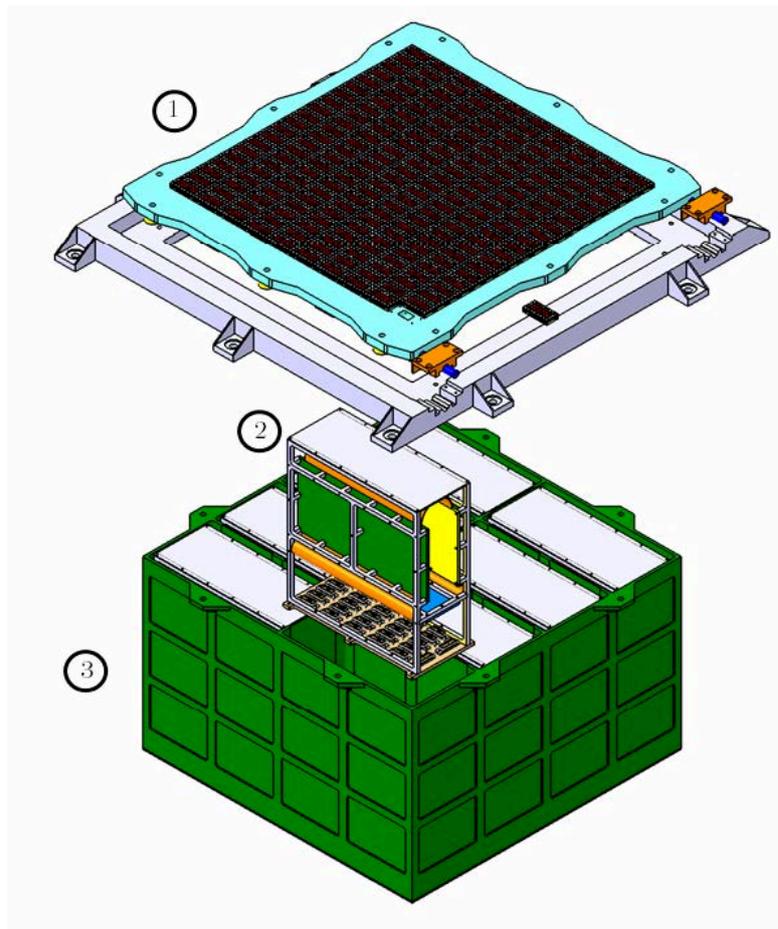


Figure I-10 Vue éclatée en 3D du DPIX

Le DPIX est composé :

1 - du plan de détection (1024cm²) composé de 6400 détecteurs CdTe regroupés par groupes de 32 pour former une cellule de détection nommée XRDPIX. (200 XRDPIX pour la caméra de vol)

2 - des Électroniques de Lecture Secteur (ELS), 8 ELS au total pour sectoriser le traitement du plan de détection en 8 secteurs, 25 XRDPIX par secteur soit 800 détecteurs CdTe.

3 – de l'ELS box, l'ensemble mécanique qui contient les 8 ELS.

Pour le développement du plan de détection DPIX, différents modèles intermédiaires sont conçus pour arriver au modèle final (le modèle de vol). La philosophie des modèles est la suivante :

- Un prototype DPIX (ProtoDPIX)
- Structural and Thermal Model (STM), ce modèle est pris en charge par le CNES
- Engineering & Qualification Model, ce modèle ne sera pas qualifié (ProtoEQM)
- Flight Model, philosophie ProtoFlight (PFM)
- Flight Spare, uniquement des sous-systèmes

Les modèle STM et PFM seront les seuls livrés à la Chine.

Le développement du prototype permet la définition détaillée des cartes électroniques et harnais en utilisant des produits de gamme industrielle.

Le modèle STM représente la caméra DPIX d'un point de vue mécanique et structurel. Elle permet la validation de l'intégration sur la plateforme du satellite conçue en Chine.

Le ProtoEQM permet de se rapprocher du modèle de vol d'un point de vue mécanique et électronique. Les composants et les circuits sont fabriqués dans les mêmes unités de production que les modèles de vol mais ne sont pas qualifiés. Cela permet de vérifier le bon fonctionnement avec des composants « pseudo spatiaux » et de valider les procédés de fabrications avec nos sous-traitants qualifiés par les agences spatiales.

Le modèle PFM sera le modèle intégré sur le satellite et qui sera lancé dans l'espace. Des modules FS, répliques exactes du modèle FM, permettront de remplacer des éléments du modèle de vol en cas de défaillance.

I.3.3.2 Module de détection : XRDPIX

Un détecteur semi-conducteur comme le CdTe génère une impulsion de charge à chaque interaction de photons X ou γ . Cette charge, proportionnelle à l'énergie déposée, doit être convertie en tension, pour ensuite être mise en forme et numérisée. Les contraintes associées à une application spatiale sont l'encombrement, la consommation électrique et surtout la résistance aux radiations de l'environnement spatial. Ces contraintes nécessitent une intégration de la chaîne électronique au plus près du détecteur, en réduisant au maximum sa taille pour diminuer le bruit pouvant survenir dans la chaîne. La conversion en tension est réalisée par un ASIC (Application-Specific Integrated Circuit). C'est à partir de ces paramètres que l'IRAP a mis au point, un module de détection nommé XRDPIX, en partenariat avec l'IRFU/CEA. Il est le résultat d'une hybridation entre les détecteurs CdTe et l'ASIC IDef-X [4] supervisée par Mme Lacombe Karine, Ingénieur de Recherche en instrumentation spatiale à l'IRAP.

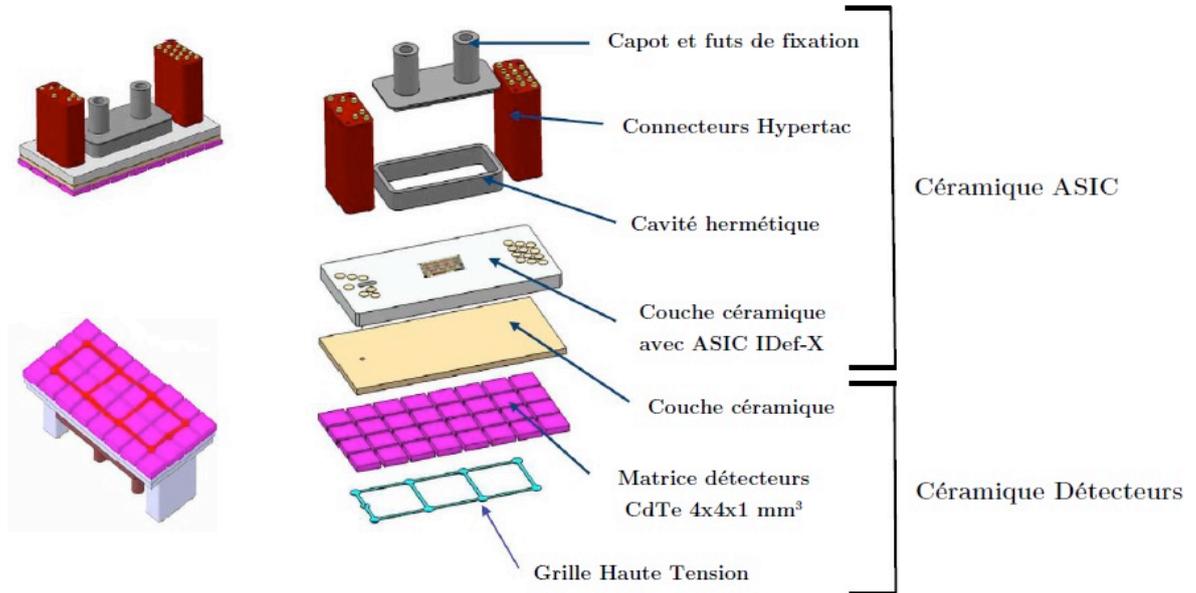


Figure I-11 Vue éclatée en 3D d'un module XRDPIX, en haut à gauche une vue de dessous et en bas à gauche une vue de dessus, de l'XRDPIX assemblé

I.3.3.2.1 Semi-conducteur

Un semi-conducteur est caractérisé par une bande de valence remplie et une bande de conduction vide. L'absorption de la lumière dans les semi-conducteurs peut être décrite de manière quantique. De manière schématique, un photon incident d'énergie égale à la largeur de bande interdite ("gap" d'énergie E_g) du matériau est absorbé. L'énergie de ce photon est transférée à un électron de la bande de valence qui passe dans la bande de conduction, laissant dans la bande de valence un trou (chargé positivement), Figure I-122.

Si l'énergie du photon incident est inférieure à la largeur de bande interdite du matériau, le photon le traverse sans être absorbé. Pour des énergies de photons supérieures en revanche, les photons sont absorbés et créent une population d'électrons dans la bande de conduction et de trous dans la bande de valence : des paires électron-trous. [5]

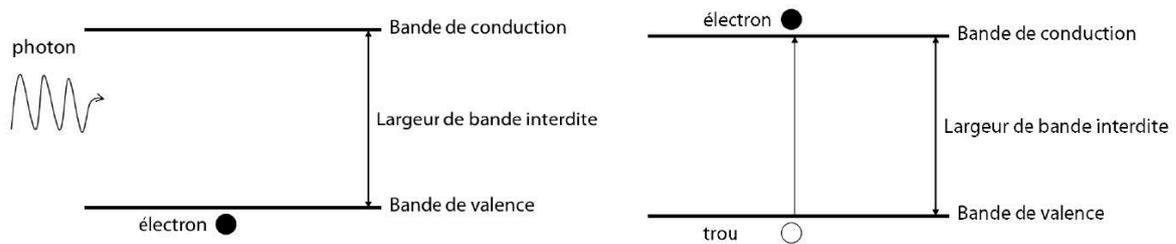


Figure I-12 Phénomène d'absorption dans un semi-conducteur

Sur cette Figure I-122, à gauche : un photon incident pénètre dans le semi-conducteur et à droite, son énergie est suffisante pour extraire un électron libre de la bande de valence et le transférer à la bande de conduction

En fonction de sa valeur, l'intégralité ou une partie de l'énergie d'un photon peut être déposée dans un matériau via différents mécanismes : l'absorption photoélectrique, la diffusion Compton et la production de paires électron-positron [5]. Seul l'effet photoélectrique sera traité dans l'étude qui suit car les détecteurs d'ECLAIRS ont été conçus pour rendre la probabilité d'apparition des deux autres phénomènes négligeable [6] [7]. En réalité, seule une partie de l'énergie est transférée aux électrons de valence. Une autre partie se dégrade sous forme de chaleur [8]. Par conséquent, l'énergie nécessaire pour créer une

paire électron-trou (effet photoélectrique) doit être plus importante que la largeur de la bande interdite.

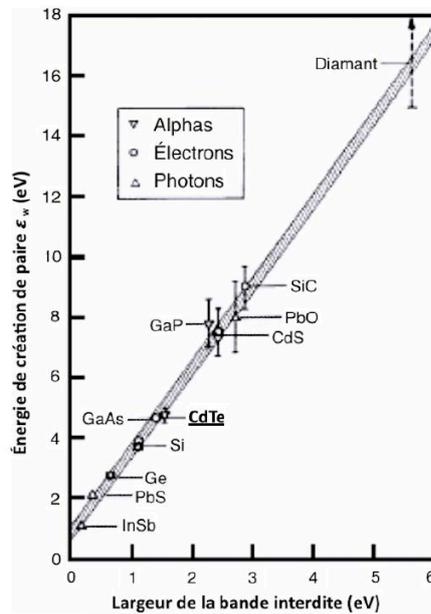


Figure I-13 Corrélation entre l'énergie de création de paires E_p et la largeur de la bande interdite E_g pour différents matériaux semi-conducteurs. D'après les spécifications techniques des détecteurs CdTe $E_g = 1,44\text{eV}$ et $E_p = 4,43\text{eV}$ [4].

De ce fait, le nombre N de paires électron-trou créées en fonction de l'énergie E du photon incident est de la forme :

$$N = \frac{E_\gamma}{E_\omega}$$

Afin de collecter les N paires pour les traiter, il faut les faire dériver à l'aide d'un champ électrique extérieur. Les trous vont transporter une charge Q_p dans le sens du champ électrique $\sim E$ alors que les électrons du nuage transportent une charge Q_n dans le sens opposé. Ces dérives entraînent l'apparition d'une impulsion de courant. Ce mouvement va induire, à chaque interaction d'un photon dans le volume sensible du détecteur, un courant instantané sur des électrodes pendant la durée du transit des charges.

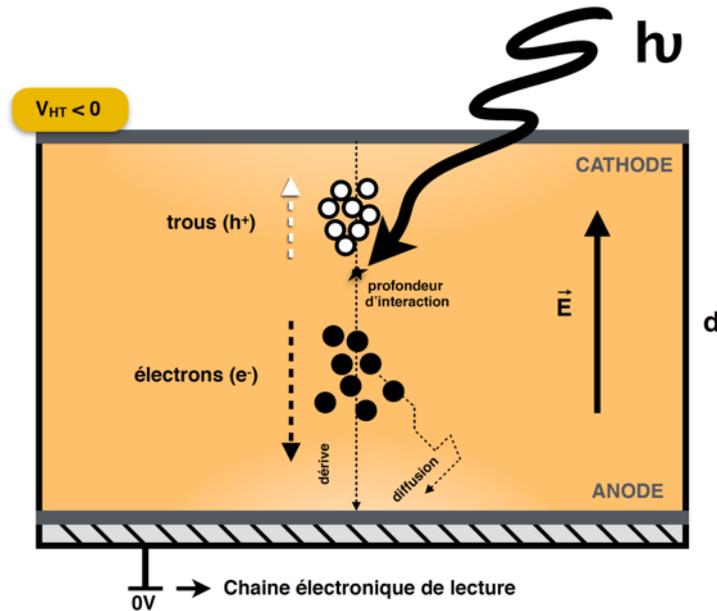


Figure I-14 Fonctionnement des détecteurs CdTe d'ECLAIRS

L'interaction d'un photon à une profondeur déterminée par sa capacité d'absorption, produit un nuage de charges. Ces paires dérivent, sous l'effet du champ électrique appliqué et transportent la charge $N \cdot q$ aux électrodes en Platine (Pt) et Indium/Titane (In/Ti) respectivement pour la cathode et l'anode.

D'après Millman et Halkias [9], la charge totale induite, appelée aussi charge collectée, est obtenue en intégrant simultanément la contribution du courant d'électrons et du courant de trous sur leur temps de vol respectif, temps pour rejoindre les extrémités du détecteur d'épaisseur d :

$$Q(t) = \int_0^{t_{vn}} I_n(t) dt + \int_0^{t_{vp}} I_p(t) dt$$

La contribution de chaque type de porteur dans le signal induit dépend donc du temps de vol et donc de la profondeur d'interaction. Si aucun porteur n'est perdu au cours de la dérive, la valeur finale de $Q(t)$ vaut $N \cdot q$ et dépend uniquement de l'énergie du photon incident (cf. figure 1.18).

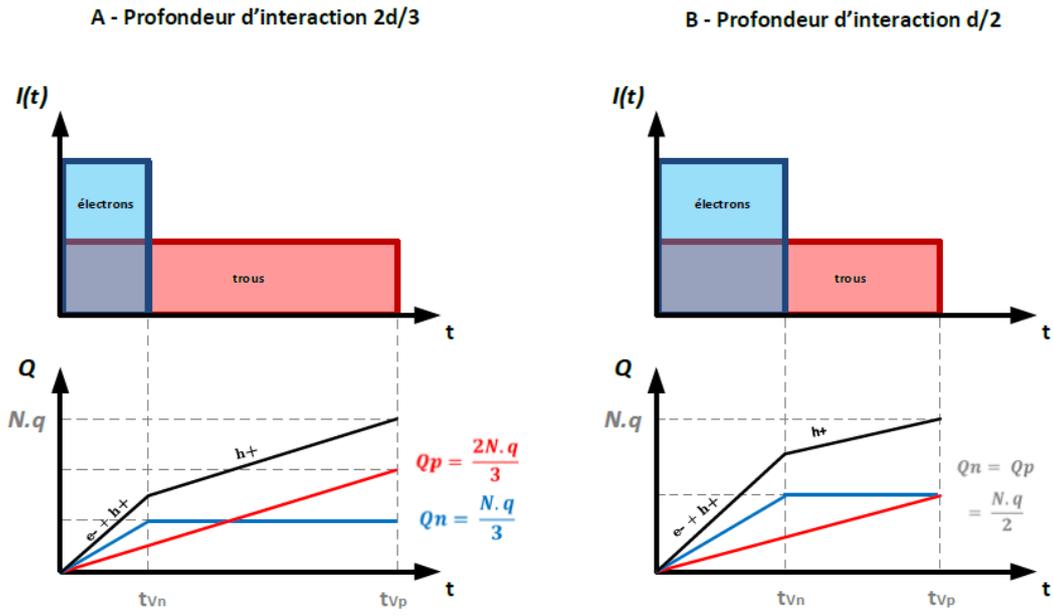


Figure I-15 Évolution temporelle de l'impulsion de courant induite par le transit de chaque type de porteur sous l'effet du champ électrique.

En intégrant le courant instantané (aire sous la courbe $i(t)$), on obtient une charge image qui s'établit aux électrodes et qui devient maximale après le transit de tous les porteurs. Cette charge totale $N.q$, directement proportionnelle au dépôt d'énergie, est partagée entre les porteurs. La contribution des charges Q_n et Q_p est fonction de la profondeur d'interaction.

A – Pour une profondeur de 66%, la charge image est dominée par le mouvement des trous.

B - A mi-distance des électrodes, la contribution des porteurs est identique soit

$$|Q_n| = |Q_p| = 0,5 \times N.q$$

Par conséquent, d'après la formule (1.2), la valeur maximale de la charge induite Q (en Coulomb) par un photon d'énergie E_γ , en fonction de la charge élémentaire q ($\approx 1,6.10^{-19}C$), peut se formuler ainsi :

$$Q(E_\gamma) = q * \frac{E_\gamma}{E_\omega}$$

Les charges électriques Q , proportionnelles aux énergies déposées sur les détecteurs, délivrées par 32 CdTe (pour un XRDPIX), seront donc converties en tension, filtrées, amplifiées et multiplexées par l'ASIC IDef-X afin de pouvoir numériser, plus loin dans la chaîne d'acquisition, l'information de l'énergie. L'acquisition sera faite après la collection

de la charge totale (cf. figure 1.18), une fois que les porteurs les plus lents auront terminé leur transit vers l'électrode.

I.3.3.2.2 ASIC

ASIC IDef-X : L'ASIC a été conçu pour être connecté à l'anode du détecteur, cas où il présente les meilleures performances. Il permet de convertir les charges électriques (courants) générées par les détecteurs CdTe en tensions. Il contient des registres numériques permettant principalement de détecter les voies touchées parmi les 32, de programmer des seuils de détection, de maintenir les tensions images et ainsi de les positionner séquentiellement sur l'unique sortie différentielle qu'il présente. Chacune des tensions images des 32 détecteurs est multiplexée sur une seule et même ligne de transmission différentielle à destination des ELS pour mise en forme et numérisation.

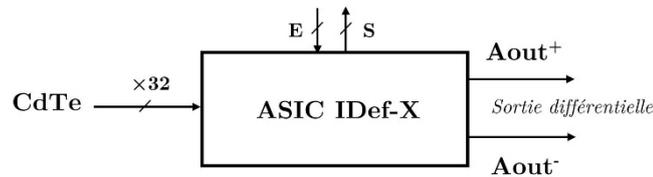


Figure I-16 Représentation schématique de l'ASIC IDef-X

En considérant la documentation de l'ASIC livrée par le CEA [10], les tensions de sorties A_{out+} et A_{out-} en fonction de la charge $Q(E\gamma)$ sont :

$$\begin{cases} A_{out+} = V_{ref_{out}}^+ + \frac{LB - V_{ref_{in}} + Q(E\gamma) * G}{2} \\ A_{out-} = V_{ref_{out}}^- - \frac{LB - V_{ref_{in}} + Q(E\gamma) * G}{2} \end{cases}$$

Où $V_{ref_{in}} = V_{ref_{out}} = 1,65V$ est la tension de mode commun autour de laquelle se trouveront les variations. $LB = 0,9V$ est une ligne de base interne, c'est-à-dire, la tension que l'on va lire lorsque qu'aucune charge n'est envoyée. $G \approx 0,2V/fC$ [11] c'est le gain du pré-amplificateur (en Volt par femto (10^{-15}) Coulomb) interne appliqué aux charges Q reçues.

Soit :

$$\begin{cases} A_{out+} = 1.275 + \frac{Q(E\gamma) * G}{2} \\ A_{out-} = 2.025 - \frac{Q(E\gamma) * G}{2} \end{cases}$$

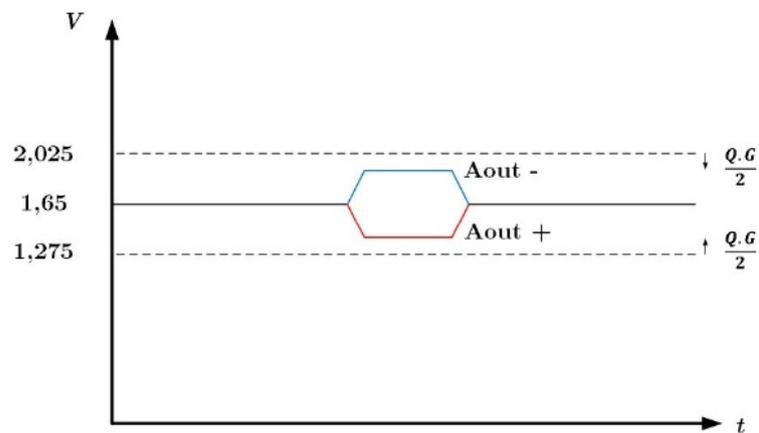


Figure I-17 Fonctionnement de l'ASIC IDef-X

On constate que la charge électrique $Q(E)$ est répartie avec un rapport $\frac{1}{2}$ sur les deux tensions de sorties A_{out+} et A_{out-} de l'ASIC. Cette paire différentielle sera déportée dans un câble bifilaire torsadé blindé. Cela afin d'effectuer la différence entre ces deux lignes pour récupérer l'intégralité de la charge image tout en s'immunisant aux parasites extérieurs pouvant survenir lors du transport du signal vers l'Électronique de Lecture Secteur. Lorsqu'on ne lit aucun canal, l'entrée du buffer différentiel est mise à une valeur de référence (commune aux 32 canaux) qui vaut $V_{ref_{in}}$

I.3.3.3 Électronique de Lecture Secteur

L'Électronique de Lecture Secteur (cf. 2 - figure 1.13) est dédiée à la gestion des XRDPIX présents sur le plan de détection. Il y a au total 8 boîtiers ELS identiques, qui sectorisent le plateau. Cette sectorisation a été définie au début du projet pour respecter des contraintes de temps liées à la capacité du codeur (analogique / numérique) mais aussi pour des raisons de redondance. Si un secteur électronique est hors-service, l'instrument peut continuer à

fonctionner de manière dégradée. Un ELS est responsable de la lecture des énergies potentiellement présentes sur 800 détecteurs, il gère donc au total 25 XRDPIX (32 CdTe×25 XRDPIX =800 CdTe et 800 CdTe×8 secteurs = 6400 CdTe). Chaque ELS est composé des 4 cartes électroniques suivantes :

- Carte MUX/ADC : responsable du multiplexage des 25 signaux différentiels analogiques (tensions images des énergies en sortie de l'ASIC IDef-X), leur amplification et mise en forme, ainsi que de la numérisation sur 12 bits des signaux à l'aide d'un ADC (Analog to Digital Converter), et intervient quant à la numérisation des Housekeepings propres à l'ELS.
- Carte HV/LVPS : (High Voltage / Low Voltage Power Supply) en charge de la génération, et la répartition des tensions nécessaires pour les autres cartes électroniques de l'ELS en régulant les alimentations des convertisseurs DC/DC (UGTS) et génère aussi la haute tension (-500V) nécessaire à la polarisation des détecteurs.
- Carte Pré-processeur : basée sur un FPGA (Field-programmable gate array), cette carte pilote la séquence de lecture des détecteurs (pilotage des ASICs et de l'ADC) et effectue la mise en forme des messages photons. Elle pilote aussi la haute tension et communique de façon bidirectionnelle avec l'UGTS afin de transmettre les informations des photons.
- Carte Backplane : permet d'interfacer mécaniquement et électriquement les cartes MUX/ADC, HV/LVPS et Pré-processeur entre elles.

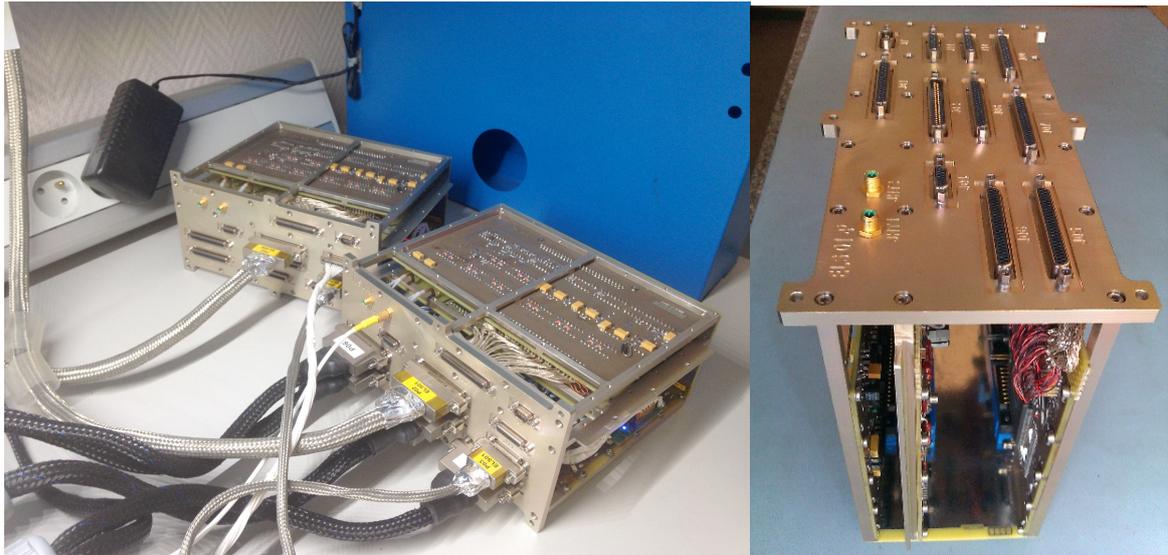


Figure I-18 Photos des ELS prototypes

Une 5ème carte électronique intervient dans ce processus, mais n'est pas référencée comme un produit propre à l'ELS mais au "plan de détection". C'est la carte Interface Plateau. À l'image des autres cartes, elle est en 8 exemplaires et permet l'interfaçage mécanique de 25 XRDPIX sur le plan de détection et l'interfaçage électrique de ceux-ci avec un ELS.

I.4 Protocole de validation des cartes Électroniques

Pour la conception et la fabrication des cartes électroniques du sous-système DPIX, une méthodologie avec une démarche « spatiale » à tous les niveaux du développement a été adopté. Cette méthodologie est basé sur le développement de type cycle en V.

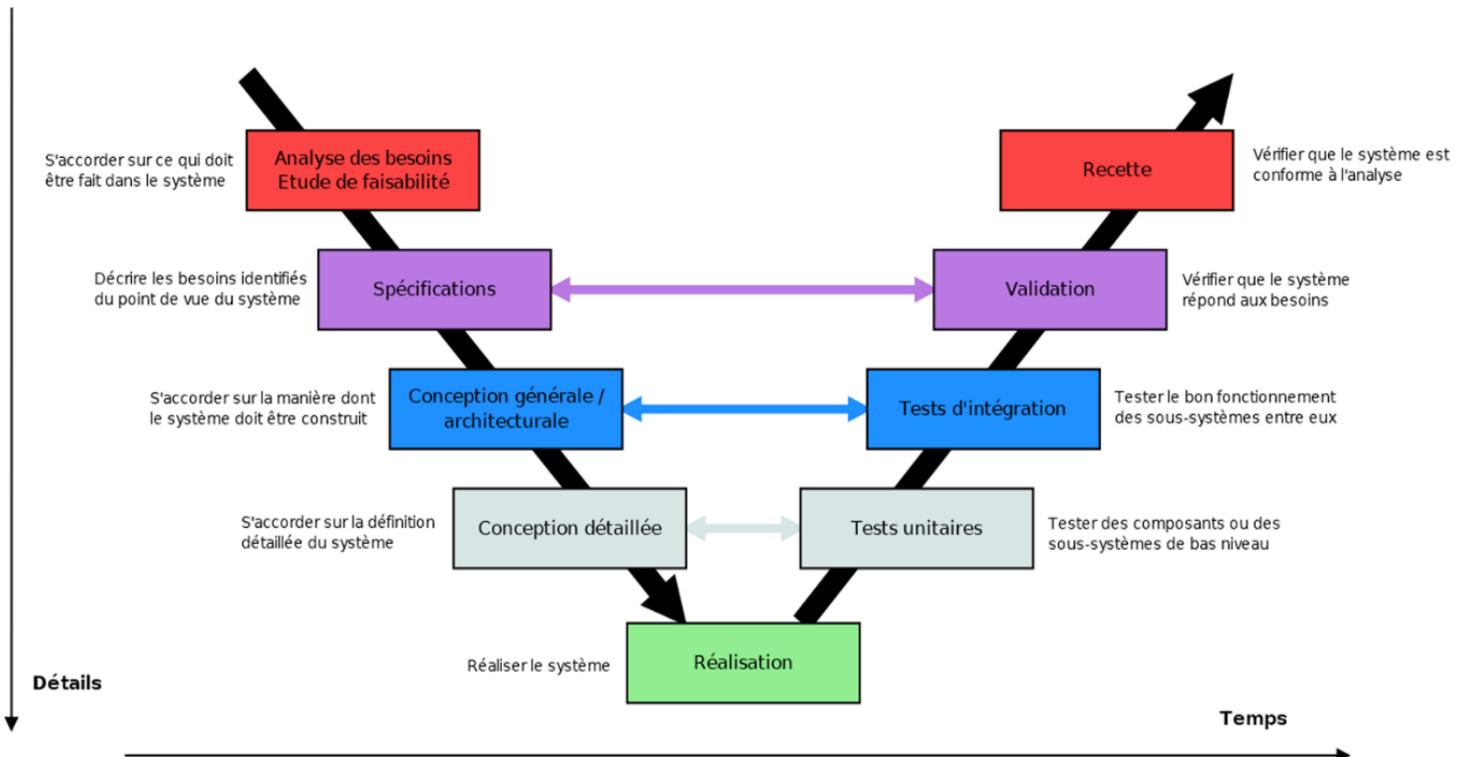


Figure I-19 Méthodologie de développement

Cette méthode permet de maîtriser les risques et en cas d'anomalie et de limiter un retour aux étapes précédentes. Les phases de la partie montante doivent renvoyer de l'information sur les phases de la partie descendante lorsque des défauts sont détectés afin d'améliorer les sous systèmes et garantir la qualité et la fiabilité des modèles finaux. Ce modèle de développement permet aussi de cadrer et formaliser les différentes étapes de développement en fournissant des documents « clés » pour chaque étape.

Un protocole de validation a été mis en place dès la fin de la conception détaillée, avant même la réalisation des cartes électroniques et se termine par la validation du bon fonctionnement des cartes dans l'environnement spatial.

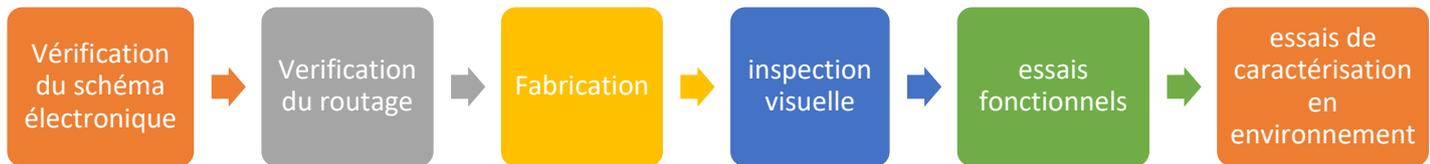


Figure I-20 Protocole de validation des cartes électroniques

Sous forme de vérification par lecture croisée des schématiques ainsi que des routages électroniques des cartes. Cette vérification permet de limiter les erreurs juste avant le lancement en fabrication et de permettre à l'équipe de tests de mieux connaître les cartes électroniques qui devront être validées. Nous avons mis en place ce protocole pour les cartes EQM et FM.

II Conception et Développement du banc de test de caractérisation en environnement

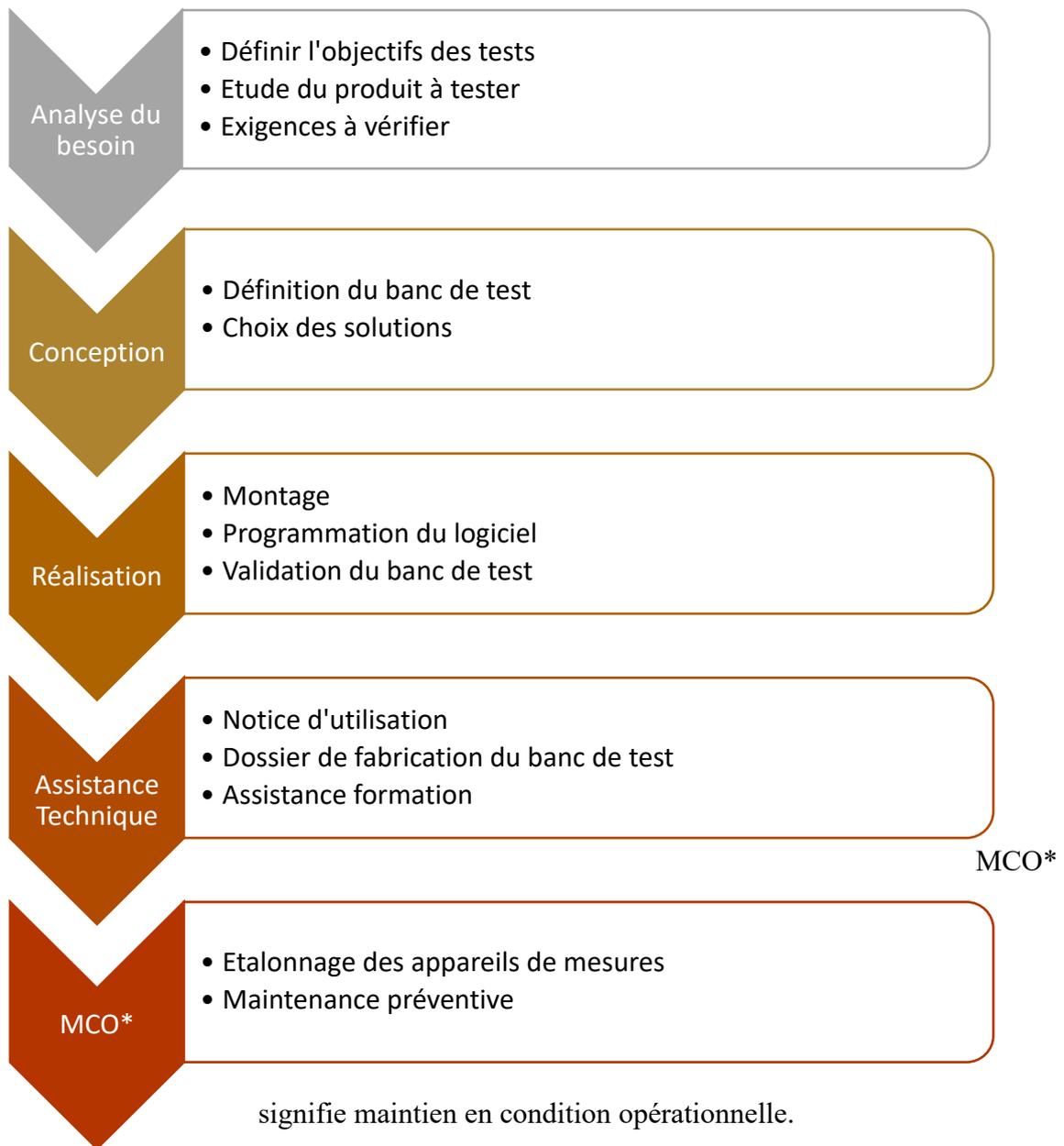
C'est donc dans ce contexte scientifique et technique que mon mémoire d'ingénieur CNAM s'est déroulé. Mon rôle dans l'équipe DPIX de l'IRAP commençait dès la conception détaillée des cartes du module ELS vu précédemment et se terminait avec les tests de caractérisation en environnement spatial.

Par définition un banc de test, appelé aussi système de test, permet de mettre un produit en conditions d'utilisation, afin d'observer et d'analyser ses comportements. Il est très utilisé dans l'industrie et représente pour ce secteur une part importante du budget de développement du produit. Le banc de test est un système physique fonctionnel, destiné à vérifier et/ou valider les propriétés et les fonctionnalités du produit, tout au long du processus de la fabrication jusqu'à sa forme définitive.

Les besoins en terme de systèmes de test varient selon la nature du produit à tester. Il faut ainsi concevoir un banc de test sur mesure, spécifique à chaque gamme de produits.

La conception, le développement et la mise en place d'un banc d'essais pour caractériser et valider les cartes électroniques MUX ADC et LV-HVPS m'ont été proposés pour mon mémoire d'ingénieur Mesure analyse option instrumentation. Ce banc permettra d'assurer que leurs performances correspondent aux spécifications techniques dans les conditions d'utilisation finale. Le banc de tests développé permettra aussi de tester un module ELS complet dans un environnement contrôlé.

La démarche appliquée pour la conception de ce banc de tests est la suivante :



II.1 Analyse du besoin

Dans un premier temps j'ai donc analysé la Spécification Technique de Besoin [12] de l'instrument ECLAIRS pour connaître les propriétés et les fonctionnalités des cartes à caractériser.

II.1.1 Objectifs des tests

L'objectif des tests est de caractériser et de valider le bon fonctionnement des cartes dans l'environnement final d'utilisation.

En fonction de la température, de la pression et du temps d'utilisation, les caractéristiques des composants électroniques peuvent varier. Ceci est tout à fait normal et des tolérances sont indiquées par les fabricants. Sur des cartes électroniques sensibles et soumises à un environnement difficile, ces variations peuvent être non négligeables. Une caractérisation est donc nécessaire pour connaître précisément les changements liés à l'électronique et savoir si les exigences de la spécification technique du besoin [12] sont toujours respectées.

Cet environnement met aussi à rude épreuve les composants électroniques. Même si leurs caractéristiques sont faites pour supporter ces conditions, nous ne sommes pas à l'abri de défauts de jeunesse, problème de soudure ou de collage qui peuvent apparaître lors de cycles thermiques.

II.1.2 Environnement des tests

Dans le domaine spatial, les conditions de tests sont définies en suivant les normes ECSS (European Cooperation for Space Standardization). Le document de référence est l'ECSS-E-ST-10-03C fourni par l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

II.1.2.1 Température

Pour caractériser et valider ces deux cartes électroniques dans un environnement semblable à celui qu'elles vont rencontrer dans l'espace, des analyses thermiques ont été réalisées à travers l'utilisation de modèles thermiques et spécifiées dans le document de design du DPIX [13]. Pour mes essais je vais donc me référer à ce document.

Le tableau suivant, extrait du document de design [13], représente les températures minimales et maximales pour chaque sous système de l'instrument ECLAIRs.

Sub-System	Operational				Switch OFF	Non Operating		Ground store/transport		Start-up	Grad. over the plane	Stability per Orbit (°)	
	T °C	min	Performance			max	min	max	min				max
			min.	max.									
CdTe	-25	-25	-18	+30	+38	-35	+40	-35	+40	-30	N.A.	± 2.5	
Cold Plate	-30	-30	-23	+25	+33	-35	+40	-35	+40	-30	± 2.5	± 2.5	
ELS (box)	-20	-10	+40	+40	+50	-35	+50	-35	+40	-30	N.A.	± 3	
UGD	-20	-10	+40	+40	+50	-35	+50	-35	+50	-30	N.A.	N.A.	

Tableau 3 tableau extrait du document « *design and justifications of the DPIX sub-system* »

Dans notre cas, le sous-système testé est l'ELS, nous allons donc nous référer à ces valeurs.

Dans le document ECSS de l'ESA, la température de qualification minimale (TQMIN) et la température de qualification maximale (TQMAX) ont été définies à partir de la température opérationnelle minimale (TOPMIN) et de la température opérationnelle maximale (TOPMAX).

$$TQMIN = TOPMIN - 10^{\circ}\text{C}$$

$$TQMAX = TOPMAX + 10^{\circ}\text{C}$$

Pour nos essais nous avons donc la température de qualification minimale égale à -30°C et la température de qualification maximale égale à $+50^{\circ}\text{C}$. Il faudra aussi prendre en compte la variation de température que peut subir la carte électronique, qui a été définie dans le document par $\Delta T \leq 10^{\circ}\text{C}$ par heure.

II.1.2.2 Pression

Les essais en environnement ne comprennent pas uniquement la prise en compte de la température subie par l'électronique pendant la mission. Nous devons également considérer la pression que l'instrument rencontrera dans l'espace. La norme ECSS-E-ST-10-03C nous indique une pression de qualification pour notre mission inférieure à 10^{-5}mbar .

II.1.3 Études des Cartes Électroniques

Pour commencer j'ai analysé la spécification technique du besoin de la caméra DPIX [9] et de l'instrument ECLAIRS [3], ainsi que le document de contrôle des interfaces électriques du DPIX [10].

A partir de ces documents j'ai pu détailler les fonctionnalités de chaque carte.

II.1.3.1 Cartes LV-HVPS

La carte LV/HVPS, pour Low Voltage/High Voltage Power Supply, a pour objectif d'assurer la répartition des alimentations provenant de l'UGTS ($+7.5\text{V}$, -7.5V , $+5\text{V}$ et 3V) vers les modules XRDPIXs et ELS après filtrage. Elle génère et régule 3 basses tensions pour le fonctionnement de l'ELS : $+5\text{V}$, -5V et $+3,3\text{V}$ et une haute tension pouvant aller jusqu'à -450V afin de polariser les détecteurs des XRDPIXs. En outre, cette carte dispose aussi d'un circuit de protection en cas d'application de la haute tension sur les détecteurs sans avoir au préalable alimenté les circuits ASIC.

Le synoptique suivant présente les différentes fonctions de la carte LV-HVPS.

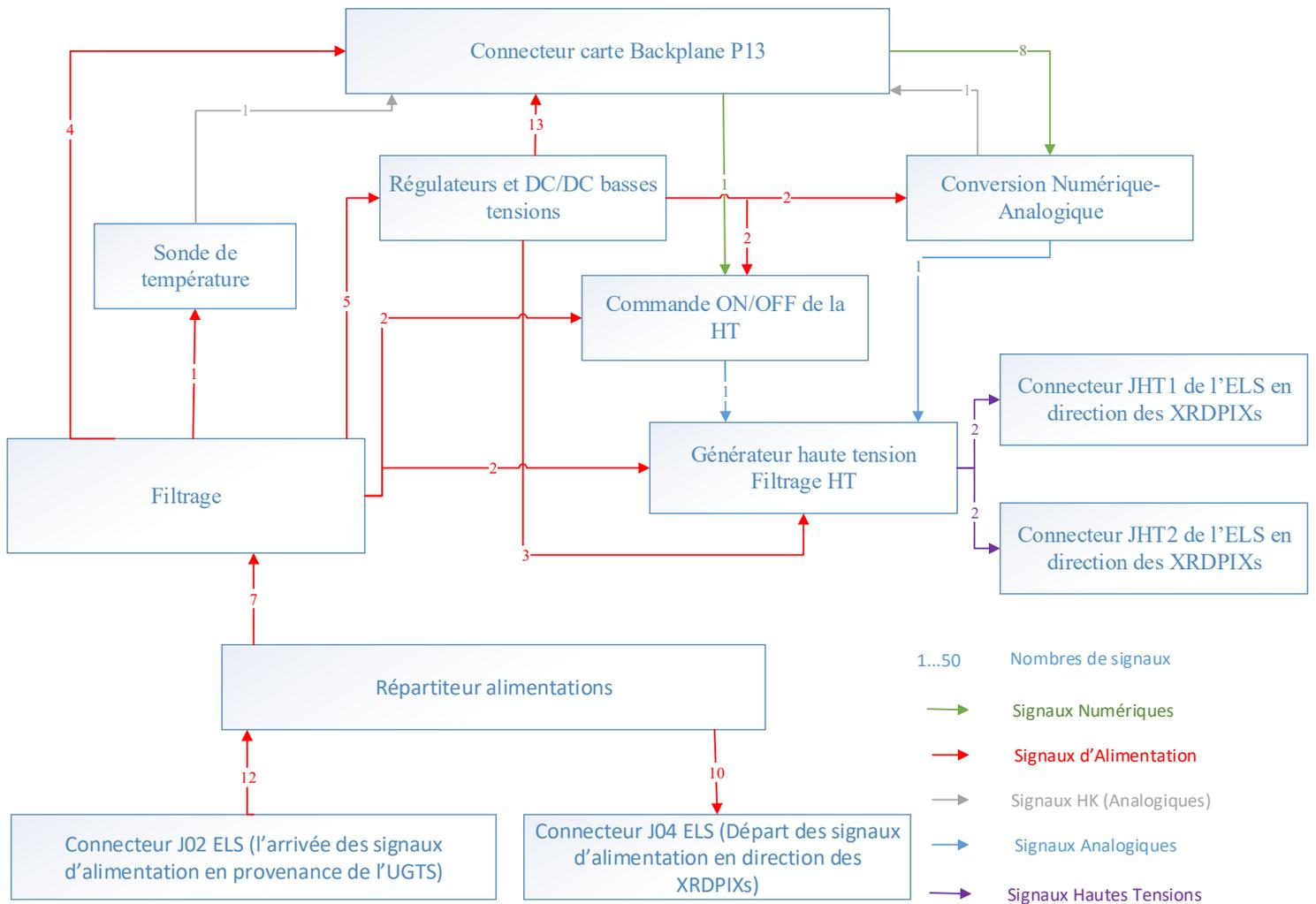


Figure II-1 Synoptique de la carte LV/HVPS

Pour cette carte électronique les exigences à vérifier sont :

- Vérifier la stabilité des basses et hautes tensions
- Vérifier le bon fonctionnement de la coupure de la haute tension quand les XRDPIXs sont alimentés (+3V ON)
- La haute tension doit être ajustable entre 0V et -450V
- La haute tension doit correspondre à la consigne choisie

II.1.3.2 Cartes MUX ADC

La carte MUX ADC, pour Multiplexeurs et Conversion Analogique Numérique, a pour objectif d'assurer le multiplexage des 25 signaux analogiques différentiels (Aout) en provenance des 25 XRDPIXs du secteur ainsi que de les filtrer et les amplifier à travers une chaîne de gain. Cette carte permet aussi le codage sur 12 bits des signaux analogiques Aout et des 11 signaux housekeepings d'un ELS. Le synoptique suivant présente les différentes fonctions de la carte MUX ADC.

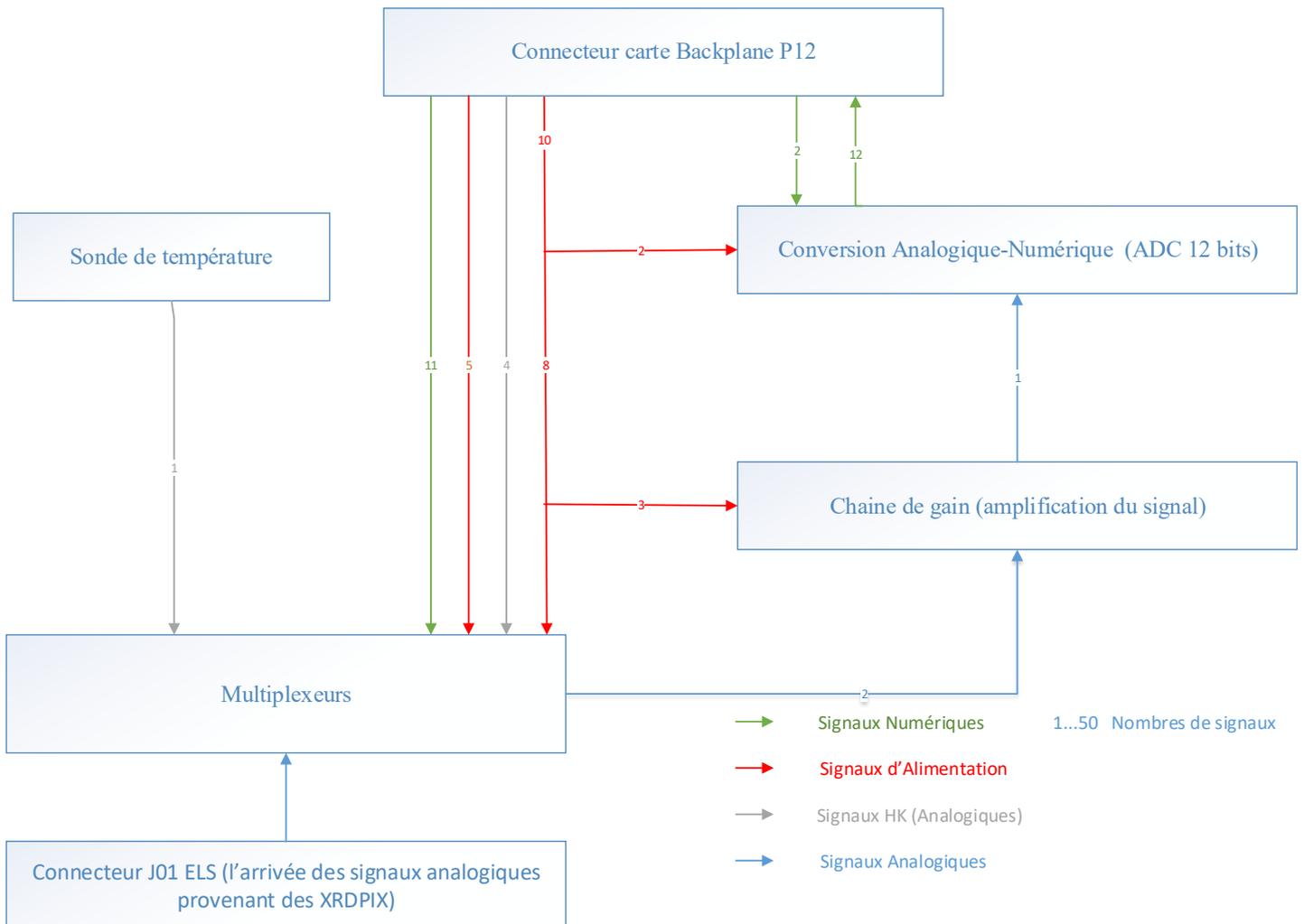


Figure II-2 synoptique de la carte MUX ADC

Pour cette carte électronique l'exigence à vérifier est la stabilité de la chaîne de gain sur 12 bits à ± 1 canal pour une température fixée. Nous devons aussi caractériser la stabilité et l'évolution du gain de cette chaîne en fonction de la température.

II.2 Conception

II.2.1 Définition du banc de test

II.2.1.1 Synoptique

Le synoptique suivant présente les principaux éléments du banc de tests à réaliser

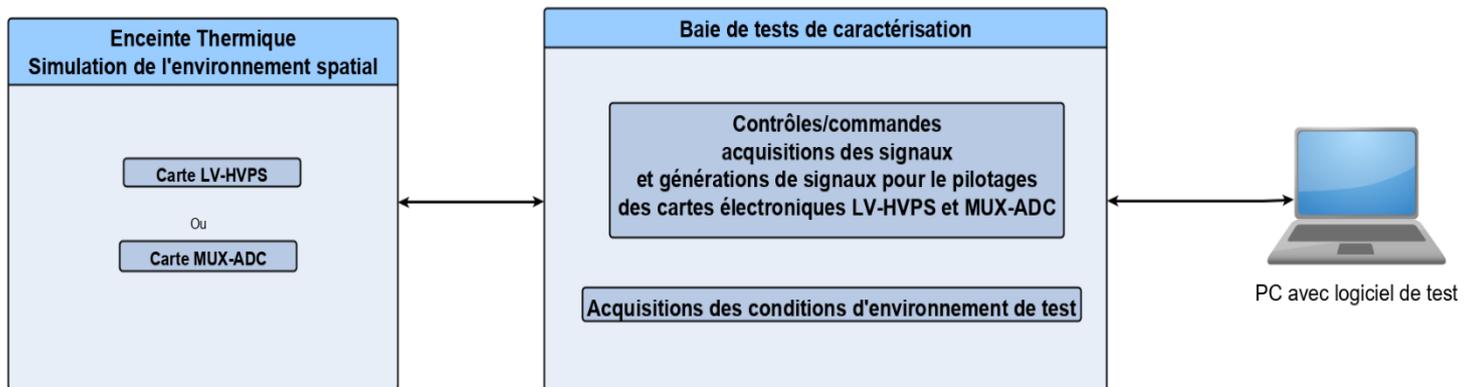


Figure II-3 Synoptique du banc de tests

II.2.1.2 Définition des signaux à mesurer

Pour définir le système d'acquisition à mettre en place, j'ai recensé les différents signaux à mesurer pour chaque carte afin de valider leur bon fonctionnement en fonction des exigences à vérifier. J'ai aussi inventorié les signaux permettant de piloter la carte électronique.

Inventaire des signaux de la carte LV-HVPS

Signaux	Nature du signal	Type	Gamme	Tolérances	Commentaires
+3V	Analogique	Entrée	0-5V	±1%	Tensions d'alimentation de l'ELS pour contrôle
+5VR	Analogique	Entrée	0-10V	±1%	
+7,5V	Analogique	Entrée	0-10V	±1%	
-7,5V	Analogique	Entrée	0-10V	±1%	
+3,3V	Analogique	Entrée	0-5V	±1%	Tensions générées par la carte LV-HVPS
+3VF	Analogique	Entrée	0-5V	±1%	
+5VF	Analogique	Entrée	0-10V	±1%	

HT1	Analogique	Entrée	0-450V	±5%	Atténuateur 1/1000
HT2	Analogique	Entrée	0-450V	±5%	
CTRL HT	Analogique	Entrée	0-5V	±1%	Signaux permettant l'asservissement de la HT
REF HT	Analogique	Entrée	0-5V	±1%	
DHT0	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	Signaux permettant de contrôler la consigne de la HT
DHT1	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	
DHT2	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	
DHT3	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	
DHT4	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	
DHT5	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	
DHT6	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	
DHT7	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	
ON/OFF	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	Signal permettant d'allumer ou d'éteindre la HT

Pour la carte LV-HVPS nous avons besoin d'un système d'acquisition composé de 11 entrées analogiques et de 9 sorties numériques. Pour la mesure des hautes tensions HT1 et HT2 nous installerons un atténuateur en entrée de type pont diviseur de tension de rapport 1/1000.

Inventaire des signaux de la carte MUX-ADC

Signaux	Type	Direction	Gamme	Tolérances	Commentaires
D0	Numérique	Entrée	0-3,3V	-9%	Signaux de sortie du convertisseur analogique numérique sur 12 bits
D1	Numérique	Entrée	0-3,3V	-9%	
D2	Numérique	Entrée	0-3,3V	-9%	
D3	Numérique	Entrée	0-3,3V	-9%	
D4	Numérique	Entrée	0-3,3V	-9%	
D5	Numérique	Entrée	0-3,3V	-9%	
D6	Numérique	Entrée	0-3,3V	-9%	
D7	Numérique	Entrée	0-3,3V	-9%	
D8	Numérique	Entrée	0-3,3V	-9%	
D9	Numérique	Entrée	0-3,3V	-9%	
D10	Numérique	Entrée	0-3,3V	-9%	
D11	Numérique	Entrée	0-3,3V	-9%	
RDCS	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	Signal de fin de conversion du convertisseur
CONVERT	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	Signal de conversion du convertisseur
A0	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	Adresse du choix de l'entrée du
A1	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	

A2	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	multiplexeur sur 3 bits
EN_0_3	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	Activation et désactivation des multiplexeurs
EN_4_7	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	
EN_8_11	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	
EN_12_15	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	
EN_16_19	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	
EN_20_23	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	
EN_24_HK1	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	
EN_HK2	Numérique	Sortie	0-3,3V	-9%	
Aout+ XX	Analogique	Entrée	0-2,2V	±0,20%	Signal analogique différentiel provenant des XRDPIX (simulé avec un standard de tension)
Aout- XX	Analogique	Entrée	0-2,2V	±0,20%	

Pour la carte MUX-ADC nous avons donc besoin de 11 sorties numériques pour piloter les différents multiplexeurs que comportent la carte électronique MUX-ADC et de 2 entrées analogiques pour connaître le signal analogique injecté en entrée de la carte simulant les signaux des XRDPIXs.

Les signaux permettant de piloter le convertisseur et les 12 signaux de sorties de l'ADC ne sont pas pris en compte pour le choix de notre système d'acquisition car un système de mesure indépendant a été développé. Il faudra simplement le piloter à l'aide du logiciel d'acquisition.

II.2.2 Choix des solutions

II.2.2.1 Définition d'un processus de mesure

La maîtrise du processus de mesure est indispensable pour prendre une décision à partir des résultats obtenus sans remettre en question leur valeur. Ce processus a pour vocation d'approcher la vraie valeur d'une grandeur. La mesure ne correspond pas à une réalité absolue, elle permet seulement de s'en approcher.

Le mesurage est un processus qui à sa propre variabilité. Ce processus peut être représenté par le diagramme des 5M ou ISHIKAWA. Ces 5M correspondent à Méthode, Milieu, Matière, Main d'œuvre, Moyen. En effet, tous les mesurages génèrent des erreurs sur le

résultat. Ces erreurs sont dues à la méthode de mesure, aux instruments, à l'environnement, aux personnes, et à l'objet mesuré lui-même.

Le diagramme suivant permet de représenter le processus de mesure et les éléments qui influent sur le résultat. Le mesurage étant réalisé dans un système de mesure imparfait, toute valeur de mesure est par conséquent fausse.

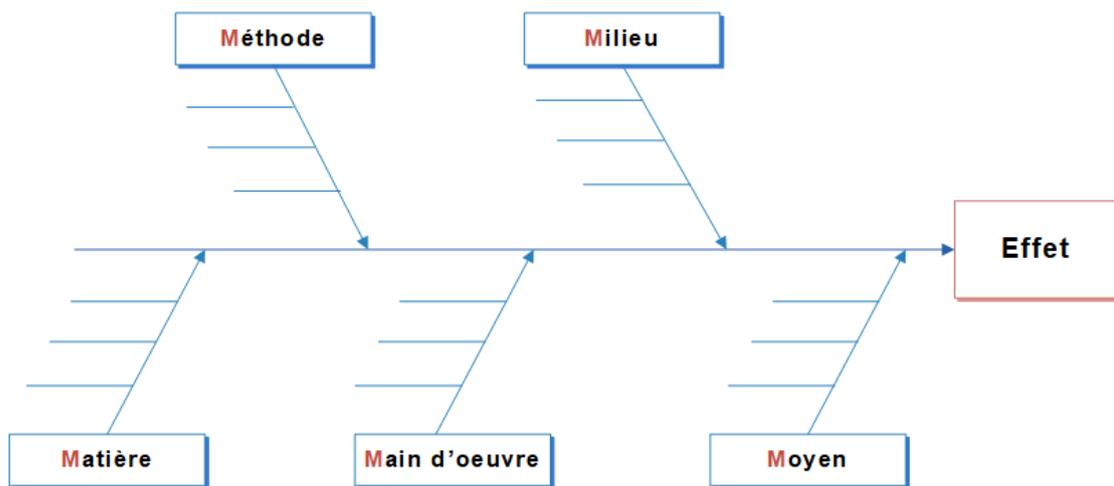


Figure II-4 Exemple de diagramme 5M

Le résultat d'une mesure s'exprime par la somme entre la valeur vraie et l'erreur de mesure. La valeur vraie est utopique, c'est la valeur qu'on mesurerait pour un mesurage parfait. Le but est de s'en approcher. Pour cela il faut donc réduire du mieux possible l'erreur de mesure. En plus d'un écart entre la valeur vraie et la valeur mesurée, on peut observer que si l'on fait plusieurs fois une même mesure on observe des résultats qui diffèrent entre eux. Il y a donc une incertitude de la mesure associée à chaque résultat. L'incertitude nommée U est représentée par une plage de valeur de telle sorte qu'il y ait de fortes probabilités que la valeur vraie s'y trouve incluse.

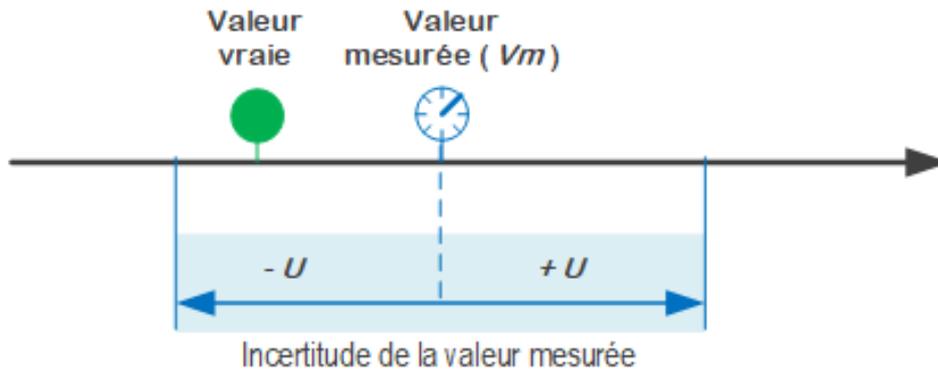


Figure II-5 Incertitude de mesure

Il faut bien faire la différence entre l'erreur de mesure et l'incertitude de mesure. L'erreur de mesure est l'écart entre la valeur vraie et la valeur mesurée alors que l'incertitude de mesure est la dispersion des valeurs pouvant être attribuée aux mesurandes.

Les spécifications des cartes électroniques sont accompagnées d'une tolérance T, c'est la zone de valeurs acceptable. La spécification est exprimée de la manière suivante :

$$\text{Valeur Cible} = \frac{\text{Tolérance}}{2}$$

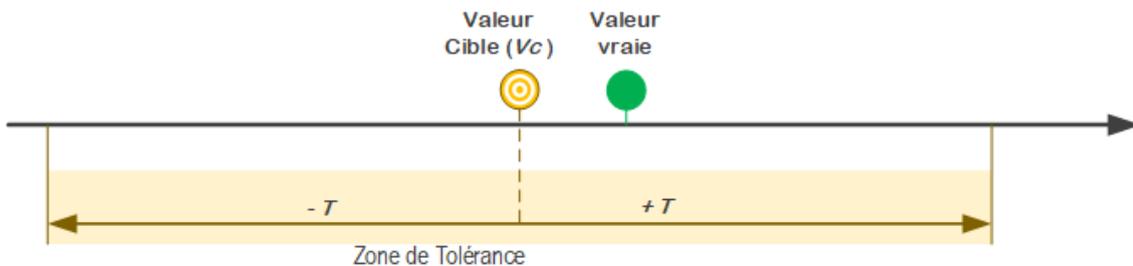


Figure II-6 Tolérance

Il y a donc un lien entre la tolérance et l'incertitude. Il est évident que si l'incertitude est plus grande que la tolérance, il sera impossible de juger de la conformité des cartes.

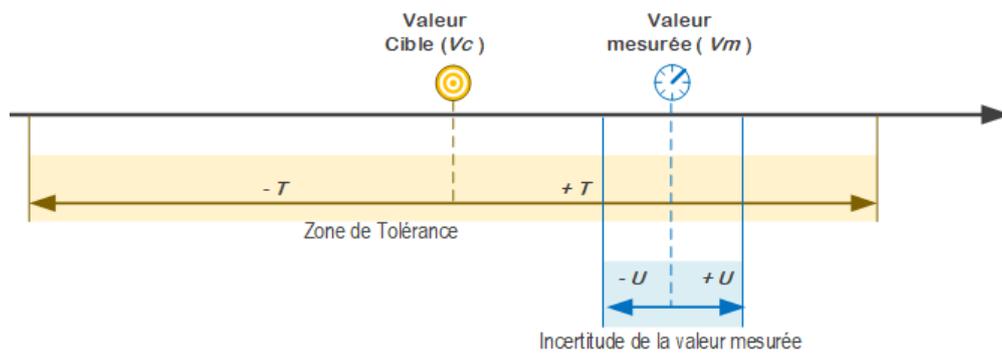


Figure II-7 Incertitude et tolérance

L'adéquation entre l'incertitude U de mesure et la tolérance T est appelé la capacité.

$$\text{Capabilité} = \frac{U}{T}$$

Ce rapport entre l'incertitude et la tolérance doit être compris entre $1/2$ et $1/10$. Cette exigence permet de déterminer le moyen de mesure le plus adapté en fonction des besoins et contraintes économiques car l'acquisition et la maîtrise de certains moyens de contrôle peuvent s'avérer onéreuses.

Pour le banc de test, j'ai utilisé une évaluation simplifiée de l'incertitude de mesure en me basant sur le diagramme 5M. En émettant l'hypothèse que dans le processus de mesure il existe principalement que deux sources d'incertitudes :

- Le moyen correspondant à l'instrument utilisé
- 4M restants (Milieu, Méthode, Main d'œuvre, Matière) autres sources d'incertitudes

On a donc $U_{\text{Mesure}} = U_{\text{Moyen}} + U_{4M}$

On pose $U_{\text{Moyen}} = U_{4M}$

Cela donne $U_{\text{Mesure}} = 2 \times U_{\text{Moyen}}$

Si l'on souhaite par exemple un processus de mesures permettant d'obtenir une capacité de $1/6$ l'appareil de mesure à retenir devrait avoir une incertitude d'étalonnage inférieure ou égale à $1/12$.

Prenons l'exemple d'une Tolérance $T = 0.1$, l'incertitude maximum de l'appareil sera de $0.1/12=0.0083$

Je me suis basé sur ce diagramme et ces notions dès la conception de mon banc de tests pour avoir un processus de mesure maîtrisé permettant de limiter les erreurs. Pour éviter une variabilité de mesure effecteur-dépendante, j'ai décidé d'automatiser la mesure. Dans notre cas, l'environnement ne sera pas un facteur d'erreur car le but est de caractériser les mesurandes en fonction de celui-ci. Ainsi, dans mon banc de tests, ce qui permet de limiter les erreurs de mesures est d'une part la méthode de mesure employée et d'autre part les instruments choisis. Je détaille ces choix dans les chapitres suivants.

II.2.2.2 Acquisition et contrôle hardware

Au vu des contraintes de temps et du manque de moyens humains pour développer ce banc de tests, je me suis dirigé vers des produits déjà existants dans le commerce. Le choix d'un instrument de mesure demande de faire une étude de marché et de savoir détailler le besoin avec le plus de précision possible, ceci pour éviter l'acquisition d'un appareil finalement inutilisable ou bien de mesures erronées. Le plus important est donc de choisir un appareil permettant d'effectuer des mesures dont l'incertitude correspond à nos spécifications, l'acquisition des signaux définis et l'automatisation des essais. Pour automatiser les essais, je dois choisir des instruments pilotables à l'aide d'un PC et utiliser de préférence des protocoles de communication standards, comme l'USB, l'Ethernet ou le RS232. Pour le banc de tests j'ai fait le choix d'utiliser une technologie robuste et facilement remplaçable en cas de panne. Je vais donc me diriger vers un appareillage ayant fait ses preuves pour l'acquisition des signaux, présentant l'avantage de produire une gamme maintenue dans le temps par le fabricant.

Afin de répondre au mieux à ces critères, mon choix s'est porté sur la technologie du fabricant National Instrument. Leur technologie « tout en un » permet l'acquisition et la commande numérique via l'utilisation d'un même module. Ils proposent également un logiciel de développement pour créer soi-même des programmes de contrôles/commandes de qualité.

Pour commencer, j'ai besoin d'un système permettant de mesurer les signaux analogiques et possédant aussi des entrées/sorties numériques pour piloter les cartes électroniques.

Le module choisi est référencé sous l'appellation USB NI 6363 [14]. Ce système d'acquisition d'entrées/sorties multifonction est composé de 32 entrées analogiques, 4 sorties analogiques et de 48 entrées/sorties numériques. Il échantillonne à une vitesse de 1Méch par seconde en multicanaux sur 16 bits. Ces caractéristiques permettent de répondre parfaitement à notre besoin pour des signaux continus.



Figure II-8 Boitier USB NI 6363

Cet instrument est au cœur de notre processus de mesure. C'est l'instrument qui fera l'acquisition de tous les mesurandes à caractériser, hormis la sortie du codeur ADC.

Nominal Range Positive Full Scale (V)	Nominal Range Negative Full Scale (V)	Residual Gain Error (ppm of Reading)	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	Random Noise, σ (μ Vrms)	Absolute Accuracy at Full Scale (μ V)
10	-10	48	13	21	315	1660
5	-5	55	13	21	157	870
2	-2	55	13	24	64	350
1	-1	65	17	27	38	190
0.5	-0.5	68	17	34	27	100
0.2	-0.2	95	27	55	21	53
0.1	-0.1	108	45	90	17	33

Tableau 4 Tableau des incertitudes extrait de la datasheet de l'instrument USB6363

Ce tableau indique les incertitudes garanties par le constructeur pour le module USB6363. Au vu des tolérances spécifiées pour nos mesurandes, cet instrument de mesure remplira pleinement sa fonction. La documentation complète de ce module est disponible en annexe 4.

Pour caractériser au mieux la carte MUX ADC, nous avons besoin d'un générateur de tension pour injecter différentes tensions en entrée. Le convertisseur analogique-numérique de cette carte code la tension d'entrée sur 12 bits, soit de 0 à 4095 et est alimenté en $\pm 5V$. Son pas codeur sera donc de :

$$Pas_{ADC} = \frac{\text{Tension d'alimentation}}{\text{nombre de bits}}$$

$$Pas_{ADC} = \frac{10}{2^{12}} = 2,44 \text{ mV}$$

Sur la carte, en amont du codeur ADC, une chaîne composée d'amplificateurs opérationnels nous permet d'obtenir un Gain de 4,45.

Ceci est important car pour caractériser le convertisseur analogique-numérique, nous devons choisir un générateur avec une précision inférieure à :

$$Pas \text{ de la tension d'entrée} < \frac{2,44}{4,45} = 0,55 \text{ mV}$$

Nous allons donc utiliser un générateur calibrateur, ce type de générateur étant utilisé pour calibrer finement des appareils de mesures.

J'ai porté mon choix sur l'AOIP 8310 qui a pour caractéristiques en émission de tension continue résumé dans le tableau suivant:

Calibre	Gamme d'émission	Résolution	Précision / 1an
100 V	-5 à 110 V	100 μ V	0,004% L + 300 μ V
10 V	-1,1 à 11 V	10 μ V	0,004% L + 30 μ V
1 V	-0,11 à 1,1 V	1 μ V	0,005% L + 6 μ V
100 mV	-11 à 110 mV	100 nV	0,007% L + 2 μ V

Tableau 5 Spécification de l'AOIP 8310 extraite de la datasheet

Ce calibrateur pilotable en RS232 a une précision et une résolution nous permettant de caractériser finement la chaîne de gain de la carte MUX-ADC.

II.2.2.3 Acquisition et contrôle Software

Une fois le choix des instruments effectué, il est nécessaire de développer un logiciel permettant d'automatiser les acquisitions et de piloter les instruments. Pour la réalisation de ce programme de tests, j'ai choisi l'environnement de développement d'applications Labview (Laboratory of Virtual Instruments Engineering Workbench) de National Instrument. Il est spécifiquement conçu pour les ingénieurs et les scientifiques. Ce logiciel comparable à la plupart des systèmes de développement en langage C ou BASIC est parfaitement adapté pour l'acquisition de données, le contrôle d'instruments, l'analyse, le traitement et le stockage de données. Le langage de programmation utilisé par Labview est le langage G pour Graphique. Ce langage est basé sur le principe du flot de données, auquel ont été rajoutées des structures de programmation afin d'obtenir un langage de programmation complet. Au lieu de lignes séquentielles de code textuel, ce modèle de flux de données permet d'écrire du code fonctionnel en suivant des informations visuelles. On programme en posant des icônes qui représentent des fonctions sur un diagramme et on les relie par des fils qui représentent des flux de données, les variables. L'avantage de ce logiciel est d'une part la rapidité du développement et d'autre part sa compatibilité avec des instruments autres que National Instrument. Nous pouvons facilement piloter le standard de tension AOIP 8310 en RS232 ou le système d'acquisition permettant le contrôle et la lecture de l'ADC développé en interne par l'équipe projet.

Un programme LABVIEW est appelé « instrument virtuel » (VI) et permet de réaliser des interfaces graphiques personnalisées et conviviales permettant ainsi de créer un instrument virtuel spécifiques à nos besoins.

Le programme comporte deux éléments principaux. Une face-avant, correspondant à l'Interface Homme Machine et un diagramme où se trouve le programme en langage G. La face avant est l'interface utilisateur contenant les indicateurs et les commandes. Les commandes et indicateurs peuvent être des afficheurs numériques, des commutateurs booléens, des jauges, des vu-mètres, des boutons poussoirs, des graphes... Le diagramme contenant le code graphique du programme permet aussi de retrouver toutes les structures classiques des langages de programmation textuel tel que la boucle « while » ou « for », des séquençages, les conditions comme if ou case. On retrouve aussi les types de données comme les réels, les entiers, les booléens ainsi que les chaînes de caractères.

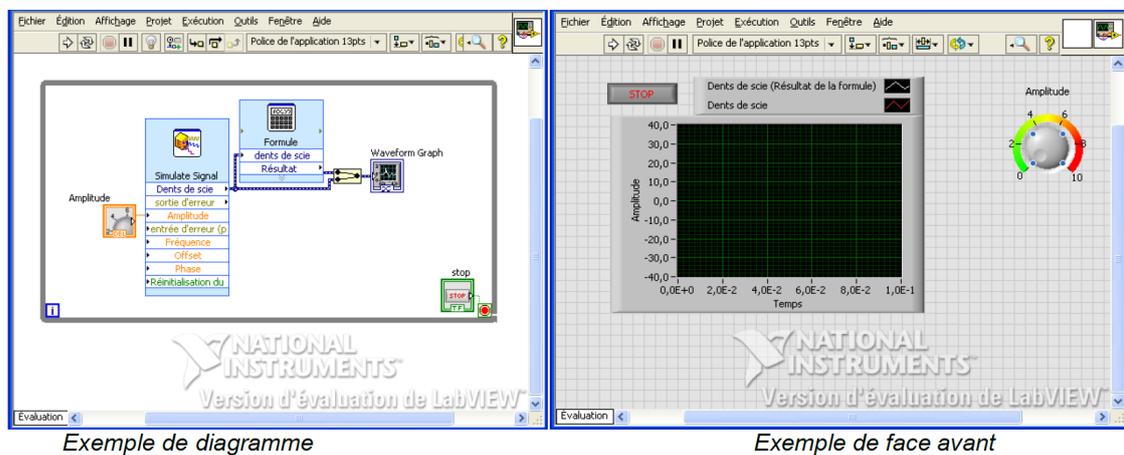


Figure II-9 Exemple de programme Labview

II.2.2.4 Enceinte vide thermique

Pour recréer l'environnement défini au chapitre précédent, nous avons au sein du projet ECLAIRs à l'IRAP une enceinte thermique correspondant à notre besoin. Je vais donc me baser sur cette installation pour développer mon banc de tests.

Cette enceinte est composée :

- Une cuve hermétique compatible avec les passages de cuve type Plugin
- Une pompe à vide de marque Pfeiffer permettant d'atteindre un vide secondaire de l'ordre de 10^{-5} mbar.
- Un cryothermostat à circuit fermé de pompage avec une huile en silicone.
- Une plaque en cuivre à l'intérieur de la cuve régulée en température à l'aide du cryothermostat. (Dans le vide les échanges de chaleur se font principalement par conduction ; dans notre cas, les cartes électroniques à caractériser seront en contact avec la plaque en cuivre.)
- Une jauge pour la mesure de pression compatible RS232.

Pour le banc de tests, j'ai rajouté 4 capteurs de températures PT100 branchés sur un module d'acquisition NI9217 permettant de visualiser et enregistrer l'environnement de test pendant les essais sur le logiciel développé en Labview.

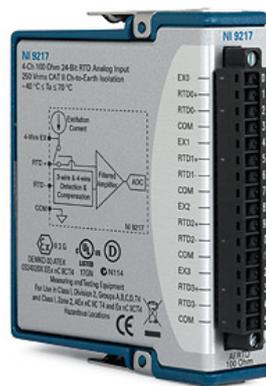


Figure II-10 Module NI 9217

La cuve est compatible avec les passages Plugin. Ces passages de taille standard, permettent d'avoir un grand choix de connecteurs disponibles en interface avec la cuve. Nous allons utiliser pour notre banc de tests des connecteurs type SubD ainsi que BNC déjà disponibles au sein du laboratoire.



Figure II-11 Exemples de passages Plugin

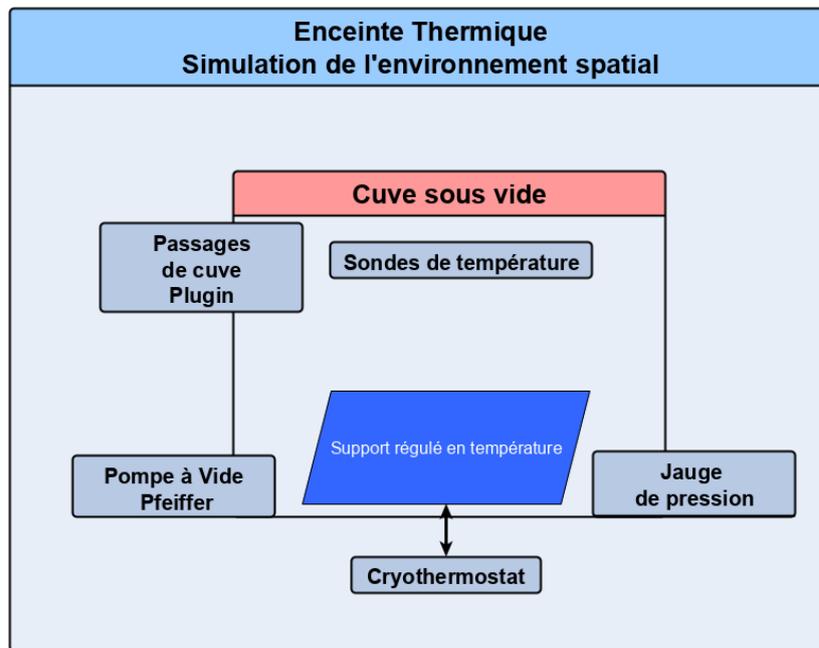


Figure II-12 Synoptique de l'enceinte vide thermique

II.3 Réalisation

II.3.1 Architecture du banc de test

La partie environnement étant déjà existante, il a fallu réaliser la baie de tests de caractérisation ainsi que le logiciel de test à partir des équipements choisis au chapitre précédent. Le synoptique Figure II-13 montre le banc de tests dans sa globalité. Il est constitué de l'enceinte thermique pour la simulation de l'environnement spatial, de la baie de tests de caractérisation pour instrumenter le banc ainsi que d'un ordinateur sur lequel est installé le logiciel de test pour contrôler et piloter les essais.

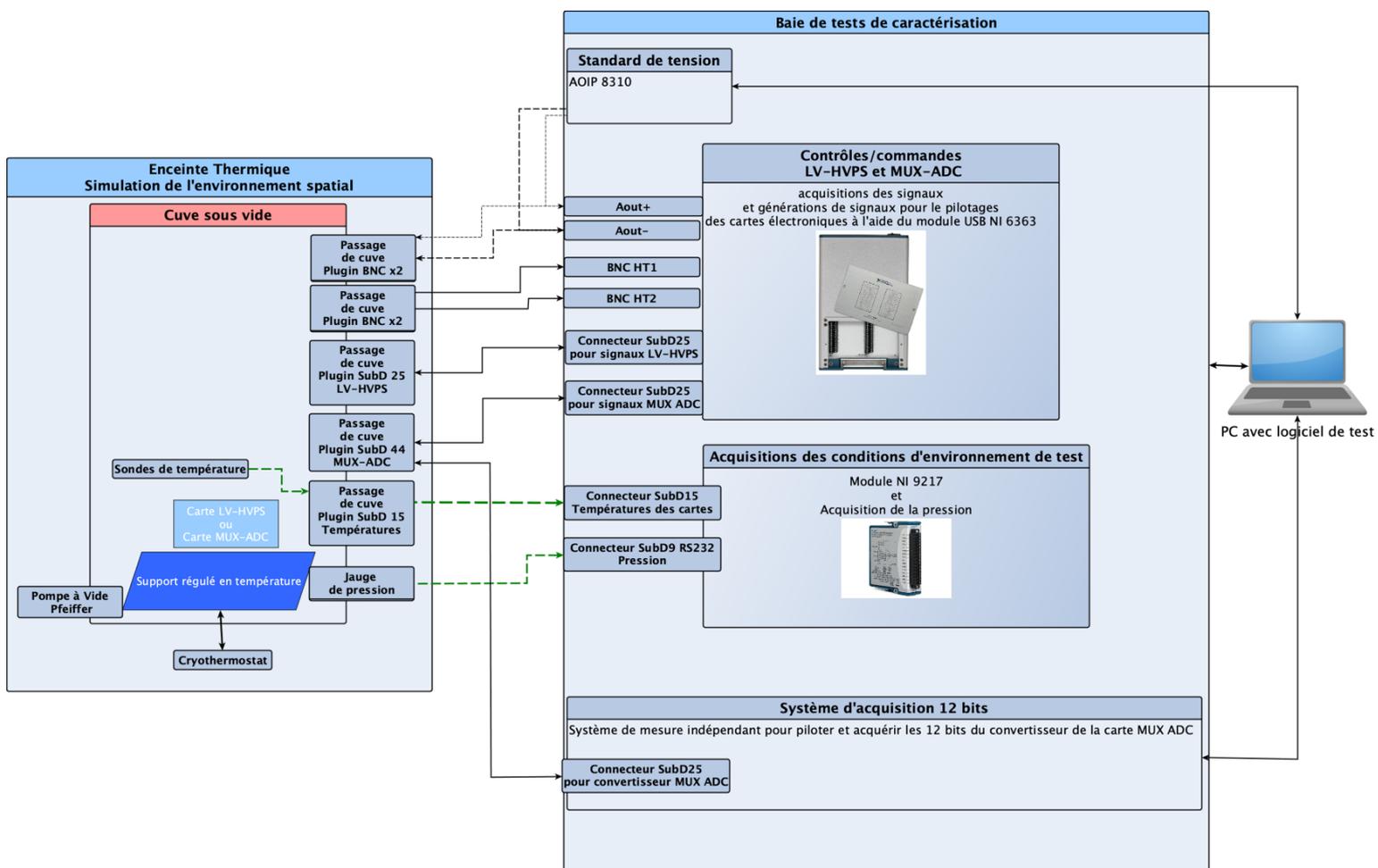


Figure II-13 Synoptique du banc de tests

II.3.2 Câblage du Système d'acquisition

Une partie des signaux à acquérir, à partir des cartes électroniques, sont analogiques. Les entrées analogiques sont les plus sensibles à mesurer. Si on veut obtenir des mesures précises, il est nécessaire de respecter certaines règles. J'ai donc mis en place un protocole de mesure qui prend en compte les spécificités du système d'acquisition NI USB 6363. Ce protocole est détaillé dans les sous chapitres suivants.

II.3.2.1 Principe d'acquisition des entrées analogiques

Les signaux analogiques sont numérisés par le système d'acquisition qui est composé d'un seul convertisseur analogique numérique pour les 32 entrées à acquérir. Sur le synoptique Figure II-14 nous pouvons voir qu'un multiplexeur (MUX) permet d'aiguiller les entrées une à une vers la chaîne d'acquisition. Un étage permet de paramétrer la terminaison, selon que nous faisons une mesure : référencée par rapport à la masse (RSE), en différentielle (DIFF) ou non référencé (NRSE). Puis, le signal est amplifié dans un amplificateur d'instrumentation pilotable (NI-PGIA) en fonction de la plage d'entrée définie pour le signal à mesurer. Il est ensuite numérisé par le convertisseur (ADC). Enfin, une FIFO (First In, First Out) permet de garder en mémoire les valeurs mesurées avant l'acquisition par l'ordinateur, en utilisant la méthode du premier entré, premier sorti.

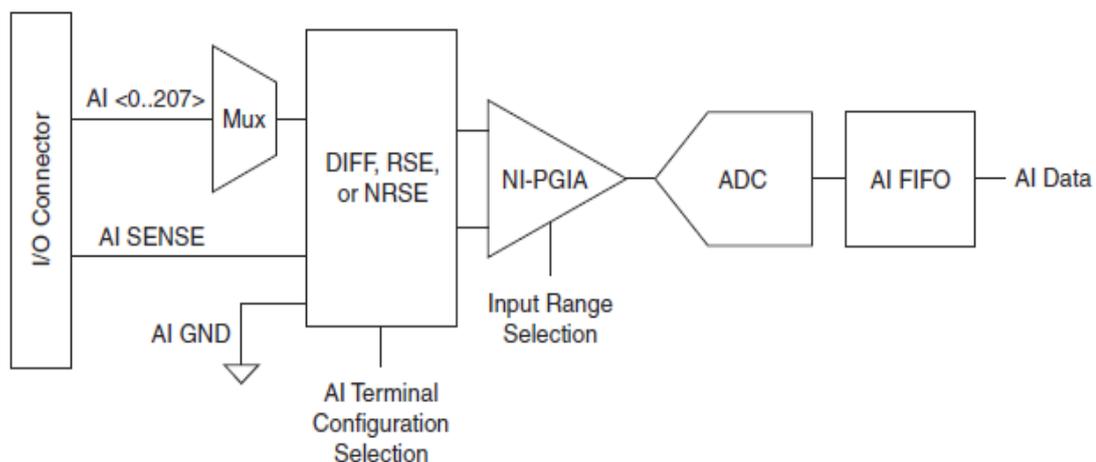


Figure II-14 Synoptique d'acquisition d'un signal analogique du NI USB 6363

Dans le cas d'une acquisition multicanale, il est nécessaire de prendre en compte certaines particularités lors de l'utilisation de ce système. En effet, la précision de la mesure va dépendre du temps de stabilisation. Le temps de stabilisation correspond au temps nécessaire pour que le signal soit établi, avec la précision souhaitée, en entrée du convertisseur.

L'USB NI 6363 est conçu pour avoir des temps de stabilisation rapides. Cependant, plusieurs facteurs peuvent augmenter le temps de stabilisation, ce qui diminue la précision des mesures. Pour assurer un temps d'établissement du signal suffisant, j'ai donc procédé comme suit (par ordre d'importance) :

- Utiliser des sources à basse impédance
- Utilisez un câblage court de haute qualité
- Choisir soigneusement l'ordre de balayage des canaux

II.3.2.2 Utiliser des sources à basse impédance

II.3.2.2.1 Calcul de l'impédance

L'impédance mesure l'opposition d'un circuit électrique au passage d'un courant alternatif sinusoïdal. La définition de l'impédance est une généralisation de la loi d'Ohm au courant alternatif. Lors de mesures en courant continu, la relation entre la tension et le courant est définie par:

$$U = R \times I$$

Avec U la tension en Volt, R la résistance en Ohms et I le courant en Ampère

Si le signal est alternatif sinusoïdal, on constate que d'autres éléments, qui ne sont pas des résistances, répondent aussi à cette loi. On a donc :

$$U = Z \times I$$

Avec Z l'impédance du circuit.

Cette impédance se décompose en 3 morceaux, Z_R , Z_L et Z_C qui dépendent de l'impédance de la résistance, de l'inductance ainsi que du condensateur.

Dans notre cas, les tensions sont continues, l'impédance est donc assimilée à une résistance.

$$Z = R$$

Pour l'acquisition d'un signal, la notion d'adaptation d'impédance est importante pour obtenir une mesure juste.

L'adaptation d'impédance consiste à optimiser le transfert d'une puissance électrique entre une source et une charge. La puissance transférée entre la source et la charge dépend de la tension de la source et de son impédance ainsi que de l'impédance de la charge.

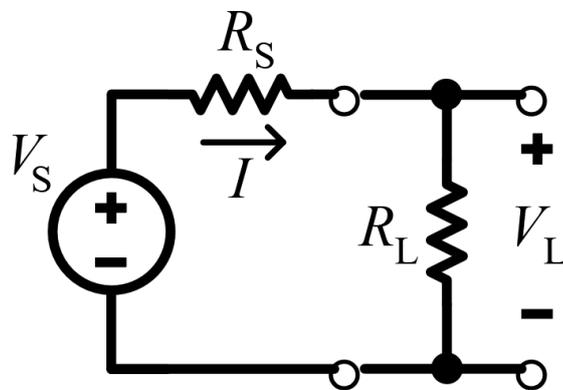


Figure II-15 Montage électrique représentant une source connectée à une charge

Le rendement électrique de ce système est le rapport entre la puissance fournie à la charge P_L (dissipée dans R_L) et la puissance totale délivrée par la source P_S (dissipée par R_L et R_S)

$$n = \frac{P_L}{P_S}$$

Avec n le rendement, P_L la puissance fournie à la charge et P_S la puissance fournie par la source

Avec la loi d'ohm et la définition de la puissance :

$$P = U \times I$$

On a le rendement qui est égal à :

$$n = \frac{R_L \times I^2}{(R_L + R_S) \times I^2}$$

$$n = \frac{R_L}{R_L + R_S}$$

$$n = \frac{1}{1 + \frac{R_S}{R_L}}$$

On peut donc considérer trois cas remarquables :

- $R_L = R_S$ on a $n = 0,5$
- $R_L \gg R_S$ on a $n = 1$
- $R_L \ll R_S$ on a $n = 0$

Le rendement est donc maximisé quand l'impédance de la charge, dans notre cas l'appareil de mesure, est très grande par rapport à celle de la source.

II.3.2.2.2 Application au banc de tests

Dans le cas de notre système d'acquisition USB 6363, qui a une impédance élevée sur ses entrées (de l'ordre du Giga Ohms), une source basse impédance permettra un temps de stabilisation rapide. Les temps de stabilisation augmentent lors du balayage de signaux à haute impédance en raison d'un phénomène appelé injection de charge. Les multiplexeurs contiennent des commutateurs, généralement constitués de condensateurs commutés. Lorsque l'un des canaux, par exemple le canal 0, est sélectionné dans un multiplexeur, les condensateurs accumulent la charge. Lorsque le canal suivant, par exemple le canal 1, est sélectionné, la charge accumulée fuit par le canal 1. Si l'impédance de sortie de la source connectée au canal 1 est trop importante, la lecture résultante du canal 1 peut être partiellement affectée par la tension de la voie 0. Cet effet est appelé image fantôme. Si l'impédance source est élevée, on peut diminuer le taux de balayage pour laisser du temps au signal de s'établir. Une autre option consiste à utiliser un circuit suiveur de tension externe au système d'acquisition. Cela permet de diminuer l'impédance vue par la chaîne d'acquisition. Le fabricant, National Instrument conseille d'utiliser des sources avec une impédance inférieure à 1KOhms.

Pour les signaux hautes tensions HT1 et HT2 nous utilisons des ponts diviseurs de tension 1/1000, constitués de résistances élevées. Ces ponts diviseurs permettent ainsi d'obtenir une source avec une haute impédance.

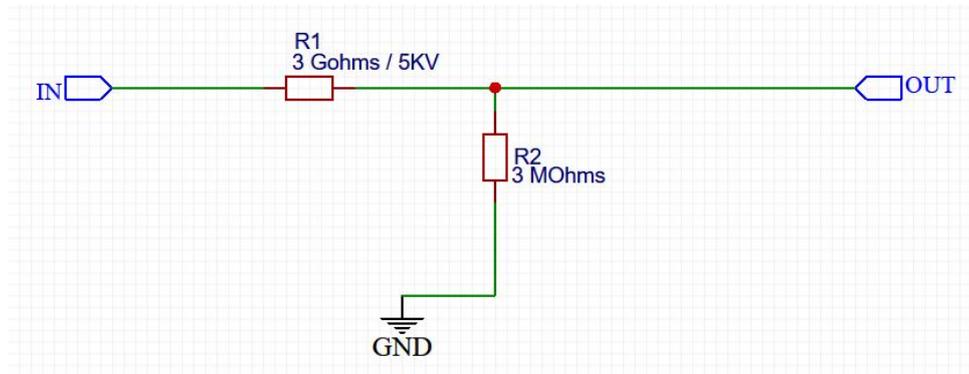


Figure II-16 Pont diviseur de tension

Pour éliminer les images fantômes sur les canaux d'entrée adjacents, j'ai diminué l'impédance de la source en utilisant un montage suiveur (figure suivante).

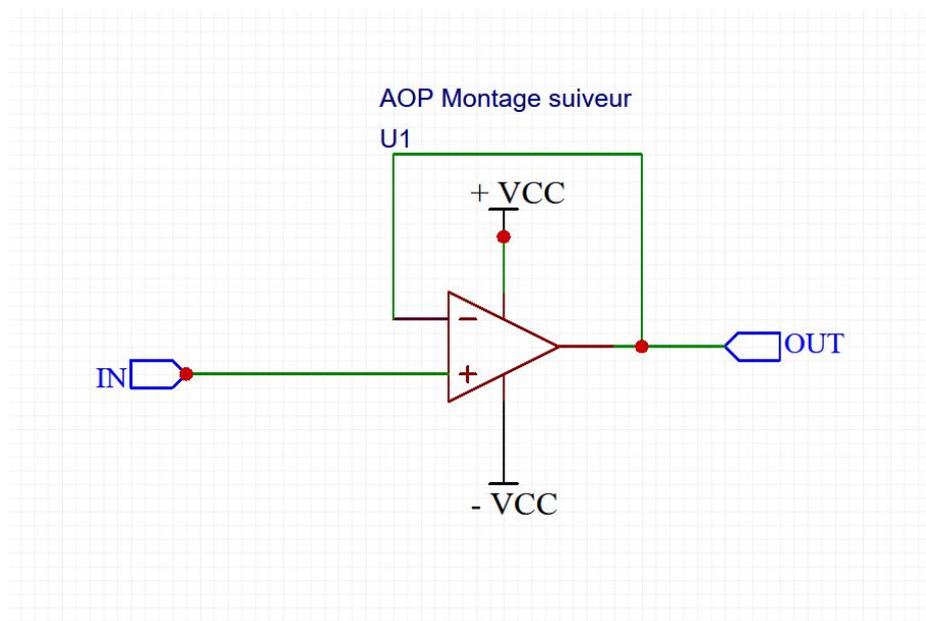


Figure II-17 Montage suiveur

Ce montage suiveur, dans lequel la tension de sortie OUT est égale à la tension d'entrée IN, est utilisé pour les adaptations d'impédances en électronique. L'amplificateur opérationnel (AOP) est un composant actif avec une faible impédance en sortie et une impédance d'entrée très élevée, il est utilisé pour transformer une source de tension avec une forte impédance en une source avec une faible impédance.

Le synoptique suivant montre la configuration ainsi obtenue :

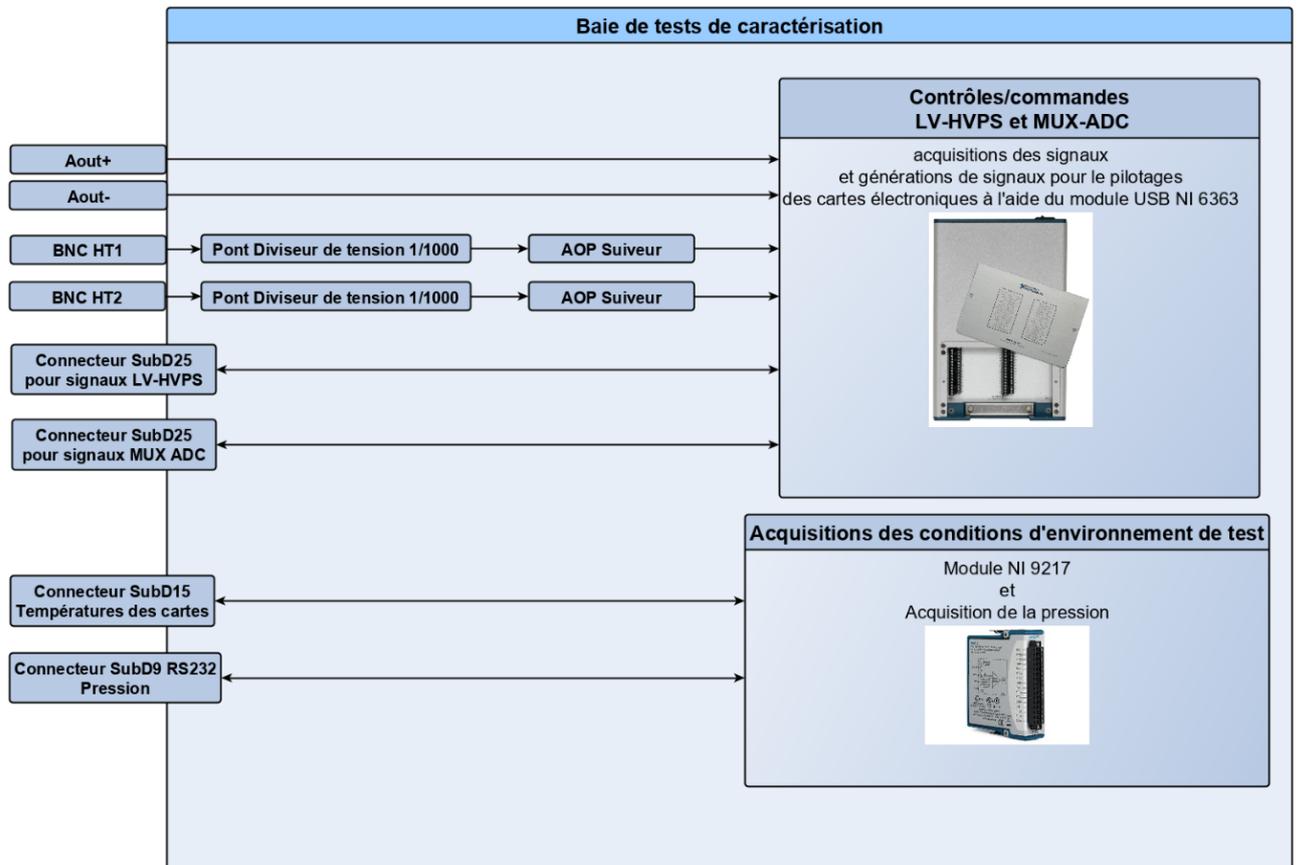


Figure II-18 Synoptique baie de tests de caractérisation

II.3.2.3 Utilisation d'un câblage court de haute qualité

Le câblage est important pour obtenir une mesure précise. L'utilisation de câbles courts de haute qualité permet de réduire plusieurs des effets dégradant la précision.

- a. la diaphonie, effet lié à une interférence entre signaux, souvent causée par un phénomène d'induction électromagnétique. Pour éviter cela, le câblage mis en place est composé de paires torsadées blindées individuellement.
- b. La capacité du câble peut également augmenter le temps de stabilisation du signal dans le système d'acquisition. Pour éviter cela, il est recommandé d'utiliser des câbles courts. National Instrument recommande l'utilisation de câbles avec une longueur inférieure à 2 mètres.

II.3.2.4 Choisir soigneusement l'ordre de balayage des canaux

Lors du balayage d'une entrée analogique à une autre, le module USB 6363 configure l'amplificateur d'instrumentation avec la plage d'entrée du nouveau canal. Le NI-PGIA amplifie donc le signal d'entrée avec le gain défini dans le logiciel d'acquisition pour la nouvelle plage d'entrée. Si nous faisons varier constamment la plage d'entrée et donc le gain de l'amplificateur, nous augmentons de manière non négligeable le temps de stabilisation. L'ordre de balayage des signaux par le système d'acquisition est donc important. Il faut éviter de passer d'une grande plage d'entrée à une petite car le système d'acquisition met un délai non négligeable pour re-paramétrer la nouvelle plage d'entrée pour le nouveau canal. Par exemple, supposons qu'un signal d'amplitude 4 V soit connecté au canal 0 et un signal d'amplitude 1 mV au canal 1. La plage d'entrée du canal 0 est comprise entre -10 V et 10 V et la plage d'entrée du canal 1 est compris entre -200 et 200 mV. Lorsque le multiplexeur passe du canal 0 au canal 1, l'entrée sur le périphérique NI-PGIA commute de 4 V à 1 mV. Le système paramètre la nouvelle plage pour utiliser toute la dynamique de l'ADC, de façon à obtenir une meilleure précision. L'appareil peut prendre plusieurs microsecondes pour se régler et mesurer une valeur précise. Pour éviter cet effet, j'ai organisé l'ordre de lecture des canaux dans le logiciel de tests, de façon à ce que les transitions des gammes d'entrées de grandes à petites soient peu fréquentes.

II.3.3 Programmation du logiciel de test

Comme introduit dans les choix de conception, j'ai décidé d'utiliser Labview comme environnement de développement pour programmer le logiciel de tests. Cet outil de programmation m'a permis de développer facilement et en multitâches les différentes acquisitions telles que la température, la pression ainsi que les mesures analogiques et numériques à réaliser. La gestion du multitâche sur Labview est automatique, cela m'a permis de gérer chaque acquisition de manière autonome. Une tâche est dédiée à l'environnement, permettant de récupérer les données et de gérer la sécurité du banc et des cartes électroniques. En fonction de la température, le logiciel peut arrêter la régulation si les températures atteignent des valeurs extrêmes, permettant de protéger les cartes électroniques. Les autres tâches dépendent de la carte à tester.

Pour simplifier le développement et rendre les tests des cartes autonomes, j'ai développé un programme spécifique par carte électronique.

Les essais que subiront les cartes sont découpés en 7 configurations, dépendantes de l'environnement de test.

Numéro de Configuration de test	Températures	Pression
1	T°C ambiante	Ambiante
2	23°C	5.10 ⁻⁴ mbar
3	+40°C (Température performance Max)	5.10 ⁻⁴ mbar
4	+50°C (température opérationnelle Max de qualification)	5.10 ⁻⁴ mbar
5	Rampe +50°C à -30°C avec pente inférieur à 10°C/h	5.10 ⁻⁴ mbar
6	-30°C (température opérationnelle Min de qualification)	5.10 ⁻⁴ mbar
7	-10°C (Température performance Min)	5.10 ⁻⁴ mbar

Tableau 6 Configurations de l'environnement de test

Cette découpe permet de simplifier les essais et l'interaction avec l'opérateur, ce dernier devant simplement choisir le numéro de la configuration correspondant au test voulu. En fonction de la configuration, le logiciel se charge de paramétrer les instruments ainsi que de nommer les fichiers de sauvegarde comprenant les données acquises avec un nom intégrant le numéro de la configuration.

II.3.3.1 Programme de tests de la Carte LV-HVPS

Le programme pour tester et caractériser la carte LV-HVPS permet d'acquérir et d'enregistrer les données provenant de la carte et de l'environnement de test. Le logiciel permet aussi de piloter la consigne de la haute tension sur 8 bits générée par la carte électronique. J'ai développé une interface homme-machine (IHM) « face avant » permettant

de visualiser facilement l'environnement de tests et les valeurs des différences tensions de la carte LV-HVPS.

L'environnement est mesuré grâce à 4 sondes de températures de type PT100 et une sonde de pression. L'onglet IHM du programme permettant de surveiller l'environnement permet de visualiser rapidement ces 4 sondes sur la carte grâce à un visuel reprenant leur position. Un graphique permet de voir l'évolution temporelle de la température mesurée grâce aux sondes.

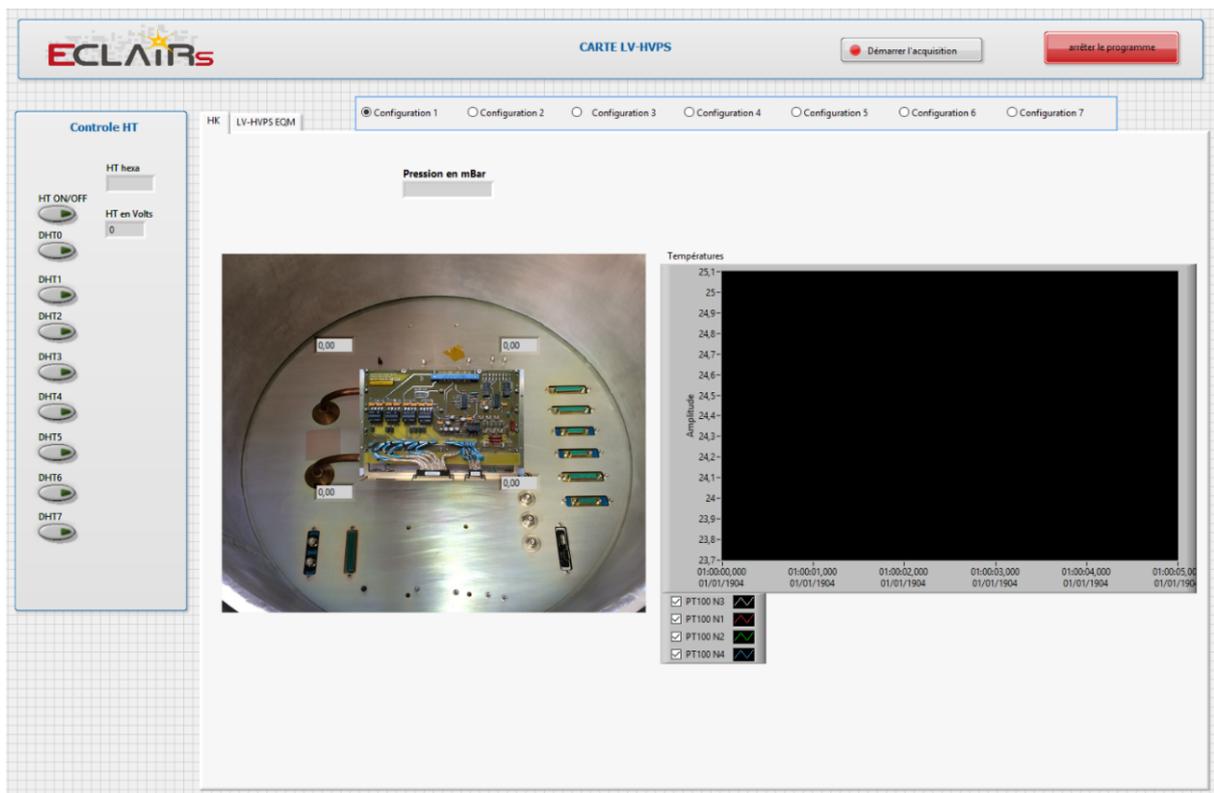


Figure II-19 IHM « Face avant » du programme permettant de surveiller l'environnement de test

Une sécurité liée à la pression a été implémentée, elle permet d'éviter l'activation de la haute tension au-dessus d'une pression de 10^{-3} mbar. Cette sécurité est implémentée pour éviter l'effet de Paschen sur la haute tension. Cet effet se caractérise par l'apparition d'un arc électrique dans un gaz à un certain champ électrique de claquage. A la pression normale, l'air est isolant, la tension de claquage est donc élevée. Mais lorsque la pression diminue, la décharge électrique survient à des tensions plus faibles. Sur la figure Figure II-20 allure de la courbe de Paschen, nous pouvons voir l'allure de la courbe de Paschen avec la tension de claquage en fonction de la pression. A la mise sous vide de la cuve, la tension de claquage

va diminuer rapidement jusqu'au minimum de Paschen et peut causer un arc électrique dans la cuve. Mais si la pression continue de descendre sous le minimum de Paschen, la tension à fournir augmente à nouveau, la courbe de Paschen remonte.

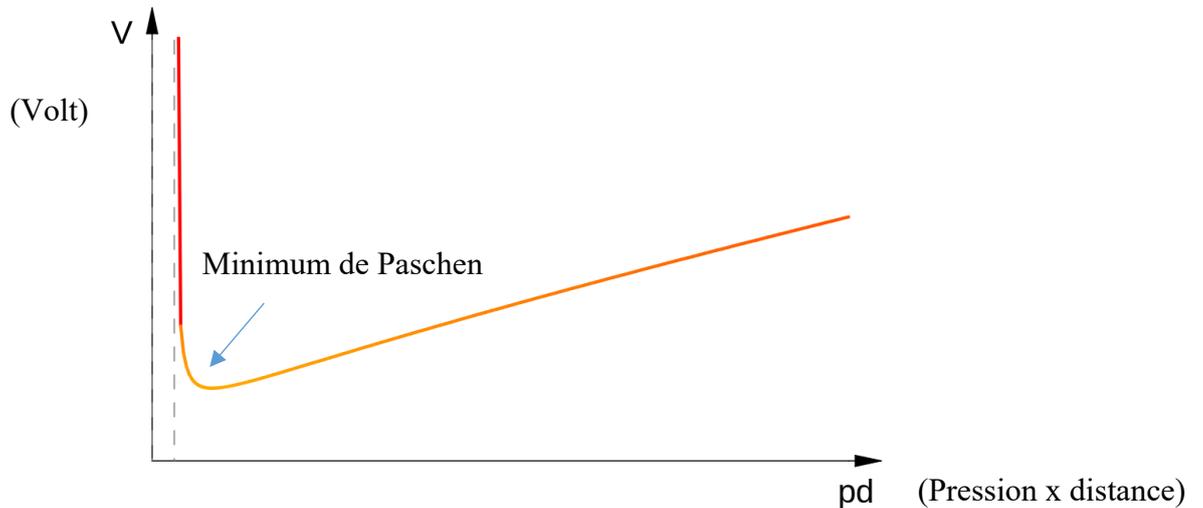


Figure II-20 allure de la courbe de Paschen

En plus d'enregistrer l'environnement et de sécuriser la carte électronique, le programme permet d'acquérir les tensions de la carte Inventaire des signaux de la carte LV-HVPS définies au chapitre II.2.1.2. Cette acquisition permettra d'analyser l'évolution des tensions dans le temps en fonction de l'environnement. Ainsi, nous connaissons l'impact de la température et de la pression sur l'électronique. L'analyse poussée, qui aura lieu après les essais, permettra aussi de valider ces cartes en vérifiant que les tensions soient comprises dans les tolérances définies par les spécifications.

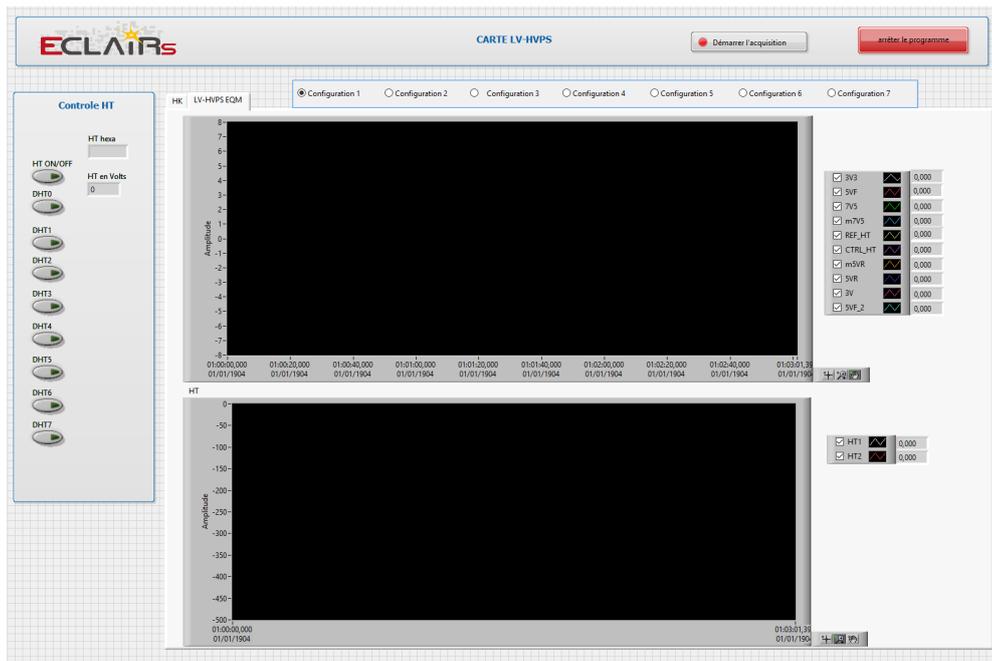
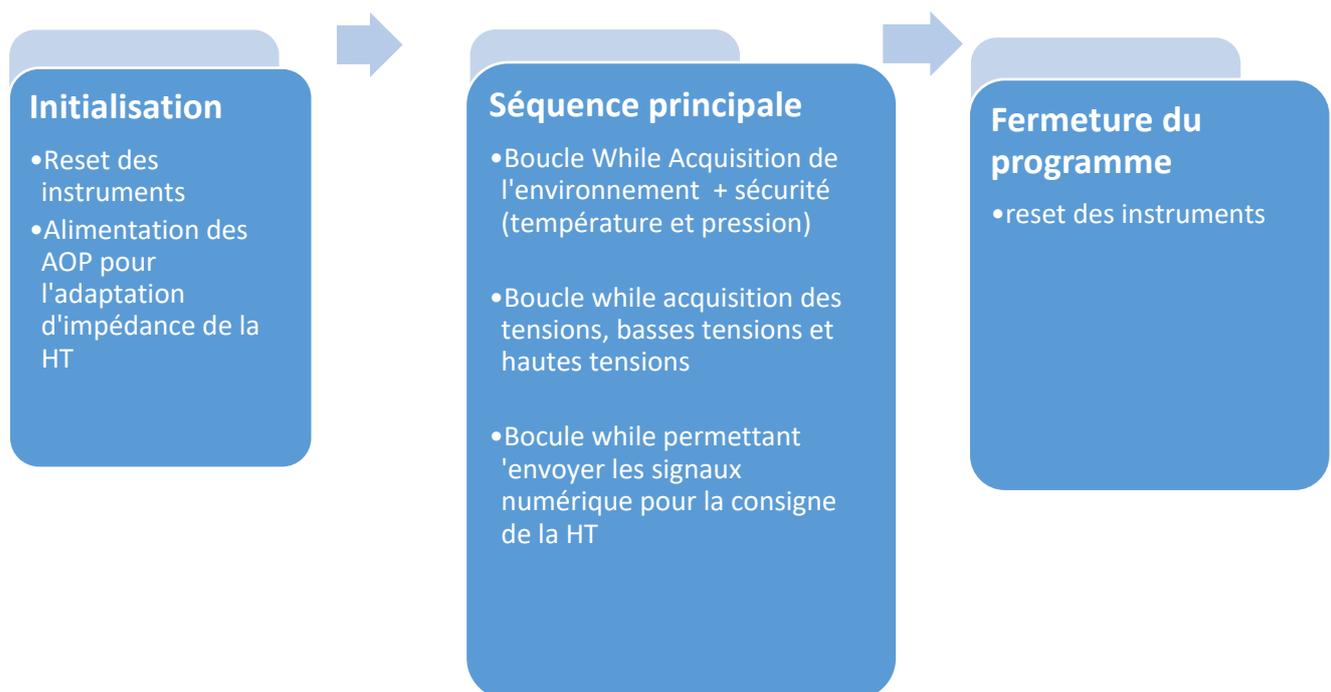


Figure II-21 IHM « Face avant » du programme permettant de surveiller l'évolution des tensions générées par la carte

J'ai décomposé le programme en trois séquences, une phase d'initialisation, une séquence principale et enfin une phase de remise à zéro des équipements et des paramètres à la fermeture du programme. Un exemple de diagramme du programme Labview est disponible en annexe 9. Le contenu de chaque séquence du logiciel de tests est le suivant :



II.3.3.2 Programme de test de la Carte MUX-ADC

Le programme visant à tester et caractériser la carte MUX ADC permet aussi d'acquérir, d'enregistrer et de sécuriser l'environnement de test avec la même méthode que la carte précédente.

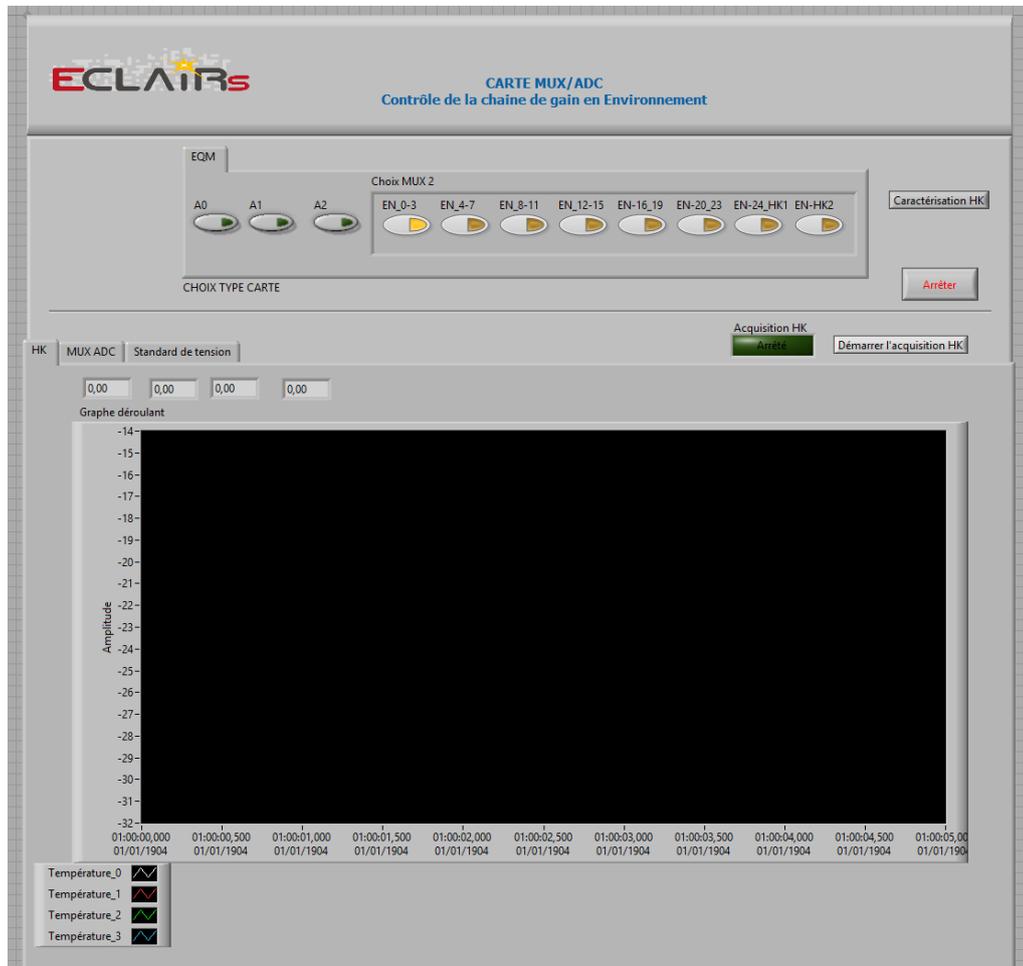


Figure II-22 Onglet du programme permettant de surveiller l'environnement de test

Le programme enregistre les tensions de la carte Inventaire des signaux de la carte MUX-ADC définies au chapitre II.2.1.2, ainsi que la sortie du convertisseur ADC de la carte pour une analyse après essais. Ces enregistrements permettront d'étudier l'évolution des tensions d'entrées et des canaux de sortie de l'ADC sur 12 bits en fonction du temps, de la température et de la pression. A partir de l'IHM, nous pouvons piloter facilement le choix des multiplexeurs de la carte à caractériser, à l'aide des signaux numériques commandés par des actionneurs booléens. Ce logiciel pilote le générateur calibrateur pour automatiser la génération d'un signal connu. Ce standard de tension permet de simuler les signaux Aout+

et Aout- en injectant une tension étalon très précise en entrée de la carte. Le logiciel Labview permet de piloter un programme développé en MATLAB par une ancienne personne de l'équipe électronique. Ce programme existant qui contrôle le système d'acquisition du convertisseur analogique numérique ADC de la carte MUX-ADC.

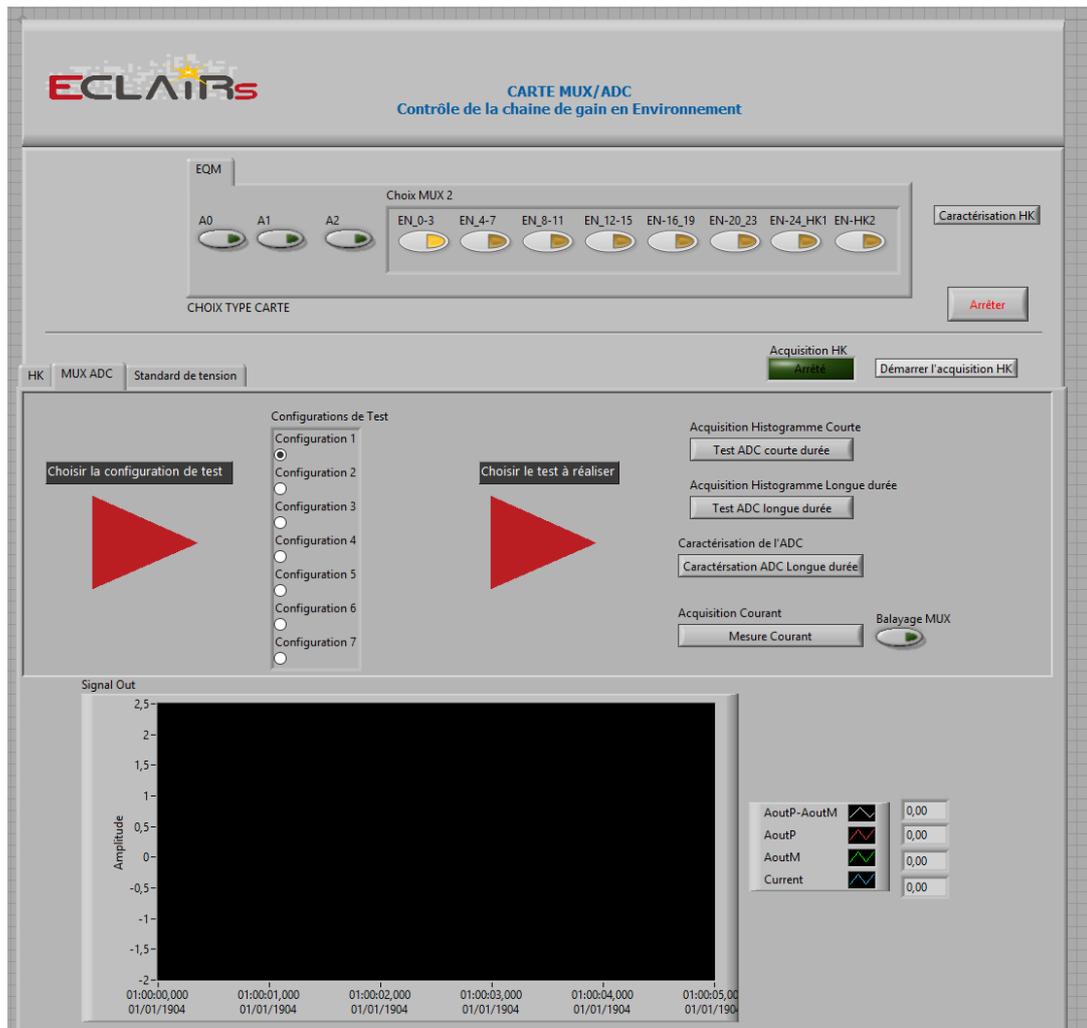
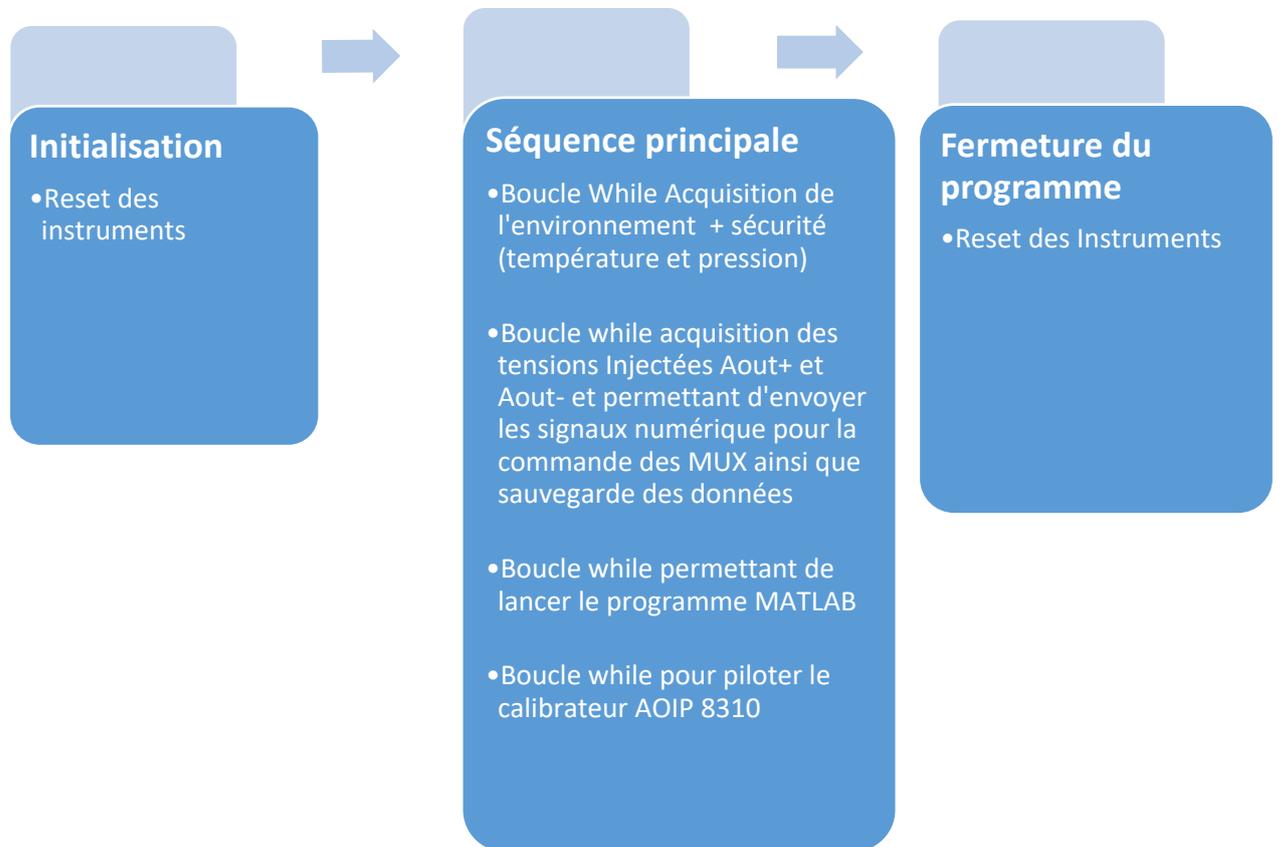


Figure II-23 Onglet permettant de lancer les tests automatiques en fonction de la configuration de l'environnement

Le contenu de chaque séquence est décrit par le schéma bloc suivant :



II.3.4 Validation fonctionnelle du banc de tests

L'utilisation d'instruments de mesures vérifiés et calibrés nous permet de garantir une bonne qualité de la mesure. J'ai effectué une vérification du banc complet, comprenant le logiciel et les instruments, pour valider son bon fonctionnement. Cette validation fonctionnelle a été réalisée en simulant les entrées du banc avec le calibrateur AOIP 8310 étalonné. Ce contrôle nous a permis de nous assurer que les mesures effectuées par le logiciel de tests étaient conformes aux valeurs attendues. Les sorties numériques du banc de tests ont été contrôlées à l'aide d'un voltmètre calibré, pour valider les commandes effectuées par le logiciel développé et contrôler les niveaux de tensions.

Après cette validation fonctionnelle, le banc de test a été éprouvé sur des cartes électroniques prototypes pour vérifier le fonctionnement global des programmes ainsi que des procédures.

II.3.5 Assistance technique et maintenance

II.3.5.1 Assistance technique et déroulement des essais

A la livraison du banc, j'ai rédigé et fourni un dossier de fabrication formalisant la conception, la réalisation et l'utilisation du banc. Ce dossier regroupe : la définition du banc de tests, son montage ainsi que les références pour chaque élément. Ce document permettra de maintenir et de faire évoluer le banc de tests dans le futur.

Le domaine spatial nous impose un suivi qualité autour des essais. Chaque essai subi par les cartes électroniques, et plus généralement chaque élément de l'instrument, doit suivre un plan AIT (Assemblage, Intégration et Tests) d'après la norme ECSS-E-ST-10-03C. Les normes ECSS (European Cooperation for Space Standardization) sont fournis par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et sont dédiées au management des projets spatiaux. Le plan AIT détaille l'organisation, en termes de moyens et de ressources, qui sera mise en œuvre pour la réalisation des activités AIT. C'est le document de référence du processus AIT. Il décrit en effet le processus complet et démontre avec le plan de vérification, comment les spécifications sont vérifiées par inspection et tests. Ce plan liste tous les essais que subiront les sous-ensembles de l'instrument ECLAIRs.

En tant que responsable d'essais de la caractérisation des cartes électroniques, je dois fournir les procédures à mettre en place ainsi que les moyens sols et ressources nécessaires pour ces essais. Pour réaliser le suivi de l'avancement et m'assurer de la disponibilité des moyens d'essais ainsi que des ressources humaines, plusieurs revues ont lieu durant les différentes phases des tests.

La première revue, appelé TRR pour Test Readiness Review, a lieu avant le démarrage des tests. Son objectif est de s'assurer que tout est prêt pour le déroulement des essais : vérification de la demande d'essais, des procédures de tests et des moyens des tests. Pour cette revue, j'ai rédigé et fourni une procédure de tests, ainsi que les documents attestant le bon entretien et la vérification des équipements de tests. Une procédure a été rédigée pour chaque type de carte, permettant de faire les essais en fonction de l'avancement du planning

de fabrication de chaque carte et du plan AIT général du projet. L'opérateur pourra ainsi dérouler les essais étape par étape sans rien oublier.

Une deuxième revue a lieu après les essais, la TRB, pour Test Review Board, a pour objectif de s'assurer de la réalisation des tests prévus, du traitement des anomalies détectées, de la collecte des données et du traitement des résultats.

II.3.5.2 Maintenance en condition opérationnelle

Pour le maintien en condition opérationnelle du banc de tests, j'ai mis en place une vérification périodique des différents moyens de mesure qui le constitue tel que l'AOIP8310, le NI USB 6363, la sonde de pression, ainsi que le NI 9217. Cet état des lieux nous permet d'assurer la traçabilité des instruments, d'estimer leurs performances en terme d'incertitude de mesure et d'identifier d'éventuels biais. Le système de tests est lui aussi vérifié en utilisant un calibrateur pour simuler les différentes entrées du système d'acquisition.

La périodicité de vérification du banc de tests a été définie en fonction de son utilisation et de son environnement de stockage et de fonctionnement :

- a. Le banc de tests est manipulé dans un environnement « salle blanche » ISO 8 et n'est pas utilisé de façon soutenue puisqu'il ne fonctionne que quelques mois dans l'année. En fonction de ces critères, la périodicité de vérification a été définie à un an.
- b. Pour l'entretien de la partie environnement du banc de tests, une maintenance de la cuve, de la pompe à vide ainsi que du cryostat est planifiée une fois par an.
- c. En annexe 5, un exemple de constat de vérification pour la centrale d'acquisition USB NI6363 est disponible.

II.3.5.3 Métrologie au niveau du projet

Lorsque j'ai développé mon banc de tests, je me suis rendu compte que sur l'ensemble du projet, aucun équipement n'était suivi régulièrement. Le parc d'équipements étant assez conséquent avec des périodes de mesures régulières et importantes pour le développement de l'instrument ECLAIRS, j'ai donc proposé au chef de projet de mettre en place une fonction métrologie au sein du projet.

Cette fonction a la responsabilité administrative et technique de définir et de mettre en œuvre le système de management de la mesure. Cette définition est proposée dans la norme NF EN ISO 10012 qui est le document de référence concernant les processus et les équipements de mesure en cohérence avec la norme ISO 9001.

Ce management de la mesure est nécessaire pour garantir et maintenir la confiance envers les mesures résultant des processus de mesure. Sur le projet ECLAIRs, le manque de ressources m'a obligé à mettre en place une gestion du parc d'équipements de mesure en partenariat avec une entreprise extérieure. En effet, ma fonction principale sur le projet n'étant pas dédiée à la métrologie, j'ai dû trouver une solution pour continuer mon travail de responsable d'essais et de conception de bancs de tests, tout en disposant d'un parc d'instruments parfaitement entretenus et fonctionnels.

Après une étude de différents prestataires, j'ai choisi de travailler avec l'entreprise Europe qualité. Cette société, qui a 25 ans d'expérience dans la métrologie, est composée de 8 laboratoires répartis sur toute la France et est accréditée COFRAC. Elle satisfait la norme SO/CEI 17025:2005 : Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnage et d'essai. Les accréditations COFRAC des différents laboratoires et la certifications ISO du groupe Europe Qualité témoignent du sérieux et de la compétence de cette entreprise. Europe Qualité est également certifiée ISO 9001 version 2015 dans le domaine suivant : Commercialisation du service d'étalonnage et/ou vérifications d'appareils de mesure et de prestation du service sous-traité aux filiales ou à des fournisseurs de métrologie. Prestation associée : formation en métrologie, le certificat est disponible en annexe 2. De nombreux laboratoires d'Europe Qualité sont accrédités dans des domaines de compétence de la métrologie tels que : l'étalonnage dimensionnel, la métrologie électrique (électricité / magnétisme et temps-fréquence), la métrologie en pression, la métrologie des masses (étalonnage des masse et pesage), la métrologie de la température et de la caractérisation des enceintes thermiques et climatiques, et enfin la métrologie des forces et couples. Un exemple d'accréditation est disponible en annexe 3.

En plus de son sérieux et de la proximité du laboratoire de Toulouse, j'ai choisi Europe Qualité pour la simplicité d'utilisation de leur logiciel Kalimera qui permet la gestion d'un parc d'instruments.

Ce logiciel permet la gestion intégrale du parc d'instruments de mesure, le stockage et la sauvegarde de tous les certificats d'étalonnages et de vérification du parc, ainsi que la planification des futures vérifications du matériel. Un mailing automatique est aussi disponible pour prévenir de l'échéance de fin de validité. Nous pouvons également définir sur le logiciel la périodicité de vérification ou d'étalonnage, en fonction des conditions et de l'utilisation de chaque instrument de mesure.

III Caractérisation et validation des cartes

Au moment de la rédaction de ce mémoire, seules les cartes MUX-ADC et LV-HVPS du modèle EQM ont été fabriquées. Les essais fonctionnels réalisés à l'issue de la fabrication de ces cartes ayant montré leur bon fonctionnement, j'ai ainsi pu démarrer les essais de caractérisation en environnement de ces cartes.

Pour analyser les fichiers des données d'acquisitions du banc de tests, j'ai utilisé le logiciel MATLAB. J'ai conçu un script pour automatiser le traitement des données et permettre d'éviter toute erreur dans l'analyse des résultats une fois que le script a été validé.

Pour chaque carte, le script permet d'afficher l'allure des signaux importants, permettant de voir si un problème ou une variation anormale ont été détectés. Ensuite une analyse plus poussée est faite en fonction de la carte étudiée.

Pour la carte MUX-ADC, l'importance des tests est de caractériser la chaîne de gain et de conversion analogique numérique en fonction de l'environnement. L'analyse s'est donc concentrée sur la sortie du codeur ADC en fonction de l'entrée analogique injectée et de l'environnement de test de la carte pour connaître la variation du gain.

Les données en provenance de la carte LV-HVPS ont été analysées de façon plus poussée en analysant les paramètres statistiques des signaux.

III.1 Carte MUX ADC

III.1.1 Saturation sur les valeurs extrêmes

Les essais de caractérisation de la carte MUX-ADC ont permis de mettre en évidence une saturation de la chaîne de gain présente sur la carte. Les valeurs extrêmes de la différence entre A_{out+} et A_{out-} n'étaient pas codées correctement. Cette saturation change en fonction de la configuration de l'environnement de test.

Ci-dessous la saturation haute est représentée. Cette courbe représente les canaux ADC sur 12 bits donc de 0 à 4095 en fonction de la différence des valeurs d'entrées A_{out+} et A_{out-} .

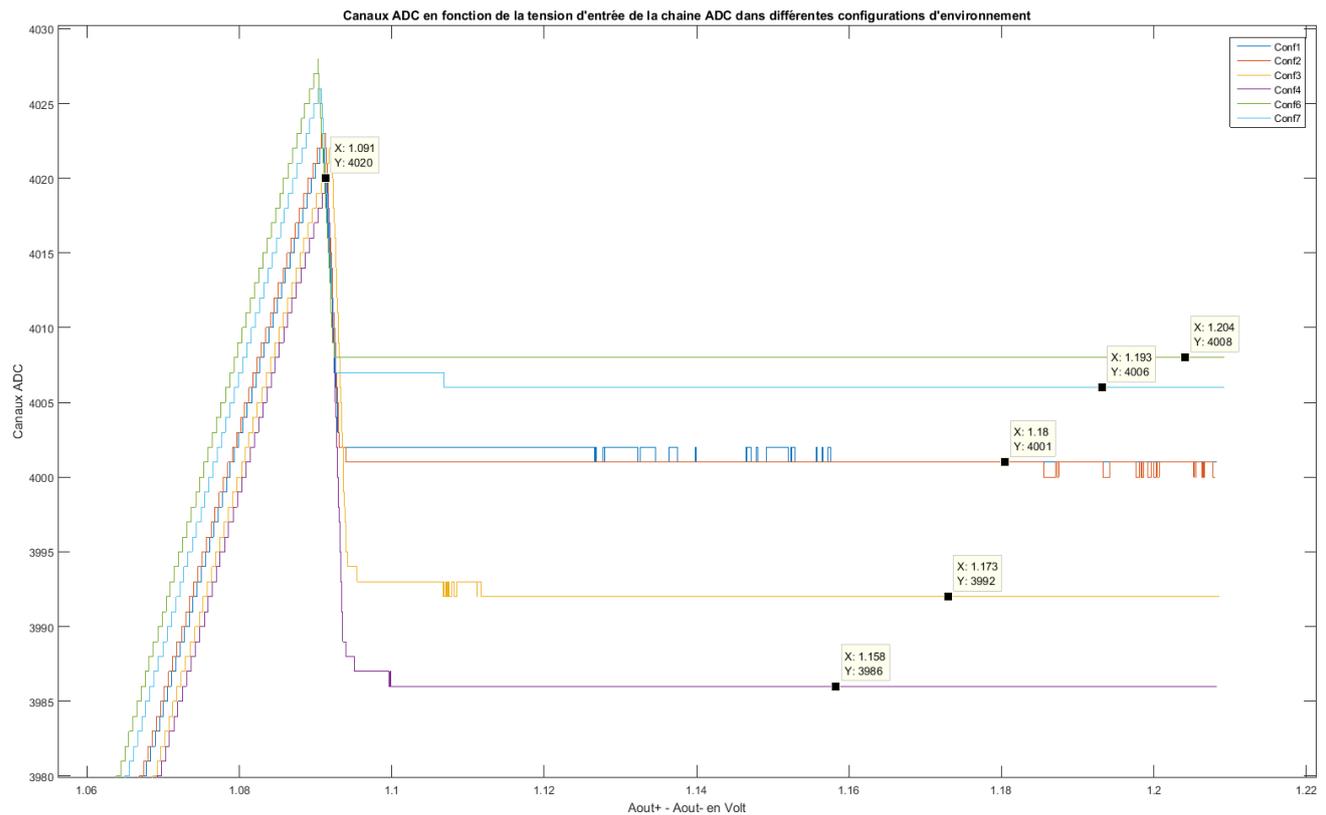


Figure III-1 Saturation haute de la chaîne de gain de la carte MUX-ADC

Nous pouvons voir qu'en fonction de la configuration d'environnement (température), au-dessus d'une certaine valeur d' $(A_{out+}) - (A_{out-})$ la chaîne de gain, composée d'amplificateurs opérationnels, sature. Il faudra prendre en compte cette saturation car lors de la mission spatiale, seule la sortie de l'ADC sera récupérée pour analyser les photons gamma détectés par la caméra. En fonction de la valeur de l'ADC reçu, on ne saura donc pas si la chaîne de gain sature ou si c'est une valeur normale située dans la partie utile du codeur.

Par exemple, comme le montre la Figure III-2 Saturation haute de la chaîne de gain pour la configuration 4 a une valeur au niveau du codeur de 3986 pour les valeurs d' $(A_{out+}) - (A_{out-})$ supérieur à 1.091V. Mais pour cette valeur du codeur nous pouvons aussi avoir $(A_{out+}) - (A_{out-})$ valant 1.073V.

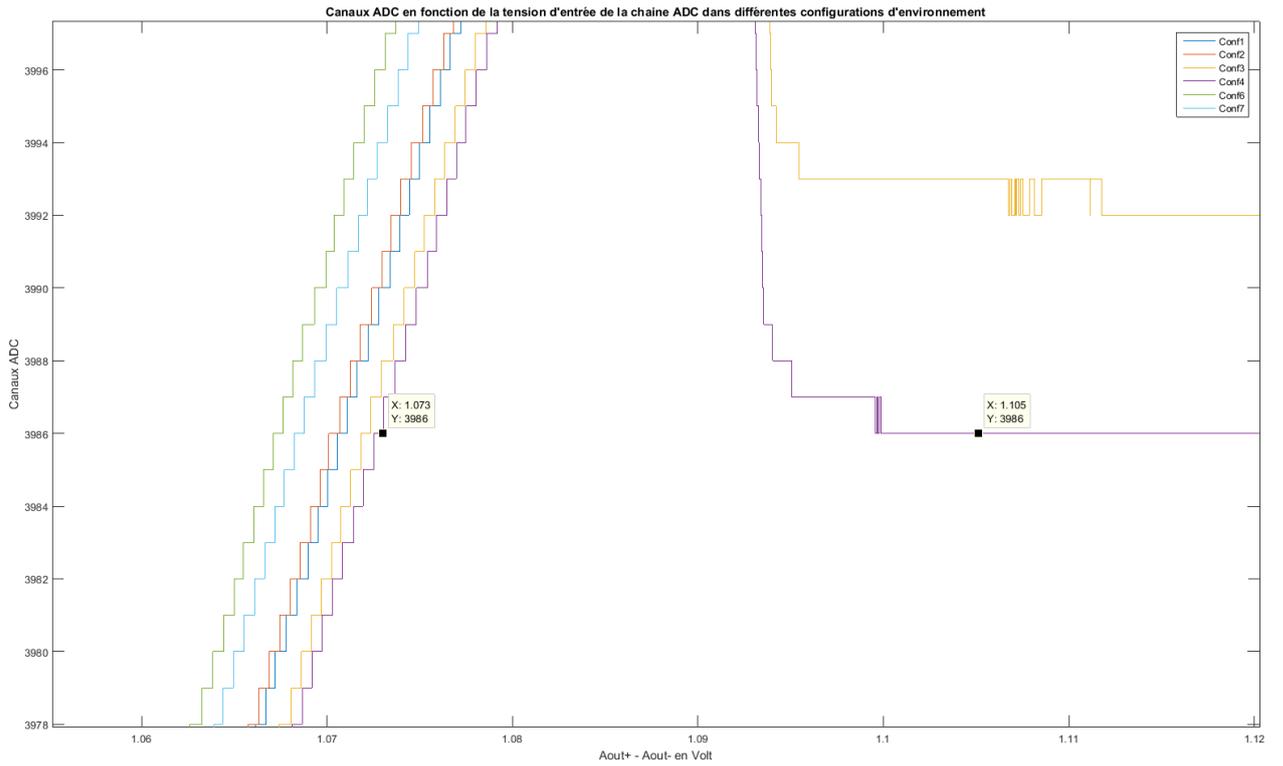


Figure III-2 Saturation haute de la chaîne de gain pour la configuration 4

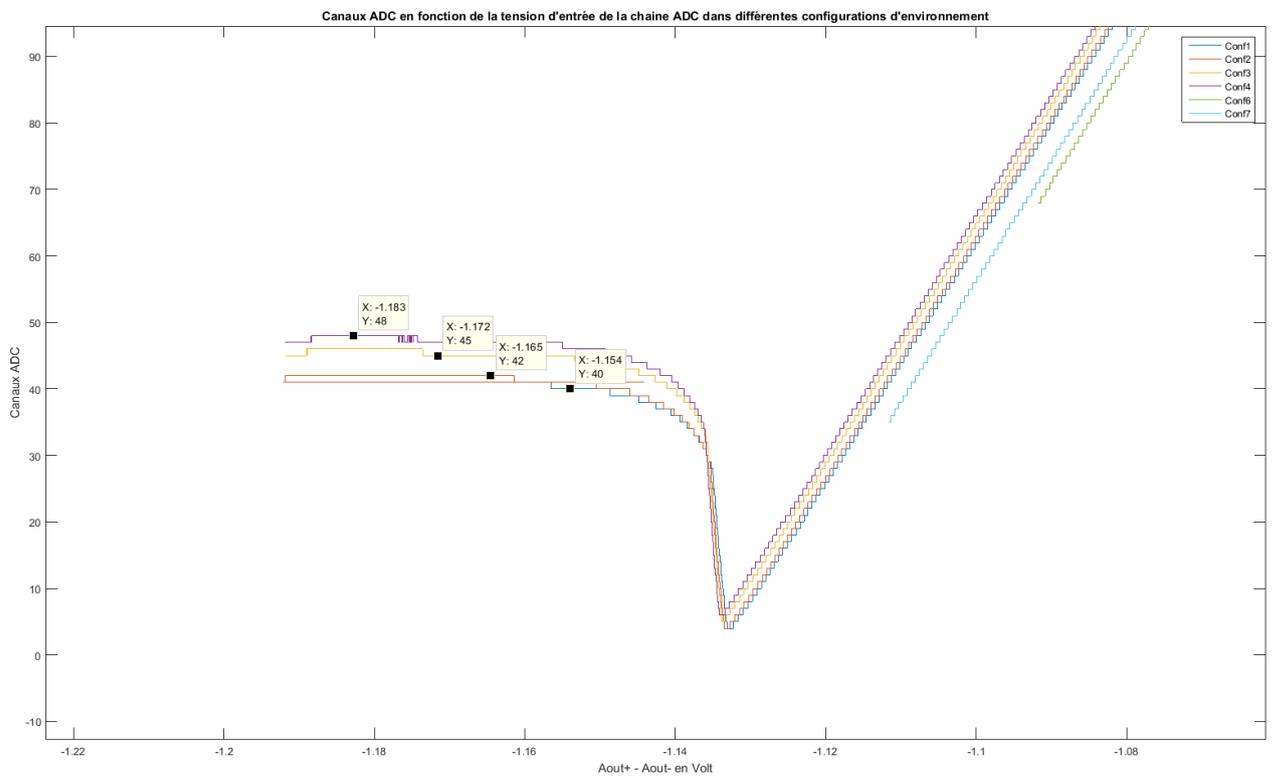


Figure III-3 Saturation basse de la chaîne de gain de la carte MUX-ADC

Le même phénomène se produit sur les deux extrémités de la pleine échelle du codeur. Sur la Figure III-3, la saturation basse de la configuration 4 a une valeur au niveau du codeur de 48 pour les valeurs d' $(A_{out+}) - (A_{out-})$ inférieur à -1.135V. Mais pour cette valeur du codeur nous pouvons aussi avoir $(A_{out+}) - (A_{out-})$ valant -1.113V.

A cause de la saturation, les valeurs max et min à prendre en compte pour avoir une mesure fiable sont les suivantes :

	Conf1	Conf2	Conf3	Conf4	Conf6	Conf7
Valeur Min (Pas codeur)	40	42	45	48	40	40
Valeur Max (Pas codeur)	4001	4001	3992	3986	4008	4006

Tableau 7 Valeurs minimales et maximales de la sortie de l'ADC

III.1.2 Analyse du codage sur la partie linéaire

Hormis les extrémités du codeur qui saturent à cause de la chaîne de gain, la partie centrale est parfaitement linéaire.

Les essais dans différentes configurations de températures mettent en avant une variation du gain en fonction de celles-ci. Nous nous retrouvons avec une modification de la sortie de l'ADC (pas codeur) pour le même signal d'entrée dans la chaîne de gain.

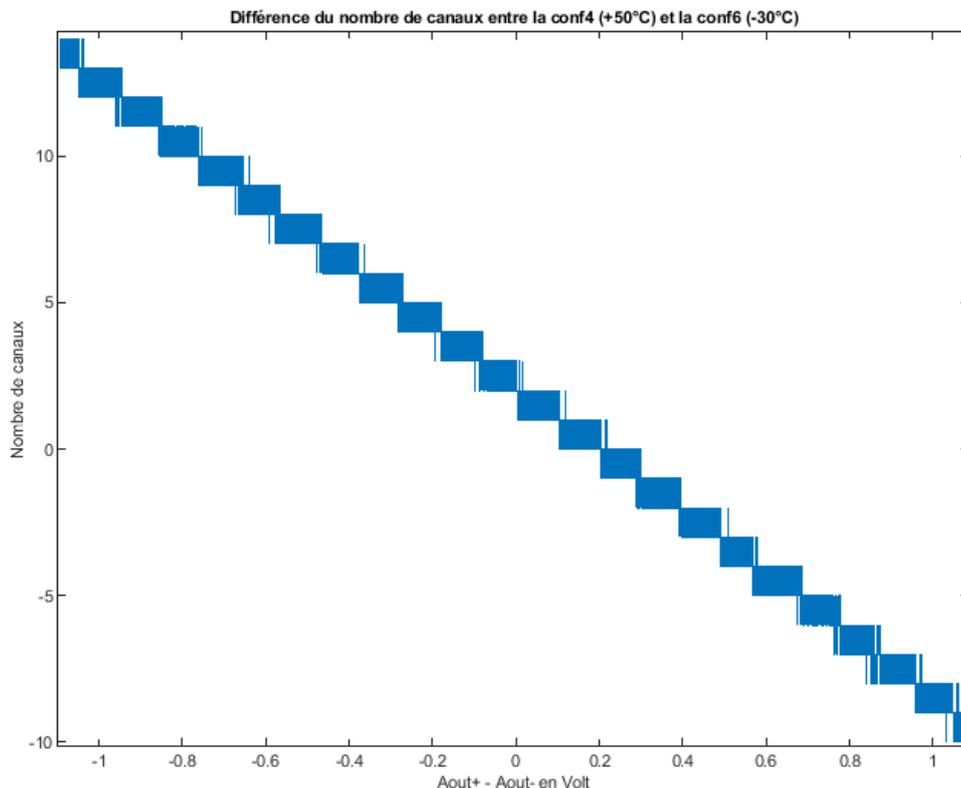


Figure III-4 Différence du nombre de canaux entre la conf 4 et la conf 6

En faisant la différence de la sortie ADC des configurations d'environnement extrêmes (conf4 +50°C et conf6 -30°C) en fonction de l'entrée de la chaîne de gain (Aout+)-(Aout-), nous remarquons une variation de 15 canaux pour les valeurs de tensions basses à l'entrée de la chaîne de gain et de 10 canaux pour les valeurs hautes. Ces variations montrent que pour le même signal d'entrée, l'évolution de la température fait varier le gain de manière non négligeable pour notre utilisation. Ces variations dues aux composants électroniques sont réversibles. Pour une même configuration, nous retrouvons les mêmes valeurs de sortie.

Il est donc important pour nous de connaître les variations du gain en fonction de la température, pour corriger post traitement les données d'acquisition de l'instrument. Pour connaître les gains, j'ai fait un ajustement de courbe linéaire de forme :

$$\text{Canal ADC} = \text{Gain ADC} \times (\text{Aout}^+ - \text{Aout}^-) + b$$

$$\text{Gain} = \text{Gain ADC} \times 2.44 \text{ E-3}$$

Les équations trouvées en fonction de la configuration de l'environnement sont les suivantes :

Configurations environnement	Equations	Gain
Conf 1	Canal ADC = 1807.8*x + 2050.1	4.411
Conf 2	Canal ADC = 1807.7*x + 2050.8	4.411
Conf 3	Canal ADC = 1805.4*x + 2050.3	4.405
Conf 4	Canal ADC = 1804.2*x + 2050.4	4.402
Conf 6	Canal ADC = 1814.8*x + 2048.8	4.428
Conf 7	Canal ADC = 1812.3*x + 2049.4	4.422

Tableau 8 Equations des courbes de sortie de l'ADC

III.2 Carte LV-HVPS

Les essais de la carte LV-HVPS ont essentiellement porté sur la stabilité des basses tensions et de la haute tension, en fonction de l'environnement. Cette carte, qui génère les différentes tensions pour l'instrument ECLAIRs, doit produire une tension la plus stable possible malgré les variations en température, pour que l'instrument puisse fonctionner nominalement.

III.2.1 Stabilisation des Basses tensions

Pour analyser la stabilité des basses tensions, j'ai fait une analyse des paramètres statistiques sur l'ensemble des données, pour chaque tension acquise pendant les essais aux différentes configurations. J'ai étudié les valeurs maximales et minimales, la moyenne, la médiane ainsi que l'écart type.

Les valeurs maximales et minimales permettent d'identifier une éventuelle valeur aberrante et la dispersion globale des données.

La médiane et la moyenne mesurent toutes les deux la tendance centrale. Les valeurs aberrantes, peuvent avoir davantage d'impact sur la moyenne que sur la médiane. Si les données sont symétriques, la moyenne et la médiane sont similaires.

Quand on analyse des données avec une distribution normale, on peut utiliser l'écart-type parallèlement à la moyenne pour calculer des intervalles de données.

On pose \bar{X} pour la moyenne, S pour l'écart-type et x pour la valeur incluse dans l'ensemble de données.

Nous obtenons les répartitions suivantes : :

- 68% des données qui se situent entre $\bar{X}-S < x < \bar{X}+S$
- 95% des données qui se situent entre $\bar{X}-2S < x < \bar{X}+2S$
- 99% des données qui se situent entre $\bar{X}-3S < x < \bar{X}+3S$

Le tableau suivant résume pour chaque tension à analyser, les statistiques de toutes les données acquises sur la plage de température allant de -30°C à +50°C.

Tensions	Min	Max	Moyenne	Médiane	Écart Type
7.5V	7.52	7.532	7.529	7.526	0.0007
-7.5V	-7.517	-7.5	-7.51	-7.51	0.0006
5VR	4.998	5.011	5.005	5.005	0.004
5VF	4.986	5.001	4.994	4.994	0.002
5VF2	4.986	5.001	4.994	4.994	0.002
-5VR	-5.106	-5.101	-5.104	-5.104	0.0008
3.3V	3.304	3.322	3.315	3.316	0.004
3V	3.1	3.103	3.101	3.101	0.0003

Tableau 9 Analyse statistique des basses tensions

Nous pouvons voir sur ce tableau que pour chaque tension, la moyenne et la médiane sont identiques ou très proches. Cela montre que la distribution des données est symétrique. Le minimum et le maximum pour chaque tension sont pleinement en accord avec les valeurs définies dans la spécification technique du besoin de la caméra DPIX [12].

III.2.2 Étude de la haute tension

III.2.2.1 Variations et OFFSET non conformes

Les essais de la haute tension ont montré une variation de celle-ci en fonction de la température et du temps. Au début des essais à température constante, la haute tension variait légèrement avec le temps. Quand j'ai commencé à faire varier la température, la valeur de la haute tension changeait de manière plus prononcée. Les courbes représentant la haute tension sont disponibles à l'annexe 6.

Ces essais n'étant pas concluants et ne respectant pas la Spécification technique du besoin [12], j'ai dû investiguer pour comprendre la raison de cette variation.

J'ai repris le schéma électronique de la carte et plus particulièrement la partie qui correspond à la génération de la haute tension. Le schéma électronique est disponible en annexe 7.

J'ai étudié particulièrement les signaux CTRL HT et REF HT qui sont respectivement les signaux de retour de l'asservissement de la haute tension et la consigne.

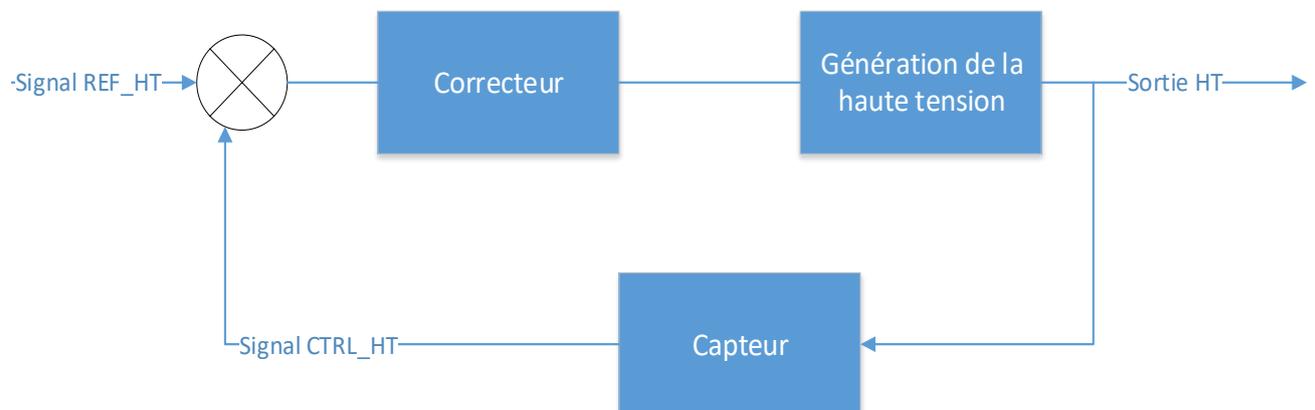


Figure III-5 synoptique de l'asservissement de la haute tension

Cette boucle d'asservissement montre le fonctionnement général de la génération de la haute tension. Le comparateur compare le signal de consigne REF_HT avec le signal retour CTRL_HT, si une différence est présente, le correcteur corrige en ordonnant de générer plus ou moins de la haute tension. Un montage électronique faisant office de capteur, récupère la tension de sortie haute tension pour la renvoyer dans le comparateur.

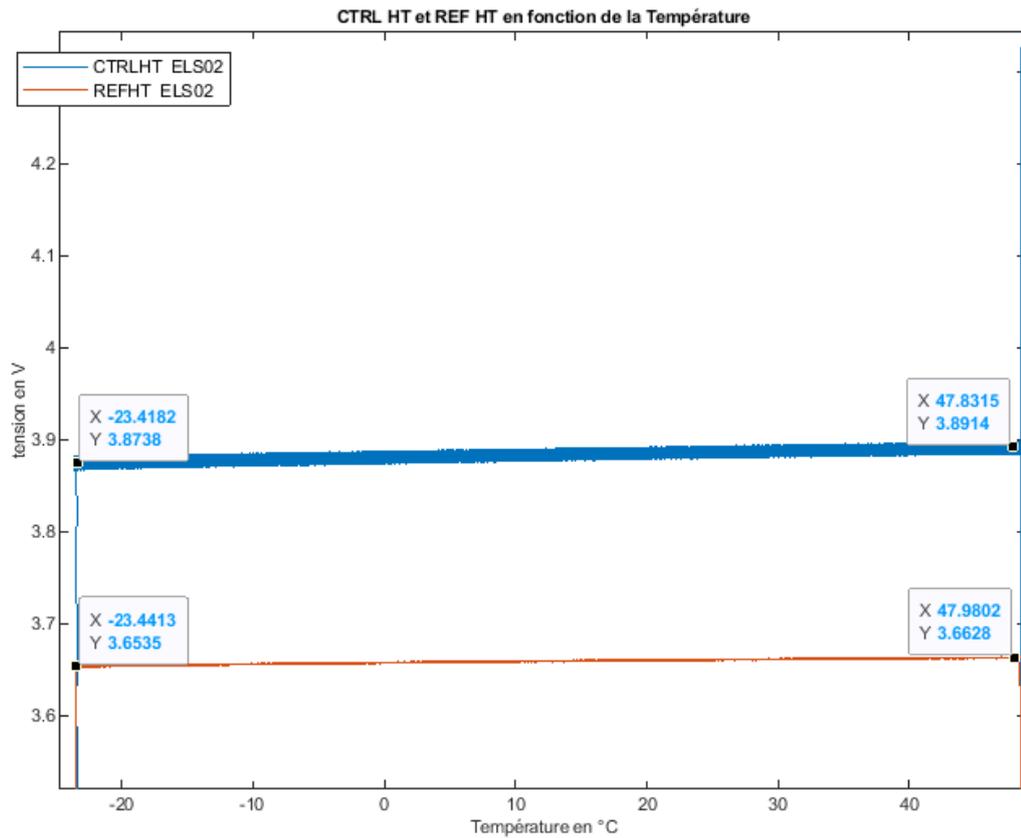


Figure III-6 Variation de CTRL HT et REF HT en fonction de la température

Ces mesures de la Figure III-6 ont montré une certaine stabilité en fonction de la température, des signaux permettant d’asservir la haute tension. L’asservissement fonctionnait donc correctement et la consigne ainsi que le signal retour restaient stables. L’origine de notre variation était donc ailleurs.

Lors d’essais, j’ai remarqué que le signal CTRL HT avait une tension résiduelle (OFFSET) qui évoluait lorsque la haute tension était éteinte. Je me suis focalisé sur ce signal pour comprendre, car en théorie s’il n’y a pas de haute tension générée, son signal image CTRL HT devrait être nul. J’ai donc effectué deux campagnes de tests sur une carte LV-HVPS pour analyser le comportement de CTRL_HT. Les valeurs des mesures sont résumées dans le tableau suivant.

		Essai 1			Essai 2		
Températures	Pression	Tension de CTRLHT HT OFF en Volt	Tension de CTRLHT HT ON en Volt	Sortie HT en Volt	Tension de CTRLHT HT OFF en Volt	Tension de CTRL HT HT ON en Volt	Sortie HT en Volt
Ambiante	PA	-0,062 puis -0,052	3.85	-455			
25°C	Vide	-0,052	3.85	-457	-0,126	3,85	-465
40°C	Vide	-0,052	3.85	-459	-0,114	3,85	-469
50°C	Vide	-0,056	3.85	-461	-0,109	3,85	-468
-30°C	Vide	-0,106	3.84	-470	-0,172	3,84	-475
-20°C	Vide	-0,1	3.84	-468	-0,156	3,84	-473
25°C (répété fin du cycle)	Vide	-0,088	3.85	-464	-0,123	3,85	-470

Tableau 10 Évolution de CTRL HT

On remarque que quand la haute tension est active, le système d'asservissement Figure III-5 fonctionne correctement. Pour une valeur de consigne REF_HT fixe, la valeur de retour CTRL_HT est aussi fixe. Le correcteur arrive à maintenir l'équilibre au niveau du comparateur. L'évolution de la haute tension au niveau de la sortie n'est donc pas observée au niveau du comparateur et du correcteur.

L'évolution des valeurs de CTRL HT quand la haute tension est éteinte n'est pas normal et peut expliquer notre problème. En effet, quand la haute tension est éteinte, la boucle

I_b	Input bias current	No load	-55 °C		100	nA
			25 °C	11	60	
			125 °C		100	

Figure III-8 Courant de fuite en entrée de l'AOP

Ce courant qui traverse donc la résistance de 1Mohms génère donc une tension.

$$U = R \times I$$

U en volt, R en Ohms et I en Ampère.

Dans notre cas, la tension U peut donc varier entre 11 mV et 100 mV en entrée de l'AOP situé en sortie de la HT (U7-B sur le schéma) sans qu'un signal ne soit généré par le générateur HT. Le signal CTRL HT est une amplification du signal qui sort de l'AOP U7-B.

Cette tension parasite en entrée dépendant du courant de fuite est à l'origine de notre problème. Pour le modèle de vol, il a été décidé de modifier l'AOP en utilisant un composant avec un courant de fuite de l'ordre du pico ampère, permettant d'avoir une tension parasite négligeable.

III.2.2.2 Débullage du potting

Un phénomène est aussi apparu sur le signal haute tension HT1 lors de l'acquisition en configuration 4 (Tableau 6) de l'environnement, c'est la configuration où la température est la plus haute +50°C. Ce phénomène est représenté sur la Figure III-9 et en annexe 8.

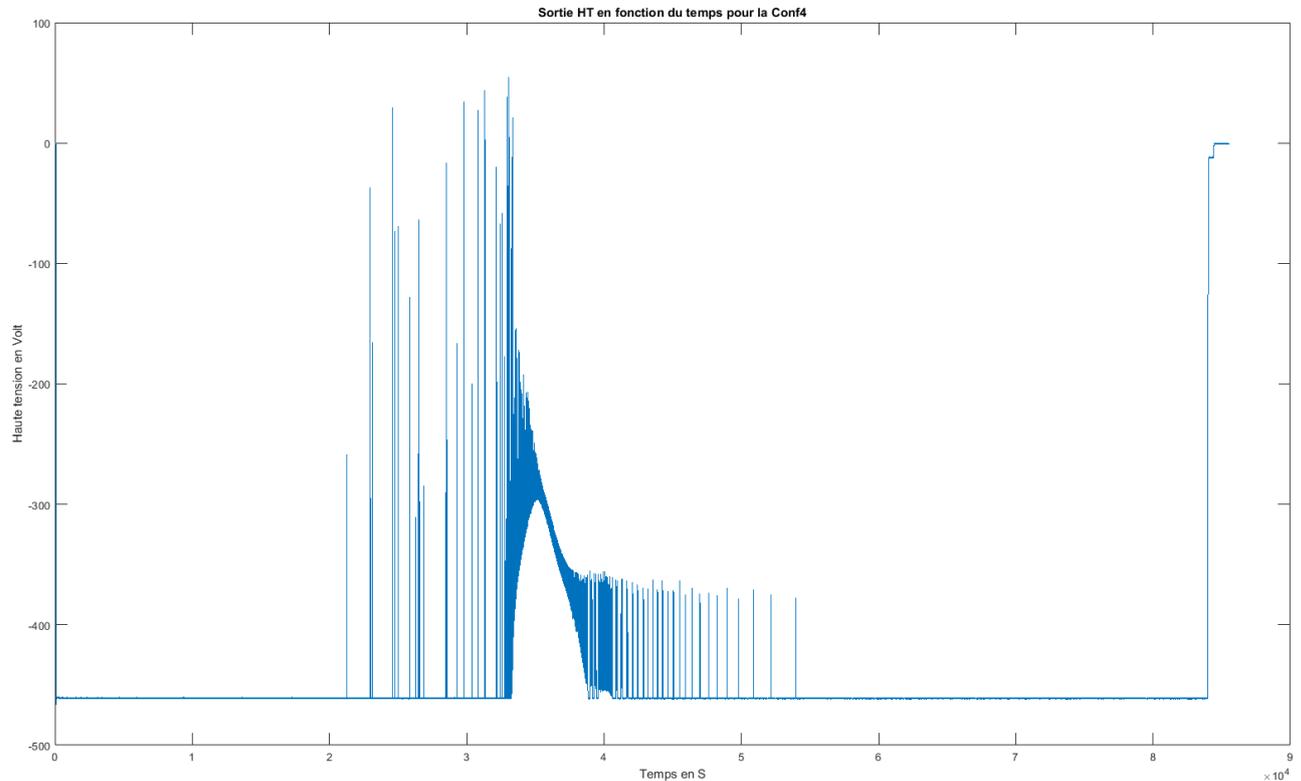


Figure III-9 Haute tension en fonction du temps pour la configuration 4 à 50°C

Après investigation avec l'équipe des électroniciens, ce phénomène correspond à des courts circuits. Une inspection à la binoculaire du potting autour du fil de la haute tension après les essais a mis en évidence des trous apparaissant sur le potting. (Voir Figure III-10).

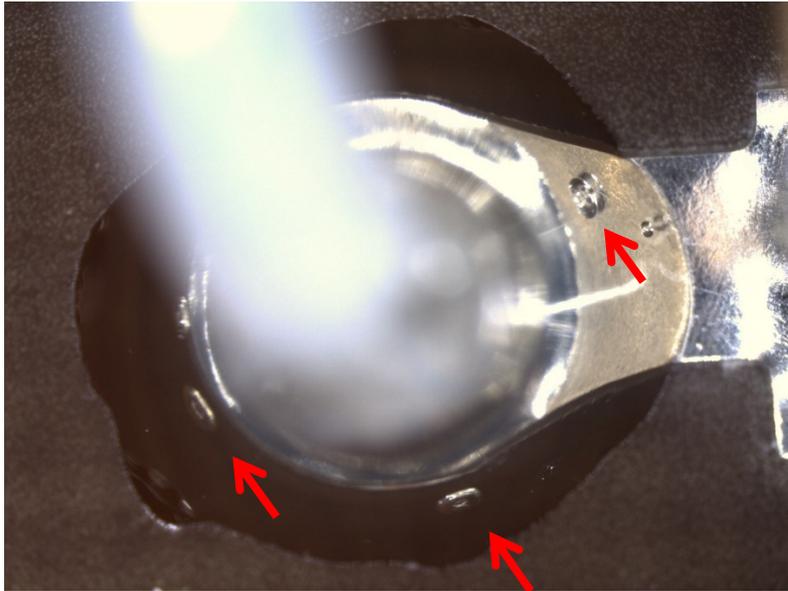


Figure III-10 Inspection à la binoculaire du potting HT

Ce phénomène observé est dû au débullage du potting du fil de haute tension sur la carte. Des bulles d'air sont emprisonnées dans la colle (potting) et lors du réchauffement de la carte dans le vide, ces bulles d'air s'échappent

Le sous-traitant en charge de la fabrication de la carte nous a confirmé qu'aucun débullage de la colle n'est fait chez eux. Il faudra donc modifier le procédé du potting mis en place par ce sous-traitant pour la fabrication du modèle FM.

IV Conclusion

IV.1 Bilan de mon travail pour le projet

Le travail effectué pour ce mémoire a permis de fiabiliser l'électronique de l'instrument ECLAIRs et de mieux comprendre son comportement dans son environnement final. Les tests effectués sur les cartes ont permis de valider certaines fonctions, de détecter des anomalies.

Pour la carte LV-HVPS, une non-conformité a été décelée sur un signal et ne permet pas un fonctionnement nominal de la haute tension. Une caractérisation complète devra être faite sur le modèle FM qui sera constitué d'un nouveau composant pour supprimer le problème, pour valider la haute tension dans la plage de tolérance acceptée. Ces essais sous vide ont aussi permis de mettre en évidence un problème dans le processus de fabrication des cartes LV-HVPS. Les autres signaux des cartes, comme les tensions d'alimentation ainsi que la consigne de la haute tension sont conformes. Malgré les variations de température et la présence de la carte dans le vide, les légères variations de ces tensions rentrent dans les tolérances spécifiées.

Pour la carte MUX ADC, en plus de vérifier son bon fonctionnement sous vide et à différentes températures, le but de ces tests était de caractériser sa chaîne de gain. Ses tests nous ont permis de voir que cette chaîne sature sur les valeurs extrêmes du codeur, obligeant à réduire la plage de tension utilisable en entrée de la chaîne de gain. Ainsi ils nous ont permis aussi de valider la chaîne de gain. La spécification de l'instrument ECLAIRs exige un gain stable pour une même température. Cette exigence a pu être validée, En complément la variation du gain en fonction de la température a pu être caractérisée pour permettre une précision plus précise au moment de l'analyse des résultats de l'instrument.

Ce banc permettra de tester, caractériser et valider une dernière fois les cartes FM après leur fabrication et avant l'intégration dans l'instrument final.

IV.2 Bilan Personnel

Ce mémoire m'a permis de mettre en application les compétences acquises durant mon parcours au sein de l'IPST CNAM et de mon expérience professionnelle. J'ai pu mettre en place une démarche générale pour la conception et le développement de moyens d'essais. Cette démarche peut être appliquée pour tout type d'essais ou banc de tests. Elle permet de structurer le projet de la conception au développement final pour garantir une mesure de qualité et la fiabilité des bancs de tests. J'ai pu apprendre et appliquer les spécificités du spatial propres aux essais tel que la notion d'AIT (Assemblage, Intégration et Tests) ainsi que l'assurance produit.

Mon travail m'a aussi permis de mettre en place un suivi des équipements pour le maintien en conditions opérationnelles. J'ai pu appliquer mes compétences acquises au sein de l'IPST CNAM pour garantir les résultats des mesures. J'ai mis en place une vraie politique de qualité de la mesure au sein du projet en mettant en place un suivi et une gestion du parc d'équipements de mesures en partenariat avec une entreprise extérieure.

Ce travail m'a permis aussi d'analyser des résultats, me permettant de traiter des données et de mettre en application des notions apprises en cours, au sein de l'IPST CNAM comme l'étude des paramètres statistiques.

L'ensemble de la formation de la filière Mesure Analyse et Instrumentation qualité, m'a permis d'évoluer et de progresser rapidement dans un domaine dans lequel je me suis professionnalisé depuis 8 ans.

V Bibliographie

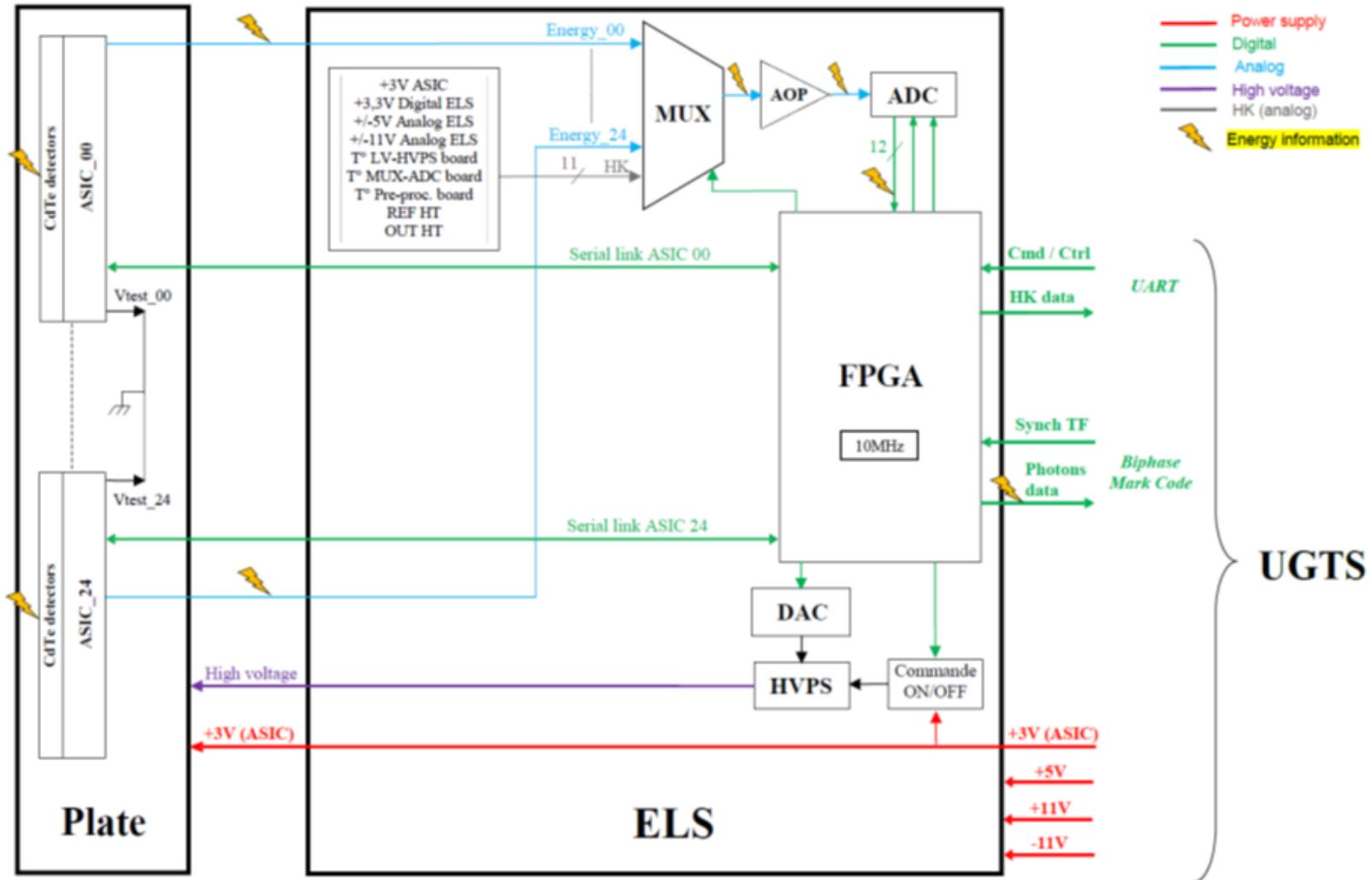
- [1] C. Bertrand, «The SVOM gamma-ray burst mission,» chez *Proceedings of science*, 2014, p. 3.
- [2] Groupe Système ECLAIRs, Instrument ECLAIRs Spécification Technique de Besoin, 2016.
- [3] Guillemot, ECLAIRs definition document, 2015.
- [4] K. Lacombe, Spécifications techniques des détecteurs cdte Lot 12288, 2019.
- [5] E. Alpen, Radiation Biophysics, Academic press, 1990.
- [6] T. R. M. M. e. K. Z. H.L. Malm, Gamma ray efficiency comparisons for si(li), ge, cdte, and hgi2 detectors, Nuclear Science, 1973.
- [7] D. B. O. G. e. P. M. N. Remoué, Extensive testing of Schottky cdte detectors for the Eclairs X/Gamma-ray camera on board the SVOM mission, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2010.
- [8] C. Klein, Bandgap dependence and related features of radiation ionization energies in semiconductors, Journal of Applied Physics, 1968.
- [9] M. e. Halkias, Electronic Devices and Circuits, Mc Graw - Hill Kogakusha ltd., 1967.
- [10] O. Gevin, Datasheet puce IDefX ECLAIR ECL-NT-I-016416-CEA, 2010.
- [11] L. e. J. Martin, «Résultats de mesures de gain et de bruit des céramiques asics version 3 - phase présérie ECL-TR-11113-309-IRAP,» 2012.

- [12] P. MANDROU et R. PONS, «DPIX - Specification Technique du Besoin (STB),» 2018.
- [13] P. M. R. Pons, Design and justifications of the DPIX sub-system, 2016.
- [14] N. instrument, *Specifications USB-6363*.
- [15] M. Galliano, «Procédure de test de Caractérisation en environnement carte ELS LV-HVPS,» 2019.
- [16] M. Galliano, «Procédure de test de Caractérisation en environnement carte ELS MUX-ADC,» 2018.
- [17] M. Galliano, «Dossier de définition banc de test pour caractérisation en environnement des cartes électroniques du DPIX,» 2018.
- [18] V. Waegebaert et M. Galliano, «Dossier de fabrication: Carte LV/HVPS - Modèle EQM,» 2018.
- [19] V. Waegebaert et M. Galliano, «Dossier de fabrication: Carte MUX-ADC - Modèle EQM,» 2017.
- [20] V. Waegebaert, Document de Contrôle des Interfaces électriques du DPIX, 2018.

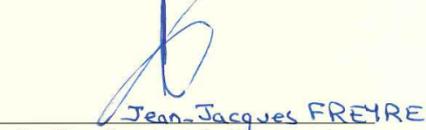
Table des annexes

Annexe 1 Synoptique de la caméra DPIX	101
Annexe 2 Certificat ISO 9001	102
Annexe 3 Attestation d'accréditation COFRAC.....	103
Annexe 4 Datasheet USB 6363	114
Annexe 5 Constat de vérification NI USB 6363.....	133
Annexe 6 Evolution de la haute tension en fonction du temps.....	138
Annexe 7 Schématique de génération de la haute tension.....	139
Annexe 8 Dégazage du potting HT1.....	140
Annexe 9 Exemple du diagramme Labview pour la carte LV-HVPS.....	141

Annexe 1 Synoptique de la caméra DPIX



Annexe 2 Certificat ISO 9001

	<p>Organisme accrédité COFRAC N° 4-0023 Accredited body by COFRAC N° 4-0023</p>	<p>125 DS 02 Q Ind 7 – jun 16</p>
<h1>CERTIFICAT</h1> <h2>CERTIFICATE</h2>		
<h3>N° AR 1330</h3>		
<p>Nous certifions par la présente que le Système de Management de la Qualité de la société : We hereby certify that the Quality Management System of the company:</p>		
<h1>EUROPE QUALITE FRANCE</h1> <p>35, rue Condorcet – B.P. 17 38091 VILLEFONTAINE Cedex (France)</p>		
<p>est conforme aux exigences de la norme suivante : is in compliance with the requirements of the following standard:</p>		
<h2>ISO 9001 : 2015</h2>		
<p>Le domaine d'application du Système de Management de la Qualité est le suivant : The scope of the Quality Management System is:</p>		
<p>COMMERCIALISATION DU SERVICE D'ETALONNAGE ET/OU VERIFICATIONS D'APPAREILS DE MESURE ET DE PRESTATION DU SERVICE SOUS-TRAITE AUX FILIALES OU A DES FOURNISSEURS DE METROLOGIE. PRESTATION ASSOCIEE : FORMATION EN METROLOGIE ET LOGICIELS ASSOCIES</p>		
<p><i>MARKETING OF THE CALIBRATION SERVICE AND/OR CHECK OF MEASURING DEVICES AND PROVISION OF THE SUBCONTRACTED SERVICE TO THE SUBSIDIARIES OR TO METROLOGY SUPPLIERS. ASSOCIATED SERVICE : TRAINING IN METROLOGY AND ASSOCIATED SOFTWARE.</i></p>		
<p>Ce certificat demeurera en vigueur jusqu'à sa fin de validité à moins d'avis contraire, à condition que la mise en place et la conformité du Système du Management de la Qualité soient jugées satisfaisantes lors des audits de surveillance et que les conditions du contrat de AB Certification soient observées. This certificate is valid until its expiry date unless further notice, provided that the compliance and implementation of the Quality Management System are found to be satisfactory at follow-up audits and that AB Certification contract rules are fulfilled.</p>		
<p>Fait à PARIS, le 01 mars 2019 Signed in PARIS on the 1st of March, 2019</p>	<p>Date de validité : 08 mars 2022 Expiry date : 08th of March, 2022</p>	
<p>Fin de validité du certificat précédent : 08 mars 2019 Date d'audit de renouvellement: 31 janvier 2019</p>		
 <p>cofrac CERTIFICATION DE SYSTEMES DE MANAGEMENT Accréditation N°4-0023 PORTEE DISPONIBLE SUR www.cofrac.fr</p>	 <p>Jean-Charles HEITZMANN Le Représentant d'AB Certification AB Certification Representative</p>	<p>Jean-Jacques FREYRE Le Représentant de l'Entreprise The Company Representative</p>
<p>Ce certificat est la propriété d'AB Certification. Il devra lui être retourné en cas de demande. AB Certification – 19, rue de Paradis – 75010 PARIS</p>		

Annexe 3 Attestation d'accréditation COFRAC



Convention N° 2600

Section Laboratoires

ATTESTATION D'ACCREDITATION

ACCREDITATION CERTIFICATE

N° 2-1445 rév. 4

Le Comité Français d'Accréditation (Cofrac) atteste que :
The French Committee for Accreditation (Cofrac) certifies that :

RHÔNE ALPES QUALITE
N° SIREN : 349975557

Satisfait aux exigences de la norme
Fulfils the requirements of the standard

NF EN ISO/CEI 17025 : 2005

et aux règles d'application du Cofrac pour les activités d'étalonnages en :
and Cofrac rules of application for the activities of calibration in :

**ELECTRICITE COURANT CONTINU ET BASSE FREQUENCE / COURANT CONTINU - COURANT
ALTERNATIF**
*DIRECT CURRENT AND LOW FREQUENCY ELECTRICITY / DIRECT CURRENT - ALTERNATIVE
CURRENT*

réalisées par / *performed by :*

RHÔNE ALPES QUALITE
35, rue de Condorcet
Parc Technologique Nord
38090 VILLEFONTAINE

et précisément décrites dans l'annexe technique jointe
and precisely described in the attached technical appendix

L'accréditation suivant la norme internationale homologuée NF EN ISO/CEI 17025 : 2005 est la preuve de la compétence technique du laboratoire dans un domaine d'activités clairement défini et du bon fonctionnement dans ce laboratoire d'un système de management de la qualité adapté (cf. communiqué conjoint ISO/ILAC/IAF de janvier 2009)

Accreditation in accordance with the recognised international standard ISO/IEC 17025 : 2005 demonstrates technical competence for a defined scope and the operation of a laboratory quality management system (re. Joint IAF/ILAC/ISO Communiqué dated January 2009).

Le Cofrac est signataire de l'accord multilatéral d'EA pour l'accréditation, pour les activités objets de la présente attestation.

Cofrac is signatory of the European co-operation for Accreditation (EA) Multilateral Agreement for accreditation for the activities covered by this certificate.

Date de prise d'effet / *granting date* : **13/07/2018**

Date de fin de validité / *expiry date* : **30/04/2022**

LAB FORM 37 – Révision 06 – 07 Avril 2017

Page 1/11

Pour le Directeur Général et par délégation
On behalf of the General Director

Le Responsable du Pôle Physique-Mécanique,
The Pole Manager,

Stéphane RICHARD

La présente attestation n'est valide qu'accompagnée de l'annexe technique.
This certificate is only valid if associated with the technical appendix.

L'accréditation peut être suspendue, modifiée ou retirée à tout moment. Pour une utilisation appropriée, la portée de l'accréditation et sa validité doivent être vérifiées sur le site internet du Cofrac (www.cofrac.fr).
The accreditation can be suspended, modified or withdrawn at any time. For a proper use, the scope of accreditation and its validity should be checked on the Cofrac website (www.cofrac.fr).

Cette attestation annule et remplace l'attestation N° 2-1445 Rév 3.
This certificate cancels and replaces the certificate N° 2-1445 [Rév 3](#).

Seul le texte en français peut engager la responsabilité du Cofrac.
The Cofrac's liability applies only to the french text.

Comité Français d'Accréditation - 52, rue Jacques Hillairet - 75012 PARIS Tél. : 33 (0)1 44 68 82 20 – Fax : 33 (0)1 44 68 82 21 Siret : 397 879 487 00031 www.cofrac.fr



Section Laboratoires

ANNEXE TECHNIQUE
à l'attestation N° 2-1445 rév. 4

L'accréditation concerne les prestations réalisées par :

RHÔNE ALPES QUALITE
35, rue de Condorcet
Parc Technologique Nord
38090 VILLEFONTAINE

Contact :

Monsieur Franck SCHMITT

Tél. : 04.74.94.94.19

Fax : 04.74.94.05.51

E-mail : franck.schmitt@eqf.fr

Dans son unité :

- LABORATOIRE D'ELECTRICITE-MAGNETISME

Elle porte sur : voir pages suivantes

ELECTRICITE COURANT CONTINU ET BASSE FREQUENCE / COURANT CONTINU / DIFFERENCE DE POTENTIEL							
Objet	Caractéristique mesurée ou recherchée	Domaine d'application	Etendue de mesure	Incertitude élargie	Principe de la méthode	Principaux moyens utilisés	Référence de la méthode
Voltmètre Multimètre	Différence de potentiel	/	0 mV à 20 mV 20 mV à 100 mV	0,6 μ V 1,5 μ V	Méthode de comparaison	Référence de tension 1V Diviseur Kelvin-Varley	PEEL 1655
Voltmètre Multimètre Générateur de tension continue		/	100 mV à 1 V 1 V à 10 V	$1,0 \cdot 10^{-6} \cdot U + 3 \mu$ V $2,0 \cdot 10^{-6} \cdot U + 3 \mu$ V	Méthode de comparaison	Référence de tension 10V (ZENER) Diviseur Kelvin-Varley Nanovoltmètre	PEEL 1101 PEEL 1151
Voltmètre Multimètre Générateur de tension continue		/	10 V à 100 V 100 V à 1 kV	$5,0 \cdot 10^{-6} \cdot U$ $5,0 \cdot 10^{-6} \cdot U$	Méthode d'opposition	Référence de tension 10V (ZENER) Diviseur Kelvin-Varley + Réducteur Nanovoltmètre	PEEL 1102 PEEL 1153

U est la valeur de la différence de potentiel exprimée en volts.

ELECTRICITE COURANT CONTINU ET BASSE FREQUENCE / COURANT ALTERNATIF / DIFFERENCE DE POTENTIEL							
Objet	Caractéristique mesurée ou recherchée	Domaine d'application	Etendue de mesure	Incertitude élargie	Principe de la méthode	Principaux moyens utilisés	Référence de la méthode
Voltmètre Multimètre Générateur de tension alternative	Différence de potentiel en courant alternatif pour des domaines de valeurs continues	45 Hz à 1 kHz	10 mV à 100 mV	$3,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 15 \mu\text{V}$	Méthode de comparaison	Voltmètre numérique Générateur	PEEL 1204 PEEL 1254
		45 Hz à 2 kHz 2 kHz à 30 kHz 30 kHz à 100 kHz	100 mV à 190 mV	$3,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 15 \mu\text{V}$ $9,0 \cdot 10^{-4} \cdot U + 25 \mu\text{V}$ $1,5 \cdot 10^{-3} \cdot U + 150 \mu\text{V}$			
		45 Hz à 10 kHz 10 kHz à 30 kHz 30 kHz à 100 kHz	190 mV à 1.9 V	$1,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 0,2 \text{ mV}$ $2,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 0,2 \text{ mV}$ $6,0 \cdot 10^{-4} \cdot U + 1 \text{ mV}$			
		45 Hz à 2 kHz 2 kHz à 10 kHz 10 kHz à 30 kHz 30 kHz à 100 kHz	1.9 V à 19 V	$1,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 1,5 \text{ mV}$ $1,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 2,0 \text{ mV}$ $2,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 2,5 \text{ mV}$ $6,0 \cdot 10^{-4} \cdot U + 8 \text{ mV}$			
		45 Hz à 2 kHz 2 kHz à 10 kHz 10 kHz à 30 kHz 30 kHz à 100 kHz	19 V à 190 V	$1,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 15 \text{ mV}$ $1,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 25 \text{ mV}$ $2,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 30 \text{ mV}$ $6,0 \cdot 10^{-4} \cdot U + 80 \text{ mV}$			
		45 Hz à 2 kHz 2 kHz à 10 kHz 10 kHz à 20 kHz	190 V à 1 kV	$1,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 70 \text{ mV}$ $1,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 0,2 \text{ V}$ $2,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 0,35 \text{ V}$			

U est la valeur de la différence de potentiel exprimée en volts.

ELECTRICITE COURANT CONTINU ET BASSE FREQUENCE / COURANT CONTINU / INTENSITE DE COURANT ELECTRIQUE							
Objet	Caractéristique mesurée ou recherchée	Domaine d'application	Etendue de mesure	Incertitude élargie	Principe de la méthode	Principaux moyens utilisés	Référence de la méthode
Ampèremètre Multimètre Générateur de courant continu	Intensité de courant électrique	/	1 μ A à 10 μ A	0,7 nA	Méthode potentiométrique Mesure de la d.d.p aux bornes d'une résistance (ou d'un shunt)	Référence de tension 10 V (ZENER) Diviseur Kelvin-Varley Résistance Générateur Décteur de zéro	PEEL 1301
			10 μ A à 100 μ A	$0,6 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0,7$ nA			
			100 μ A à 250 μ A	$0,9 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0,4$ nA			
			250 μ A à 1 mA	$0,7 \cdot 10^{-5} \cdot I + 6$ nA			
			1 mA à 2,5 mA	$1,0 \cdot 10^{-5} \cdot I + 3$ nA			
			2,5 mA à 10 mA	$0,7 \cdot 10^{-5} \cdot I + 60$ nA			
			10 mA à 25 mA	$1,0 \cdot 10^{-5} \cdot I + 30$ nA			
			25 mA à 100 mA	$0,7 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0,6$ μ A			
			100 mA à 1 A	$0,8 \cdot 10^{-5} \cdot I + 7$ μ A			
			1 A à 5 A	$1,5 \cdot 10^{-5} \cdot I + 60$ μ A			
			5 A à 10 A	$2,9 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0,6$ mA			
			10 A à 25 A	$0,8 \cdot 10^{-5} \cdot I + 7$ mA			
25 A à 300 A	$6,0 \cdot 10^{-4} \cdot I + 25$ mA						

I est la valeur de l'intensité de courant exprimée en ampères.

ÉLECTRICITÉ COURANT CONTINU ET BASSE FREQUENCE / COURANT ALTERNATIF / INTENSITÉ DE COURANT ÉLECTRIQUE							
Objet	Caractéristique mesurée ou recherchée	Domaine d'application	Etendue de mesure	Incertitude élargie	Principe de la méthode	Principaux moyens utilisés	Référence de la méthode
Ampèremètre Multimètre Générateur de courant alternatif	Intensité de courant électrique	45 Hz à 1 kHz	1 mA à 1,9 mA	$1,2 \cdot 10^{-3} \cdot I + 0,5 \mu A$	Mesure de la d.d.p aux bornes d'une résistance	Générateur Résistance Voltmètre numérique	PEEL 1402
			1,9 mA à 19 mA	$1,1 \cdot 10^{-3} \cdot I + 1 \mu A$			
			19 mA à 100 mA	$0,7 \cdot 10^{-3} \cdot I + 10 \mu A$			
			100 mA à 190 mA	$0,8 \cdot 10^{-3} \cdot I + 5 \mu A$			
			190 mA à 1 A	$0,7 \cdot 10^{-3} \cdot I + 0,1 \text{ mA}$			
			1 A à 1,9 A	$1,0 \cdot 10^{-3} \cdot I + 50 \mu A$			
			1,9 A à 5 A	$0,9 \cdot 10^{-3} \cdot I + 1 \text{ mA}$			
			5 A à 10 A	$5,5 \cdot 10^{-3} \cdot I + 1,4 \text{ mA}$			

I est la valeur de l'intensité de courant exprimée en ampères.

ELECTRICITE COURANT CONTINU ET BASSE FREQUENCE / COURANT CONTINU / RESISTANCE ELECTRIQUE							
Objet	Caractéristique mesurée ou recherchée	Domaine d'application	Etendue de mesure	Incertitude élargie	Principe de la méthode	Principaux moyens utilisés	Référence de la méthode
Shunt Résistance	Résistance électrique	/	100 $\mu\Omega$ à 1 m Ω	$2,0 \cdot 10^{-3} \cdot R$	Méthode potentiométrique Mesure de la d.d.p aux bornes d'une résistance (ou d'un shunt)	Shunt étalon + Voltmètre + Générateur	PEEL 1507
			1 m Ω à 20 m Ω	$1,0 \cdot 10^{-4} \cdot R + 1 \mu\Omega$		Résistance Voltmètre numérique Générateur	PEEL 1506
			20 m Ω à 200 m Ω	$5,0 \cdot 10^{-5} \cdot R + 5 \mu\Omega$			
			200 m Ω à 2 Ω	$2,0 \cdot 10^{-5} \cdot R + 40 \mu\Omega$			
			2 Ω à 20 Ω	$2,0 \cdot 10^{-5} \cdot R + 0,5 \text{ m}\Omega$			
			20 Ω à 100 Ω	$1,0 \cdot 10^{-5} \cdot R + 2 \text{ m}\Omega$			
			100 Ω à 200 Ω	$1,0 \cdot 10^{-5} \cdot R + 3 \text{ m}\Omega$			
200 Ω à 1 k Ω	$1,0 \cdot 10^{-5} \cdot R + 5 \text{ m}\Omega$						
Résistance	Résistance électrique	/	1 k Ω à 5 k Ω	$1,2 \cdot 10^{-5} \cdot R + 6 \text{ m}\Omega$	Méthode potentiométrique Méthode de comparaison à une résistance étalon	Résistance, Référence de tension 10 V (ZENER), Diviseur Kelvin-Varley, Générateur	PEEL 1503
			5 k Ω à 50 k Ω	$1,2 \cdot 10^{-5} \cdot R + 60 \text{ m}\Omega$			
			50 k Ω à 1 M Ω	$1,2 \cdot 10^{-5} \cdot R + 0,6 \Omega$			
			1 M Ω à 20 M Ω	$5,4 \cdot 10^{-5} \cdot R$			
Résistance de haute valeur	Résistance électrique	Pour une tension de mesure de 100V	100 k Ω à 10 G Ω	$5,0 \cdot 10^{-4} \cdot R$	Méthode de deux générateurs de tension	Générateurs Résistance	PEEL 1504
			10 G Ω à 100 G Ω	$5,0 \cdot 10^{-3} \cdot R$			
			100 G Ω à 1 T Ω	$1,0 \cdot 10^{-2} \cdot R$			
		Pour une tension de mesure de 500V	1 M Ω à 10 G Ω	$5,0 \cdot 10^{-4} \cdot R$			
			10 G Ω à 100 G Ω	$5,0 \cdot 10^{-3} \cdot R$			
			100 G Ω à 1 T Ω	$1,0 \cdot 10^{-2} \cdot R$			
		Pour une tension de mesure de 1 kV	200 M Ω à 10 G Ω	$3,0 \cdot 10^{-3} \cdot R$			
			10 G Ω à 100 G Ω	$5,0 \cdot 10^{-3} \cdot R$			
			100 G Ω à 1 T Ω	$1,0 \cdot 10^{-2} \cdot R$			

R est la valeur de la résistance électrique exprimée en ohms.

ELECTRICITE COURANT CONTINU ET BASSE FREQUENCE / COURANT CONTINU / RESISTANCE ELECTRIQUE (SUITE)							
Objet	Caractéristique mesurée ou recherchée	Domaine d'application	Etendue de mesure	Incertitude élargie	Principe de la méthode	Principaux moyens utilisés	Référence de la méthode
Ohmmètre Multimètre Mégohmmètre Milli-ohmmètre	Résistance électrique	/	200 $\mu\Omega$ ■	0,5 $\mu\Omega$	Méthode de comparaison à une résistance étalon	Résistance (puissance inférieure ou égale à 10 mW)	PEEL 1551
			1 m Ω ■	160 n Ω			
			10 m Ω ■	0,6 $\mu\Omega$			
			100 m Ω ■	2 $\mu\Omega$			
			1 Ω ■	10 $\mu\Omega$			
			10 Ω ■	60 $\mu\Omega$			
			100 Ω ■	0,7 m Ω			
			1 k Ω ■	7 m Ω			
			10 k Ω ■	60 m Ω			
			100 k Ω ■	0,6 Ω			
			1 M Ω ■	60 Ω	Méthode de comparaison à une résistance étalon	Résistance de haute valeur (puissance supérieure à 10 mW)	PEEL 1553
			10 M Ω ■	600 Ω			
			100 k Ω ■	200 Ω			
			1 M Ω ■	1 k Ω			
			10 M Ω ■	10 k Ω			
			100 M Ω ■	60 k Ω			
			500 M Ω ■	2 M Ω			
			1 G Ω ■	1 M Ω			
			2 G Ω ■	1,5 M Ω			
			5 G Ω ■	5 M Ω			
10 G Ω ■	200 M Ω						
100 G Ω ■	2 G Ω						
1 T Ω ■	40 G Ω						

■ Valeur ponctuelle

R est la valeur de la résistance électrique exprimée en ohms.

ELECTRICITE COURANT CONTINU ET BASSE FREQUENCE / COURANT CONTINU / TEMPERATURE PAR SIMULATION ELECTRIQUE							
Objet	Caractéristique mesurée ou recherchée	Domaine d'application	Etendue de mesure ⁽¹⁾	Incertitude élargie ⁽²⁾	Principe de la méthode	Principaux moyens utilisés	Référence de la méthode
Indicateur pour thermocouple Multimètre Centrale d'acquisition	Température par simulation électrique	Sans compensation de soudure froide	-20 mV à 20 mV 20 mV à 100 mV	2,5 µV 4 µV	Génération de tensions converties à l'aide de polynômes pour thermocouple	Générateur de tension continue	PEEL 1651
Indicateur pour thermocouple Multimètre Centrale d'acquisition Thermomètre	Température par simulation électrique	Type J, K, T et S : Avec compensation de soudure froide	-20 mV à 100 mV	3 µV à 7 µV	Génération de tension à l'extrémité des câbles à thermocouple, converties à l'aide de polynômes pour thermocouple	Générateur de tension continue, bain de glace, câbles d'extension J,K,T, decompensation S	PEEL 1652
Simulateur de thermocouple Calibrateur de température	Température par simulation électrique	Sans compensation de soudure froide	-20 mV à 20 mV 20 mV à 100 mV	2 µV 3,5 µV	Mesure de tensions converties à l'aide de polynômes pour thermocouple	Voltmètre numérique étalon	PEEL 1606
Simulateur de thermocouple Calibrateur de température	Température par simulation électrique	Type J, K, T et S : Avec compensation de soudure froide	-20 mV à 100 mV	3 µV à 6 µV	Mesure de tension à l'extrémité des câbles à thermocouple, converties à l'aide de polynômes pour thermocouple	Voltmètre numérique, bain de glace, câbles d'extension J,K,T, de compensation S	PEEL 1607
Simulateur de sonde à résistance de Platine Calibrateur de température	Température par simulation électrique	/	18,5 Ω à 2 kΩ 2 kΩ à 10 kΩ	$1,0 \cdot 10^{-5} \cdot R + 5 \text{ m}\Omega$ $1,2 \cdot 10^{-5} \cdot R + 60 \text{ m}\Omega$	Méthode de comparaison à une résistance étalon	Résistance étalon , Voltmètre numérique, Générateur de courant continu	PEEL 1608
Indicateur pour thermocouple Multimètre Centrale d'acquisition Thermomètre	Température par simulation électrique	/	18,5 Ω à 20 Ω 20 Ω à 200 Ω 200 Ω à 400 Ω	10 mΩ 14 mΩ 18 mΩ	Méthode de comparaison à une boîte de résistances à décades étalon	Boîte de résistances	PEEL 1653

R est la valeur de la résistance électrique exprimée en ohms.

⁽¹⁾ Les domaines de température équivalents sont, pour chaque couple thermoélectrique et thermorésistante, déterminés conformément aux normes en vigueur.

⁽²⁾ Afin d'obtenir l'incertitude globale d'étalonnage, l'incertitude de cette colonne sera convertie en °C et combinée avec la résolution, la stabilité propres à l'instrument. L'incertitude propre à la table de conversion devra également être prise en compte.

Portée flexible FLEX2 : le laboratoire peut employer d'autres méthodes dès lors que les compétences qu'elles impliquent sont présentes dans sa portée d'accréditation et ce pour la même grandeur et la même valeur ou étendue de mesure. Cependant, le laboratoire ne pourra mentionner des incertitudes meilleures que celles figurant dans sa portée d'accréditation. La liste des méthodes équivalentes employées est tenue à jour par le laboratoire.

Les incertitudes élargies correspondent aux aptitudes en matière de mesures et d'étalonnages (CMC) du laboratoire pour une probabilité de couverture de 95%.

* *Accréditation rendue obligatoire dans le cadre réglementaire français précisé par le texte cité en référence dans le document Cofrac LAB INF 99 disponible sur www.cofrac.fr*

Date de prise d'effet : **13/07/2018** Date de fin de validité : **30/04/2022**

La Responsable d'Accréditation Pilote
The Pilot Accreditation Manager

Aurélie MICHOT

Cette annexe technique annule et remplace l'annexe technique 2-1445 Rév. 3.

Comité Français d'Accréditation - 52, rue Jacques Hillairet - 75012 PARIS Tél. : 33 (0)1 44 68 82 20 – Fax : 33 (0)1 44 68 82 21 Siret : 397 879 487 00031 www.cofrac.fr
--

Annexe 4 Datasheet USB 6363

SPECIFICATIONS

USB-6363

32 AI (16-Bit, 2 MS/s), 4 AO (2.86 MS/s), 48 DIO USB Multifunction I/O Device

These specifications apply to the USB-6363 BNC, USB-6363 Mass Termination, and USB-6363 Spring Terminal.

Definitions

Warranted specifications describe the performance of a model under stated operating conditions and are covered by the model warranty.

Characteristics describe values that are relevant to the use of the model under stated operating conditions but are not covered by the model warranty.

- *Typical* specifications describe the performance met by a majority of models.
- *Nominal* specifications describe an attribute that is based on design, conformance testing, or supplemental testing.

Specifications are *Typical* unless otherwise noted.

Conditions

Specifications are valid at 25 °C unless otherwise noted.

Analog Input

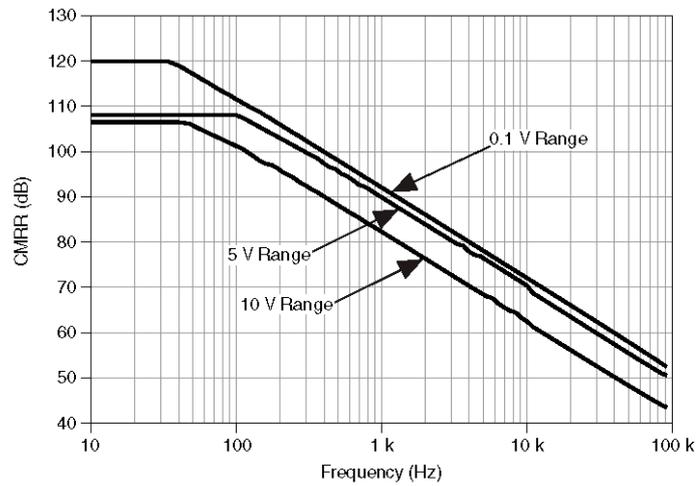
Number of channels	32 single-ended or 16 differential
ADC resolution	16 bits
DNL	No missing codes guaranteed
INL	Refer to <i>AI Absolute Accuracy</i> .



Sample rate

Single channel maximum	2.00 MSample/s
Multichannel maximum (aggregate)	1.00 MSample/s
Minimum	No minimum
Timing resolution	10 ns
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Input coupling	DC
Input range	± 0.1 V, ± 0.2 V, ± 0.5 V, ± 1 V, ± 2 V, ± 5 V, ± 10 V
Maximum working voltage for analog inputs (signal + common mode)	± 11 V of AI GND
CMRR (DC to 60 Hz)	100 dB

Figure 1. AI <0..31> CMRR



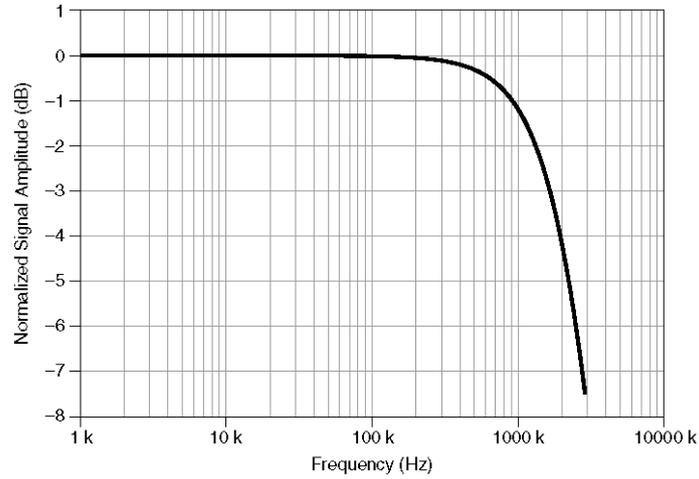
Input impedance

Device on	
AI+ to AI GND	>10 G Ω in parallel with 100 pF
AI- to AI GND	>10 G Ω in parallel with 100 pF
Device off	
AI+ to AI GND	820 Ω
AI- to AI GND	820 Ω
Input bias current	± 100 pA

Crosstalk (at 100 kHz)

Adjacent channels	-75 dB
Non-adjacent channels	-95 dB
Small signal bandwidth (-3 dB)	1.7 MHz

Figure 2. AI <0..31> Small Signal Bandwidth

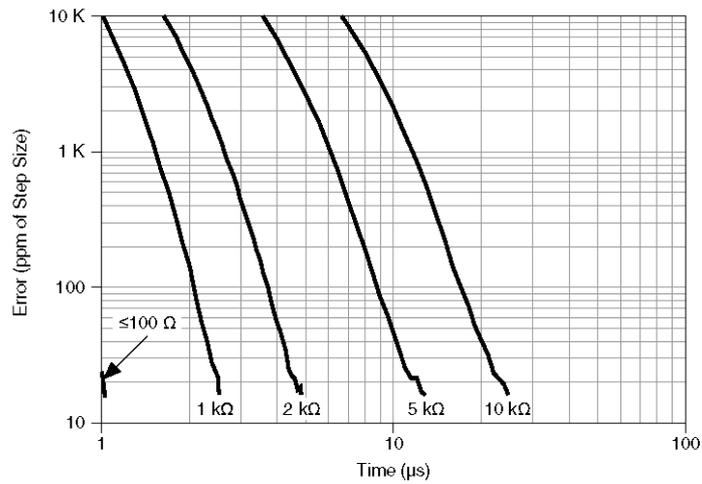


Input FIFO size	2,047 samples
Scan list memory	4,095 entries
Data transfers	USB Signal Stream, programmed I/O
Overvoltage protection for all analog input and sense channels	
Device on	±25 V for up to two AI pins
Device off	±15 V for up to two AI pins
Input current during overvoltage condition	±20 mA max/AI pin

Table 1. Settling Time for Multichannel Measurements

Range	±60 ppm of Step (±4 LSB for Full-Scale Step)	±15 ppm of Step (±1 LSB for Full-Scale Step)
± 10 V, ±5 V, ±2 V, ±1 V	1 μs	1.5 μs
±0.5 V	1.5 μs	2 μs
±0.2 V, ±0.1 V	2 μs	8 μs

Figure 3. Settling Error versus Time for Different Source Impedances



Analog Triggers

Number of triggers	1
Source	AI <0..31>, APFI <0,1>
Functions	Start Trigger, Reference Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Convert Clock, Sample Clock Timebase
Source level	
AI <0..31>	±Full scale
APFI <0,1>	±10 V
Resolution	16 bits
Modes	Analog edge triggering, analog edge triggering with hysteresis, analog window triggering
Bandwidth (-3 dB)	
AI <0..31>	3.4 MHz
APFI <0,1>	3.9 MHz
Accuracy	±1% of range
APFI <0,1> characteristics	
Input impedance	10 kΩ
Coupling	DC

Protection	
Power on	±30 V
Power off	±15 V

AI Absolute Accuracy (Warranted)

Table 2. AI Absolute Accuracy

Nominal Range Positive Full Scale (V)	Nominal Range Negative Full Scale (V)	Residual Gain Error (ppm of Reading)	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	Random Noise, σ (μVrms)	Absolute Accuracy at Full Scale (μV)
10	-10	48	13	21	315	1,660
5	-5	55	13	21	157	870
2	-2	55	13	24	64	350
1	-1	65	17	27	38	190
0.5	-0.5	68	17	34	27	100
0.2	-0.2	95	27	55	21	53
0.1	-0.1	108	45	90	17	33



Note *Absolute Accuracy at Full Scale* is determined using the following assumptions:

- TempChangeFromLastExternalCal = 10 °C
- TempChangeFromLastInternalCal = 1 °C
- NumberOfReadings = 10,000
- CoverageFactor = 3 σ



Note Accuracies listed are valid for up to two years from the device external calibration.

Gain tempco	13 ppm/°C
Reference tempco	1 ppm/°C
INL error	60 ppm of range

AI Absolute Accuracy Equation

AbsoluteAccuracy = Reading · (GainError) + Range · (OffsetError) + NoiseUncertainty

GainError = ResidualGainError + GainTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + ReferenceTempco · (TempChangeFromLastExternalCal)

OffsetError = ResidualOffsetError + OffsetTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + INLError

NoiseUncertainty = $\frac{\text{Random Noise} \cdot 3}{\sqrt{10,000}}$ for a coverage factor of 3 σ and averaging 10,000 points.

AI Absolute Accuracy Example

For example, on the 10 V range, the absolute accuracy at full scale is as follows:

GainError: 48 ppm + 13 ppm · 1 + 1 ppm · 10 = 71 ppm

OffsetError: 13 ppm + 21 ppm · 1 + 60 ppm = 94 ppm

NoiseUncertainty: $\frac{315 \mu\text{V} \cdot 3}{\sqrt{10,000}} = 9.4 \mu\text{V}$

AbsoluteAccuracy: 10 V · (GainError) + 10 V · (OffsetError) + NoiseUncertainty = 1,660 μV

Analog Output

Number of channels	4
DAC resolution	16 bits
DNL	±1 LSB
Monotonicity	16 bit guaranteed
Maximum update rate (simultaneous)	
1 channel	2.86 MSample/s
2 channels	2.00 MSample/s
3 channels	1.54 MSample/s
4 channels	1.25 MSample/s
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	10 ns
Output range	±10 V, ±5 V, ±external reference on APFI <0,1>
Output coupling	DC
Output impedance	0.2 Ω
Output current drive	±5 mA
Overdrive protection	±25 V
Overdrive current	26 mA
Power-on state	±5 mV

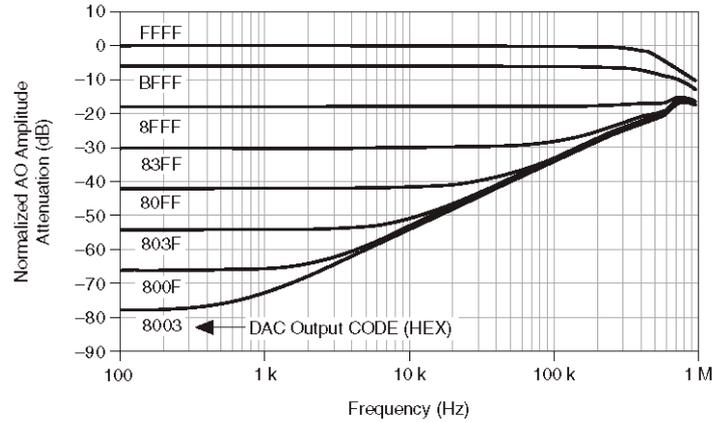
Power-on/off glitch	1.5 V peak for 1.2 s ¹
Output FIFO size	8,191 samples shared among channels used
Data transfers	USB Signal Stream, programmed I/O
AO waveform modes	Non-periodic waveform, periodic waveform regeneration mode from onboard FIFO, periodic waveform regeneration from host buffer including dynamic update
Settling time, full-scale step 15 ppm (1 LSB)	2 μ s
Slew rate	20 V/ μ s
Glitch energy at midscale transition, \pm 10 V range	10 nV \cdot s

External Reference

APFI <0,1> characteristics	
Input impedance	10 k Ω
Coupling	DC
Protection, device on	\pm 30 V
Protection, device off	\pm 15 V
Range	\pm 11 V
Slew rate	20 V/ μ s

¹ Typical behavior. Time period may be longer due to host system USB performance. Time period is longer during firmware updates.

Figure 4. AO <0..3> External Reference Bandwidth



AO Absolute Accuracy (Warranted)

Table 3. AO Absolute Accuracy

Nominal Range Positive Full Scale (V)	Nominal Range Negative Full Scale (V)	Residual Gain Error (ppm of Reading)	Gain Tempco (ppm/°C)	Reference Tempco (ppm/°C)	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	INL Error (ppm of Range)	Absolute Accuracy at Full Scale (µV)
10	-10	63	17	1	33	2	64	1,890
5	-5	70	8	1	33	2	64	935



Note *Absolute Accuracy at Full Scale* numbers are valid immediately following self calibration and assumes the device is operating within 10 °C of the last external calibration.



Note Accuracies listed are valid for up to two years from the device external calibration.

AO Absolute Accuracy Equation

$$\text{AbsoluteAccuracy} = \text{OutputValue} \cdot (\text{GainError}) + \text{Range} \cdot (\text{OffsetError})$$

$$\text{GainError} = \text{ResidualGainError} + \text{GainTempco} \cdot (\text{TempChangeFromLastInternalCal}) + \text{ReferenceTempco} \cdot (\text{TempChangeFromLastExternalCal})$$

$$\text{OffsetError} = \text{ResidualOffsetError} + \text{OffsetTempco} \cdot (\text{TempChangeFromLastInternalCal}) + \text{INLError}$$

Digital I/O/PFI

Static Characteristics

Number of channels	48 total, 32 (P0.<0..31>), 16 (PFI <0..7>/P1, PFI <8..15>/P2)
Ground reference	D GND
Direction control	Each terminal individually programmable as input or output
Pull-down resistor	
Typical	50 k Ω
Minimum	20 k Ω
Input voltage protection	± 20 V on up to two pins



Caution Stresses beyond those listed under the *Input voltage protection* specification may cause permanent damage to the device.

Waveform Characteristics (Port 0 Only)

Terminals used	Port 0 (P0.<0..31>)
Port/sample size	Up to 32 bits
Waveform generation (DO) FIFO	2,047 samples
Waveform acquisition (DI) FIFO	255 samples
DI Sample Clock frequency	0 MHz to 1 MHz, system and bus activity dependent
DO Sample Clock frequency	
Regenerate from FIFO	0 MHz to 10 MHz
Streaming from memory	0 MHz to 1 MHz, system and bus activity dependent
Data transfers	USB Signal Stream, programmed I/O
Digital line filter settings	160 ns, 10.24 μ s, 5.12 ms, disable

PFI/Port1/Port 2 Functionality

Functionality	Static digital input, static digital output, timing input, timing output
Timing output sources	Many AI, AO, counter, DI, DO timing signals
Debounce filter settings	90 ns, 5.12 μ s, 2.56 ms, custom interval, disable; programmable high and low transitions; selectable per input

Recommended Operating Conditions

Input high voltage (V_{IH})	
Minimum	2.2 V
Maximum	5.25 V
Input low voltage (V_{IL})	
Minimum	0 V
Maximum	0.8 V
Output high current (I_{OH})	
P0.<0..31>	-24 mA maximum
PFI <0..15>/P1/P2	-16 mA maximum
Output low current (I_{OL})	
P0.<0..31>	24 mA maximum
PFI <0..15>/P1/P2	16 mA maximum

Digital I/O Characteristics

Positive-going threshold (V_{T+})	2.2 V maximum
Negative-going threshold (V_{T-})	0.8 V minimum
Delta VT hysteresis ($V_{T+} - V_{T-}$)	0.2 V minimum
I_{IL} input low current ($V_{IN} = 0$ V)	-10 μ A maximum
I_{IH} input high current ($V_{IN} = 5$ V)	250 μ A maximum

Figure 5. P0.<0..31>: I_{OH} versus V_{OH}

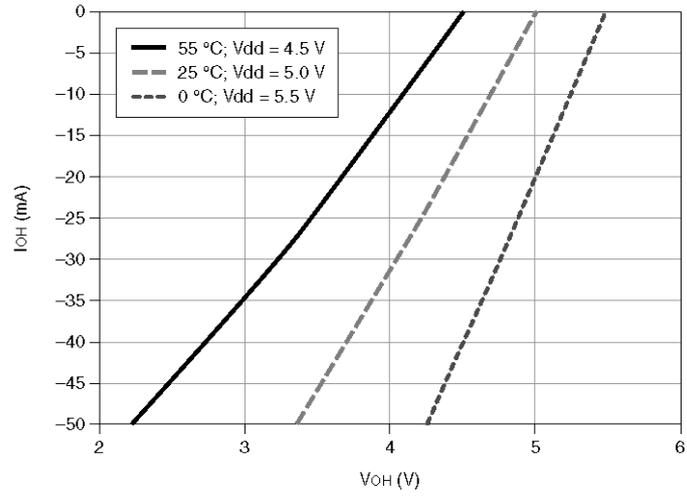


Figure 6. P0.<0..31>: I_{OL} versus V_{OL}

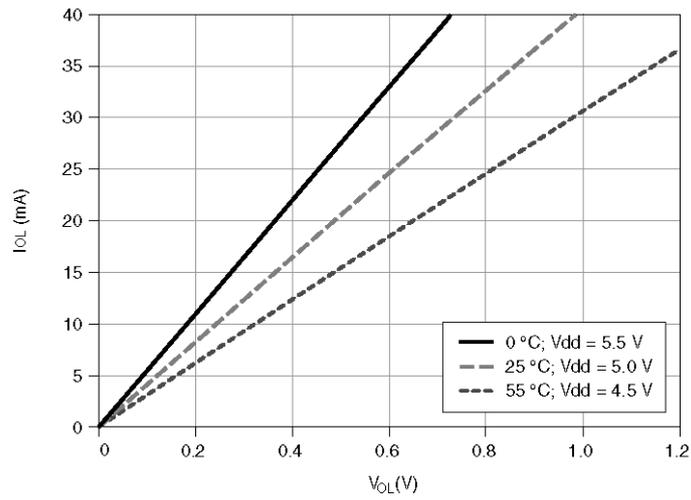


Figure 7. PFI <0..15>/P1/P2: I_{OH} versus V_{OH}

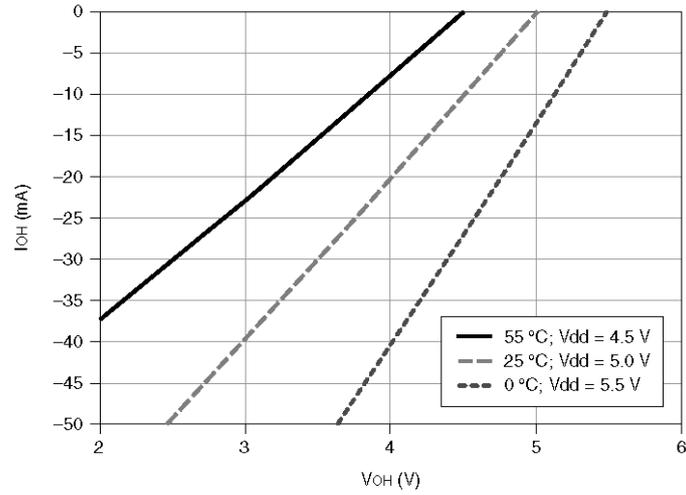
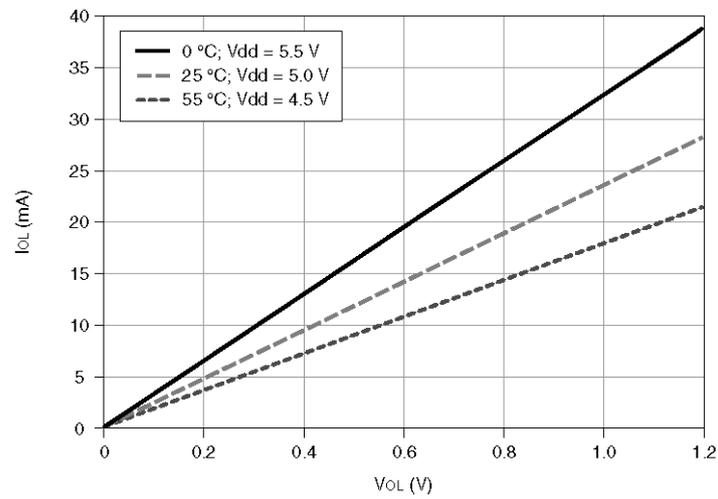


Figure 8. PFI <0..15>/P1/P2: I_{OL} versus V_{OL}



General-Purpose Counters

Number of counter/timers	4
Resolution	32 bits

Counter measurements	Edge counting, pulse, pulse width, semi-period, period, two-edge separation
Position measurements	X1, X2, X4 quadrature encoding with Channel Z reloading; two-pulse encoding
Output applications	Pulse, pulse train with dynamic updates, frequency division, equivalent time sampling
Internal base clocks	100 MHz, 20 MHz, 100 kHz
External base clock frequency	0 MHz to 25 MHz
Base clock accuracy	50 ppm
Inputs	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down, Sample Clock
Routing options for inputs	Any PFI, analog trigger, many internal signals
FIFO	127 samples per counter
Data transfers	USB Signal Stream, programmed I/O

Frequency Generator

Number of channels	1
Base clocks	20 MHz, 10 MHz, 100 kHz
Divisors	1 to 16
Base clock accuracy	50 ppm

Phase-Locked Loop (PLL)

Number of PLLs	1
PFI <0..15> reference clock locking frequency	10 MHz
Output of PLL	100 MHz Timebase; other signals derived from 100 MHz Timebase including 20 MHz and 100 kHz Timebases

External Digital Triggers

Source	Any PFI
Polarity	Software-selectable for most signals

Analog input function	Start Trigger, Reference Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Convert Clock, Sample Clock Timebase
Analog output function	Start Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Sample Clock Timebase
Counter/timer functions	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down, Sample Clock
Digital waveform generation (DO) function	Start Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Sample Clock Timebase
Digital waveform acquisition (DI) function	Start Trigger, Reference Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Sample Clock Timebase

Bus Interface

USB compatibility	USB 2.0 Hi-Speed or full-speed ²
USB Signal Stream	8, can be used for analog input, analog output, digital input, digital output, counter/timer 0, counter/timer 1, counter/timer 2, counter/timer 3

Power Requirements



Caution The protection provided by the device can be impaired if the device is used in a manner not described in the *X Series User Manual*.



Caution The USB device must be powered with an NI offered AC adapter or a National Electric Code (NEC) Class 2 DC source that meets the power requirements for the device and has appropriate safety certification marks for country of use.

Power supply requirements	11 VDC to 30 VDC, 30 W, 2 positions 3.5 mm pitch pluggable screw terminal with screw locks similar to Phoenix Contact MC 1,5/2-STF-3,5 BK
Power input mating connector	Phoenix Contact MC 1,5/2-GF-3,5 BK or equivalent

² Operating on a full-speed bus results in lower performance, and you might not be able to achieve maximum sampling/update rates.

Current Limits



Caution Exceeding the current limits may cause unpredictable device behavior.

+5 V terminal	1 A maximum ³
P0/PFI/P1/P2 and +5 V terminals combined	2 A maximum

Physical Characteristics

Enclosure dimensions (includes connectors)	
BNC	20.3 cm × 18.5 cm × 6.8 cm (8.0 in. × 7.3 in. × 2.7 in.)
Mass termination	18.5 cm × 17.3 cm × 3.6 cm (7.3 in. × 6.8 in. × 1.4 in.)
Screw terminal	26.4 cm × 17.3 cm × 3.6 cm (10.4 in. × 6.8 in. × 1.4 in.)
Weight	
BNC	1.803 kg (3 lb 15 oz)
Mass termination	971 g (2 lb 2.2 oz)
Screw terminal	1.459 kg (3 lb 3.4 oz)
I/O connectors	
BNC	
Device connector	30 BNCs and 60 screw terminals
Screw terminal wiring gauge	0.2047 mm ² to 1.3087 mm ² (16 AWG to 24 AWG)
Mass termination	
Device connector	2 68-Pos Right Angle Single Stack PCB-Mount VHDCI (Receptacle)
Cable connector	68-Pos Offset IDC Cable Connector (Plug) (SHC68-*)

³ Has self-resetting fuse that opens when current exceeds this specification.

Screw terminal

Device connector	128 screw terminals
Screw terminal wiring gauge	0.2047 mm ² to 1.3087 mm ² (16 AWG to 24 AWG)



Note For more information about the connectors used for DAQ devices, refer to the document, *NIDAQ Device Custom Cables, Replacement Connectors, and Screws*, by going to ni.com/info and entering the Info Code rdspsmb.

Calibration

Recommended warm-up time	15 minutes
Calibration interval	2 years

Maximum Working Voltage

Maximum working voltage refers to the signal voltage plus the common-mode voltage.

Channel to earth	11 V, Measurement Category I
------------------	------------------------------

Measurement Category I is for measurements performed on circuits not directly connected to the electrical distribution system referred to as *MAINS* voltage. MAINS is a hazardous live electrical supply system that powers equipment. This category is for measurements of voltages from specially protected secondary circuits. Such voltage measurements include signal levels, special equipment, limited-energy parts of equipment, circuits powered by regulated low-voltage sources, and electronics.



Caution Do not connect the system to signals or use for measurements within Measurement Categories II, III, or IV.



Note Measurement Categories CAT I and CAT O are equivalent. These test and measurement circuits are for other circuits not intended for direct connection to the MAINS building installations of Measurement Categories CAT II, CAT III, or CAT IV.

Environmental

Temperature	
Operating	0 °C to 45 °C
Storage	-40 °C to 70 °C

Humidity

Operating	10% to 90% RH, noncondensing
Storage	5% to 95% RH, noncondensing
Pollution Degree	2
Maximum altitude	2,000 m

Indoor use only.

Environmental Standards

This product meets the requirements of the following environmental standards for electrical equipment.

- IEC 60068-2-1 Cold
- IEC 60068-2-2 Dry heat
- IEC 60068-2-56 Damp heat (steady state)

Safety Compliance Standards

This product is designed to meet the requirements of the following electrical equipment safety standards for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA C22.2 No. 61010-1



Note For UL and other safety certifications, refer to the product label or the [Product Certifications and Declarations](#) section.

Electromagnetic Compatibility Standards

This product meets the requirements of the following EMC standards for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326-1 (IEC 61326-1): Class A emissions; Basic immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions



Note Group 1 equipment (per CISPR 11) is any industrial, scientific, or medical equipment that does not intentionally generate radio frequency energy for the treatment of material or inspection/analysis purposes.



Note In the United States (per FCC 47 CFR), Class A equipment is intended for use in commercial, light-industrial, and heavy-industrial locations. In Europe,

Canada, Australia and New Zealand (per CISPR 11) Class A equipment is intended for use only in heavy-industrial locations.



Notice For EMC declarations and certifications, and additional information, refer to the [Product Certifications and Declarations](#) section.

CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as follows:

- 2014/35/EU; Low-Voltage Directive (safety)
- 2014/30/EU; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)
- 2011/65/EU; Restriction of Hazardous Substances (RoHS)

Product Certifications and Declarations

Refer to the product Declaration of Conformity (DoC) for additional regulatory compliance information. To obtain product certifications and the DoC for NI products, visit ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Environmental Management

NI is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial to the environment and to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *Minimize Our Environmental Impact* web page at ni.com/environment. This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)



EU Customers At the end of the product life cycle, all NI products must be disposed of according to local laws and regulations. For more information about how to recycle NI products in your region, visit ni.com/environment/weee.

电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



中国客户 National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息，请登录 ni.com/environment/rohs_china。(For information about China RoHS compliance, go to ni.com/environment/rohs_china.)

Information is subject to change without notice. Refer to the *NI Trademarks and Logo Guidelines* at ni.com/trademarks for information on NI trademarks. Other product and company names mentioned herein are trademarks or trade names of their respective companies. For patents covering NI products/technology, refer to the appropriate location: **Help»Patents** in your software, the `patents.txt` file on your media, or the *National Instruments Patent Notice* at ni.com/patents. You can find information about end-user license agreements (EULAs) and third-party legal notices in the `readme` file for your NI product. Refer to the *Export Compliance Information* at ni.com/legal/export-compliance for the NI global trade compliance policy and how to obtain relevant HTS codes, ECCNs, and other import/export data. NI MAKES NO EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES AS TO THE ACCURACY OF THE INFORMATION CONTAINED HEREIN AND SHALL NOT BE LIABLE FOR ANY ERRORS. U.S. Government Customers: The data contained in this manual was developed at private expense and is subject to the applicable limited rights and restricted data rights as set forth in FAR 52.227-14, DFAR 252.227-7014, and DFAR 252.227-7015.

© 2018 National Instruments. All rights reserved.

377778A-01 October 23, 2018

Annexe 5 Constat de vérification NI USB 6363



EQF31
6, rue Maryse HILSZ
Futuroplis 2
31500 TOULOUSE
Tél. 04 26 38 51 10 / Fax 05 61 00 54 78

CONSTAT DE VERIFICATION VERIFICATION REPORT

N° 190814-004648

DELIVRE A : INSTITUT RECHERCHE ASTROPHYSIQUE PLANETOLOGIE
DELIVERED TO 9 Avenue du colonel ROCHE
UMR5277 - SOUCHE ECLAIR
31000 TOULOUSE

INSTRUMENT VERIFIE *INSTRUMENT IDENTIFICATION*

Désignation : **CENTRALE D'ACQUISITION**
Designation

Constructeur : NATIONAL INSTRUMENTS
manufacturer

Type : USB-6363
Model

N° de série : 1C0FF39
Serial number

N° d'identification : **1C0FF39**
identification number

CONDITIONS DE VERIFICATION *VERIFICATION CONDITION*

Document de référence / *Specification used*
Spécifications : Constructeur

Procédure interne de vérification / *Procedure followed*
P032

Conditions d'environnement / *Environmental condition*
Température / *Temperature*: 23°C ± 2°C
Humidité / *Humidity*: inférieure à /Lower than 80%HR

Date de vérification / *Date of verification* 29/08/2019
Date d'émission / *Date of issue* 29/08/2019

CONSTAT / STATEMENT

CONFORME
Compliance

NON CONFORME
Not Compliance

CONFORME APRES INTERVENTION
Compliance after repair and/or adjustment

aux spécifications telles que définies dans document de référence / with the specifications such as defined in § specification used

CRITERES DE DECISION : La conformité est prononcée lorsque l'erreur de justesse, est inférieure ou égale à l'écart maximal toléré (EMT) défini par le document de référence.

DECISION CRITERIA : Compliance with specification is marked when the error of accuracy is lower or equal to the maximum error tolerated defined by the reference to.

CONDITION DE VALIDITE / Condition of validity

Ce rapport est valable dans les conditions définies ci-dessus et ci-dessous.
This report is valid under the condition mentioned above and below.

CONDITION PARTICULIERE / Particular condition

Le jugement est établi suivant les résultats des relevés de mesure des pages suivantes.
The statement is established with the attached measurement results.

RENSEIGNEMENTS COMPLEMENTAIRES / Further information

R.A.S

LE RESPONSABLE DU LABORATOIRE
The head of the laboratory

G. BLOT
Signé numériquement par :
Gregory BLOT
Nom DN : CN = Gregory
BLOT C = FR O = EQF31 OU
= 0002 822182226
Date : 2019.08.29 16:38:58 +
0100
Méf. J'approuve ce
document.

Ce rapport comprend 5 pages.
This report includes 5 pages.

LA REPRODUCTION DE CE RAPPORT DE VERIFICATION N'EST AUTORISEE QUE SOUS FORME DE FAGSIMILE PHOTOGRAPHIQUE INTEGRAL
This report may not be reproduced other than in full by photographic process

CEELO005(1.0)



(IN THE EVENT OF ANY DOUBT ARISING, THE ORIGINAL DOCUMENT IN FRENCH APPLIES)

Durée de stabilisation: L'appareil à vérifier est entreposé dans la salle d'étalonnage au minimum 12 heures avant le début des mesures.
Time of stabilization
Before the verification, the instrument stays in the laboratory at least half day.

1. TRACABILITE / Traceability

Les procédures suivies pour cette vérification sont consultables, sur demande, uniquement au sein des locaux d'EQF31 (voir page de garde).

The procedure followed for this verification are available for consultation, on request, only in EQF31 (see first page).

2. ETALONS / Standard

Le(s) étalon(s) assure(nt) le lien aux étalons nationaux.

The standards calibration ensuring the traceability to national standard.

Etalon(s) utilisé(s) / Standard(s) Used

MULTIMETRE, HEWLETT PACKARD34401A n° série US36080260, identifié(e) ETT/EL-053, Étaloné(e) en janvier 2019, certificat n° 002331 (EQF 31)

CALIBRATEUR MULTIFONCTIONS, FLUKE 5522A n° série 2398903, identifié(e) ETT/EL-063, Étaloné(e) en septembre 2018, certificat n° 105091 (RHONE ALPES QUALITE)

ANALYSEUR DE SPECTRE, ROHDE & SCHWARZ FSU46 n° série 100986, identifié(e) ETT/HF-005, Étaloné(e) en octobre 2018, certificat n° 0001-300481975 (ROHDE & SCHWARZ)

Le responsable de la vérification

Person responsible for the verification

Agnès MARRE

3. INCERTITUDES / Uncertainty

Les incertitudes élargies mentionnées sont celles correspondant à deux fois l'incertitude-type composée.

Les incertitudes-types ont été calculées en tenant compte des différentes composantes d'incertitudes, étalons de référence, moyens d'étalonnage, conditions d'environnement, contribution de l'instrument étalonné, répétabilité...

The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor k=2.

Standard uncertainty were calculated with different factors like reference standards, environmental conditions, contribution of the calibrated instrument, repeatability...

Remarques pour les appareils avec affichage / Comments for the instrument with display

Les valeurs étalons, les écarts calculés ainsi que les incertitudes d'étalonnage ont été arrondis en tenant compte de la résolution de l'appareil à vérifier.

Compte tenu de cet arrondissement, il peut exister une différence entre l'écart mentionné et l'écart que l'on pourrait calculer entre la valeur étalon et la valeur donnée par l'appareil à vérifier. Cette différence sera au maximum égale à un pas de quantification de la résolution de l'appareil à vérifier.

The standard value, the deviation and the measurement uncertainty are rounded from the resolution of the verified instrument. It may exist a difference between the mentioned deviation and the calculated deviation with the standard value and the measurement result. This difference is lower than or equal to the instrument resolution.

VERIFICATION DES ENTREES ANALOGIQUES

Voie	Etendue de mesure	Tension étalon appliquée	Valeur lue sur l'appareil à étalonner	Ecart	Ecart maximum toléré	Incertitude d'étalonnage	Statut	
		[1]	[2]	[2]-[1]				
	V	V	V	V	V	V		
ai0	-0,1 à 0,1	0,099800	0,099799	-0,000001	± 0,000033	± 0,000002	PASS	
		0,000000	0,000000	0,000000	± 0,000020	± 0,000001	PASS	
		-0,099800	-0,099798	0,000002	± 0,000033	± 0,000002	PASS	
	-0,2 à 0,2	0,199600	0,199602	0,000002	± 0,000053	± 0,000003	PASS	
		0,000000	0,000000	0,000000	± 0,000029	± 0,000001	PASS	
		-0,199600	-0,199598	0,000002	± 0,000053	± 0,000003	PASS	
	-0,5 à 0,5	0,499000	0,499002	0,000002	± 0,000102	± 0,000005	PASS	
		0,000000	0,000003	0,000003	± 0,000056	± 0,000001	PASS	
		-0,499000	-0,498995	0,000005	± 0,000102	± 0,000005	PASS	
	-1 à 1	0,998000	0,998007	0,000007	± 0,000193	± 0,000008	PASS	
		0,000000	0,000003	0,000003	± 0,000105	± 0,000001	PASS	
		-0,998000	-0,997993	0,000007	± 0,000193	± 0,000008	PASS	
	-2 à 2	1,996000	1,996008	0,000008	± 0,000352	± 0,000015	PASS	
		0,000000	0,000010	0,000010	± 0,000196	± 0,000001	PASS	
		-1,996000	-1,995995	0,000005	± 0,000352	± 0,000015	PASS	
	-5 à 5	4,990000	4,989999	-0,000001	± 0,000864	± 0,000038	PASS	
		0,000000	0,000031	0,000031	± 0,000475	± 0,000001	PASS	
		-4,990000	-4,989958	0,000042	± 0,000864	± 0,000038	PASS	
	-10 à 10	9,980000	9,980031	0,000031	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
		0,000000	0,000070	0,000070	± 0,000949	± 0,000001	PASS	
		-9,980000	-9,979900	0,000100	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
	ai1	-10 à 10	9,980000	9,980009	0,000009	± 0,001658	± 0,000072	PASS
			0,000000	0,000080	0,000080	± 0,000949	± 0,000001	PASS
			-9,980000	-9,979905	0,000095	± 0,001658	± 0,000072	PASS
ai2	9,980000		9,979991	-0,000009	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
	0,000000		0,000057	0,000057	± 0,000949	± 0,000001	PASS	
ai3	-9,980000		-9,979916	0,000084	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
	9,980000		9,980026	0,000026	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
ai4	0,000000		0,000070	0,000070	± 0,000949	± 0,000001	PASS	
	-9,980000		-9,979907	0,000093	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
ai5	9,980000		9,980023	0,000023	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
	0,000000		0,000064	0,000064	± 0,000949	± 0,000001	PASS	
ai6	-9,980000		-9,979894	0,000106	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
	9,980000		9,980041	0,000041	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
ai7	0,000000		0,000070	0,000070	± 0,000949	± 0,000001	PASS	
	-9,980000		-9,979926	0,000074	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
	9,980000		9,980078	0,000078	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
	0,000000		0,000069	0,000069	± 0,000949	± 0,000001	PASS	
	-9,980000		-9,979948	0,000052	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
	9,980000		9,980083	0,000083	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
	0,000000		0,000064	0,000064	± 0,000949	± 0,000001	PASS	
	-9,980000		-9,979983	0,000017	± 0,001658	± 0,000072	PASS	

VERIFICATION DES ENTREES ANALOGIQUES (SUITE)

Voie	Etendue de mesure	Tension étalon appliquée	Valeur lue sur l'appareil à étalonner	Ecart	Ecart maximum toléré	Incertitude d'étalonnage	Statut
		[1]	[2]	[2]-[1]			
	V	V	V	V	V	V	
ai16	-10 à 10	9,980000	9,980020	0,000020	± 0,001658	± 0,000072	PASS
		0,000000	0,000057	0,000057	± 0,000949	± 0,000001	PASS
		-9,980000	-9,979975	0,000025	± 0,001658	± 0,000072	PASS
ai17		9,980000	9,980044	0,000044	± 0,001658	± 0,000072	PASS
		0,000000	0,000068	0,000068	± 0,000949	± 0,000001	PASS
		-9,980000	-9,979918	0,000082	± 0,001658	± 0,000072	PASS
ai18		9,980000	9,980015	0,000015	± 0,001658	± 0,000072	PASS
		0,000000	0,000064	0,000064	± 0,000949	± 0,000001	PASS
		-9,980000	-9,979905	0,000095	± 0,001658	± 0,000072	PASS
ai19		9,980000	9,980015	0,000015	± 0,001658	± 0,000072	PASS
		0,000000	0,000064	0,000064	± 0,000949	± 0,000001	PASS
		-9,980000	-9,979905	0,000095	± 0,001658	± 0,000072	PASS
ai20		9,980000	9,980053	0,000053	± 0,001658	± 0,000072	PASS
		0,000000	0,000072	0,000072	± 0,000949	± 0,000001	PASS
		-9,980000	-9,979973	0,000027	± 0,001658	± 0,000072	PASS
ai21		9,980000	9,980039	0,000039	± 0,001658	± 0,000072	PASS
		0,000000	0,000070	0,000070	± 0,000949	± 0,000001	PASS
		-9,980000	-9,979939	0,000061	± 0,001658	± 0,000072	PASS
ai22	9,980000	9,979983	-0,000017	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
	0,000000	0,000053	0,000053	± 0,000949	± 0,000001	PASS	
	-9,980000	-9,979968	0,000032	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
ai23	9,980000	9,980062	0,000062	± 0,001658	± 0,000072	PASS	
	0,000000	0,000076	0,000076	± 0,000949	± 0,000001	PASS	
	-9,980000	-9,979962	0,000038	± 0,001658	± 0,000072	PASS	

VERIFICATION DES SORTIES ANALOGIQUES

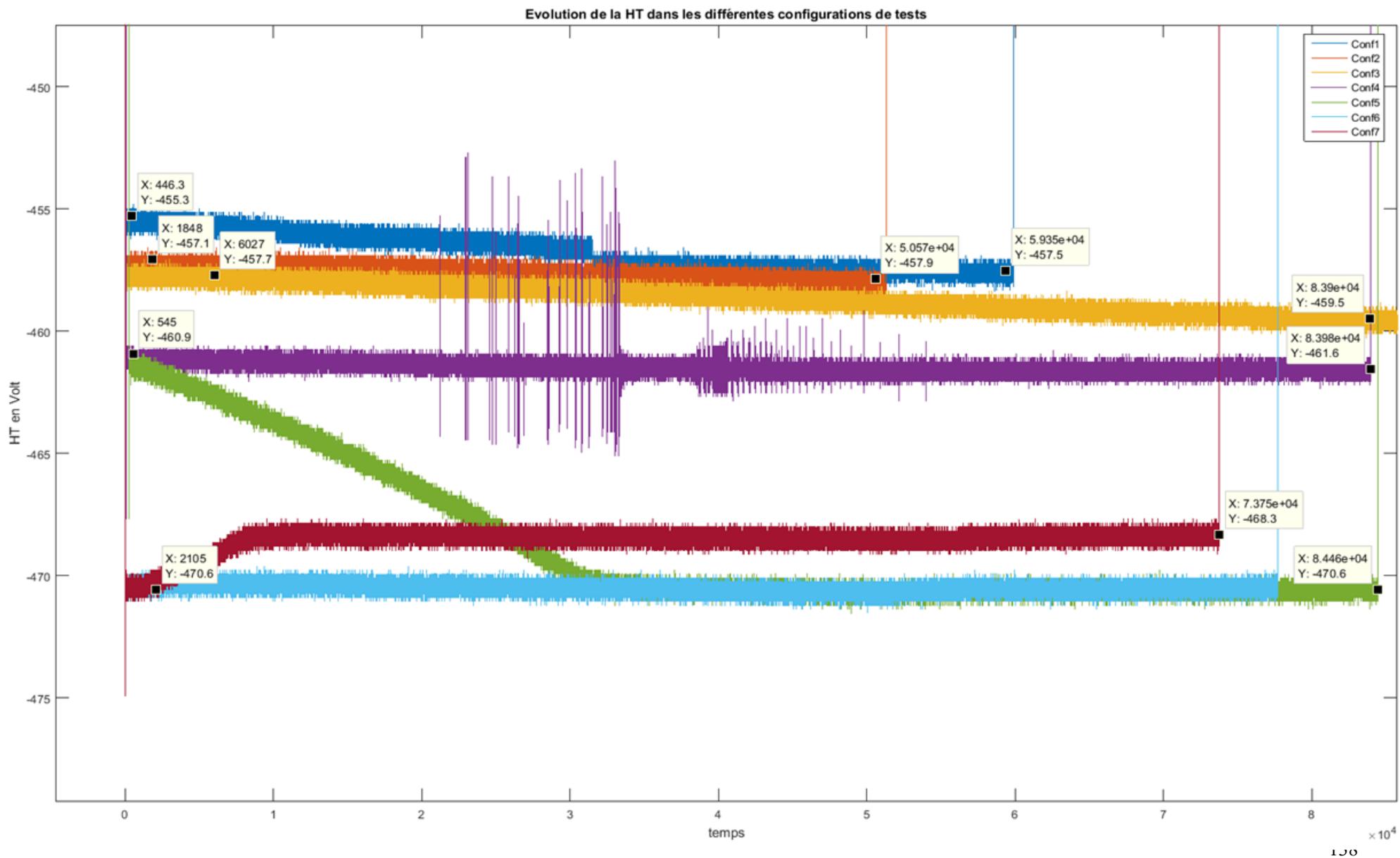
Voie	Etendue de mesure	Tension étalon appliquée	Valeur lue sur l'appareil à étalonner	Ecart	Ecart maximum toléré	Incertitude d'étalonnage	Statut
		[1]	[2]	[2]-[1]			
		V	V	V			
AO0	-5 à 5	4,99000	4,98985	-0,00015	± 0,00093	± 0,00045	PASS
		0,00000	0,00005	0,00005	± 0,00050	± 0,00002	PASS
		-4,99000	-4,98990	0,00010	± 0,00093	± 0,00045	PASS
	-10 à 10	9,98000	9,97977	-0,00023	± 0,00189	± 0,00080	PASS
		0,00000	-0,00009	-0,00009	± 0,00099	± 0,00011	PASS
		-9,98000	-9,97992	0,00008	± 0,00093	± 0,00080	PASS
AO1	-5 à 5	4,99000	4,98991	-0,00009	± 0,00093	± 0,00045	PASS
		0,00000	-0,00010	-0,00010	± 0,00050	± 0,00002	PASS
		-4,99000	-4,98996	0,00004	± 0,00093	± 0,00045	PASS
	-10 à 10	9,98000	9,97977	-0,00023	± 0,00189	± 0,00080	PASS
		0,00000	0,00006	0,00006	± 0,00099	± 0,00011	PASS
		-9,98000	-9,97964	0,00036	± 0,00093	± 0,00080	PASS
AO2	-5 à 5	4,99000	4,98989	-0,00011	± 0,00093	± 0,00045	PASS
		0,00000	0,00004	0,00004	± 0,00050	± 0,00002	PASS
		-4,99000	-4,98994	0,00006	± 0,00093	± 0,00045	PASS
	-10 à 10	9,98000	9,97966	-0,00034	± 0,00189	± 0,00080	PASS
		0,00000	-0,00015	-0,00015	± 0,00099	± 0,00011	PASS
		-9,98000	-9,97988	0,00012	± 0,00093	± 0,00080	PASS
AO3	-5 à 5	4,99000	4,98983	-0,00017	± 0,00093	± 0,00045	PASS
		0,00000	0,00000	0,00000	± 0,00050	± 0,00002	PASS
		-4,99000	-4,98996	0,00004	± 0,00093	± 0,00045	PASS
	-10 à 10	9,98000	9,97989	-0,00011	± 0,00189	± 0,00080	PASS
		0,00000	0,00000	0,00000	± 0,00099	± 0,00011	PASS
		-9,98000	-9,97983	0,00017	± 0,00093	± 0,00080	PASS

VERIFICATION DE LA SORTIE COMPTEUR

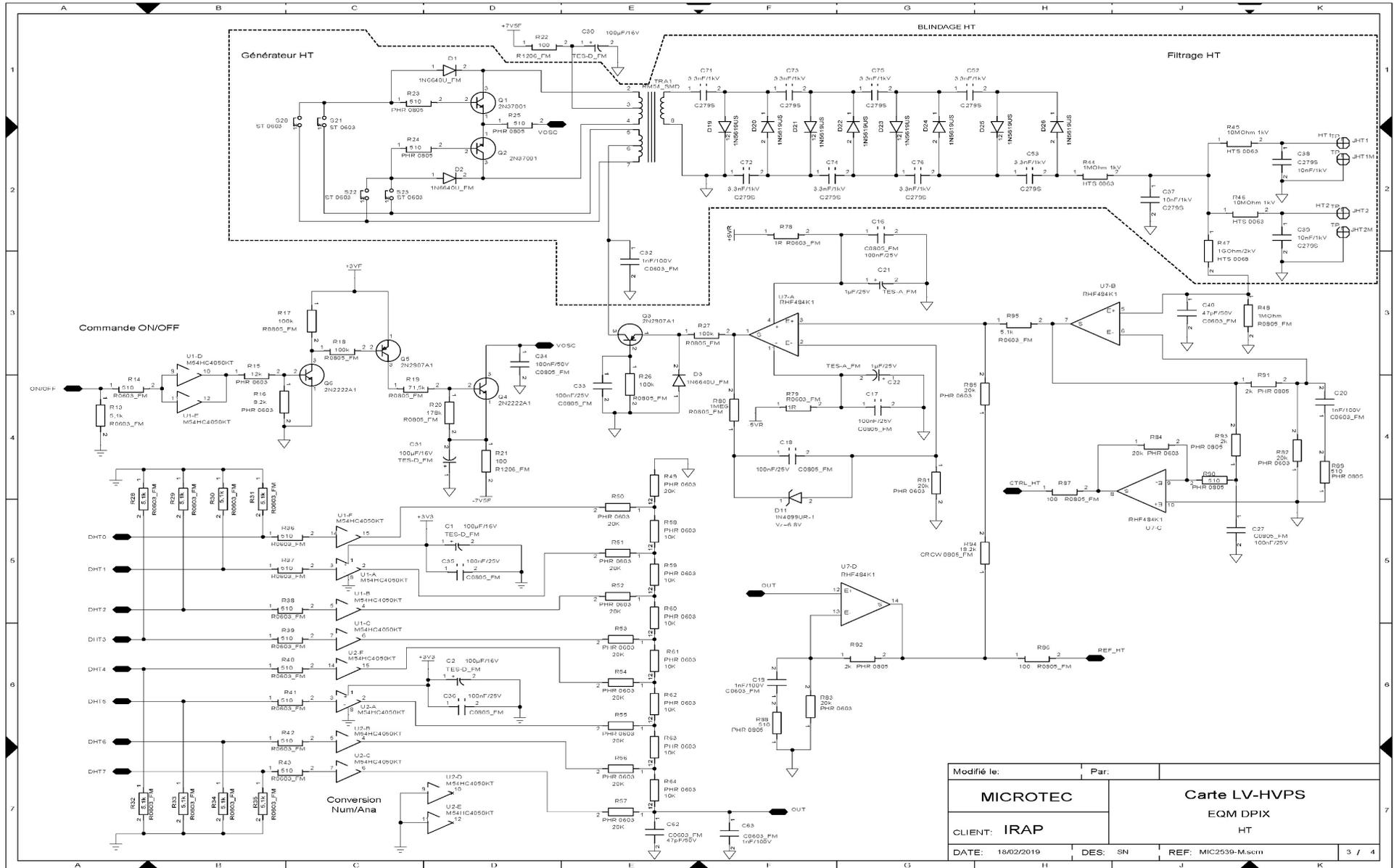
Voie	Valeur programmée et affichée sur l'appareil à étalonner	Valeur lue sur le fréquencemètre étalon	Ecart	Ecart maximum toléré	Incertitude	Statut
	[2]	[1]	[2]-[1]			
		MHz	Hz	Hz	Hz	
Ctrl0	5,000000	4,999983	17	250	51	PASS

Fin du constat de vérification
 End of report

Annexe 6 Evolution de la haute tension en fonction du temps

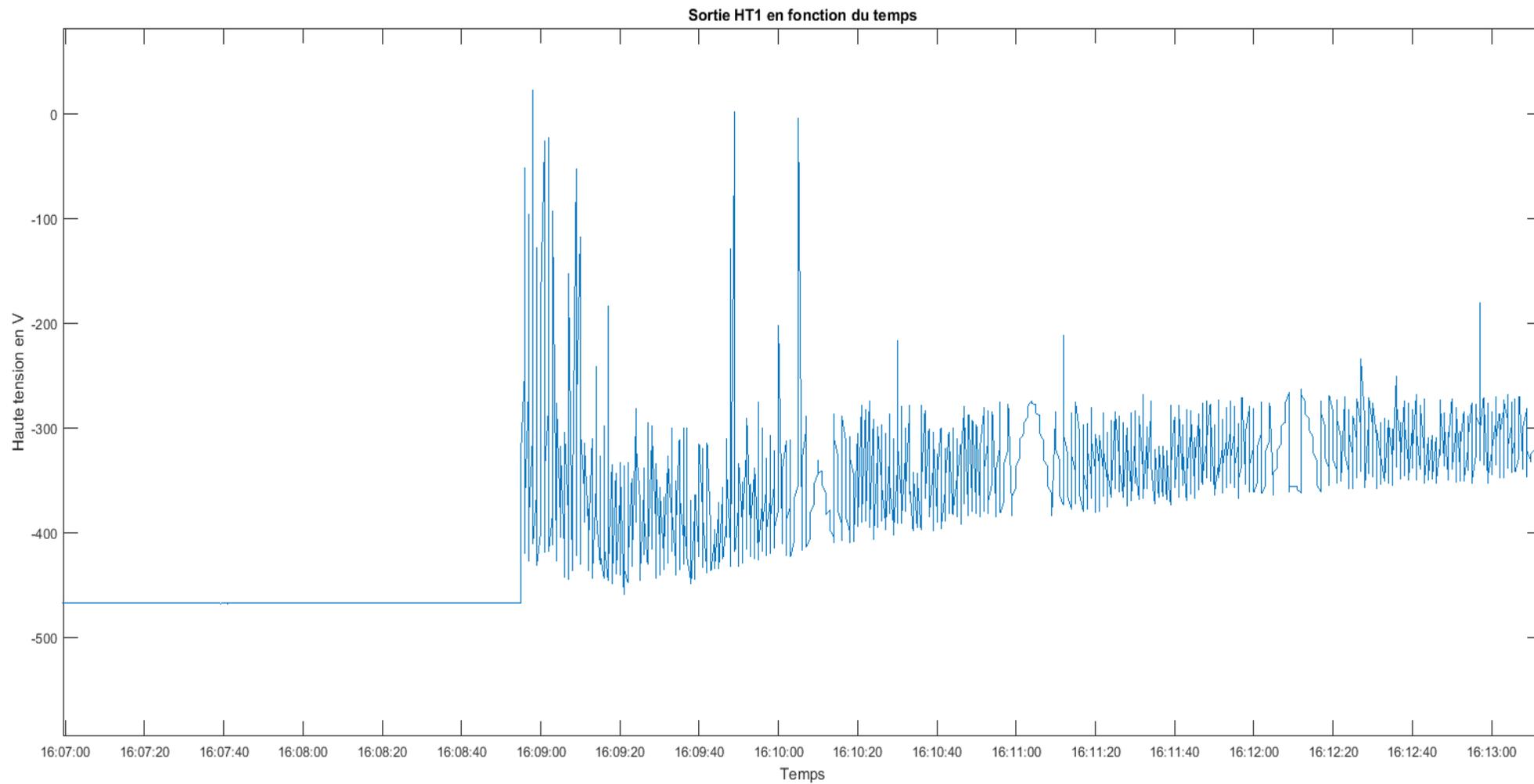


Annexe 7 Schématique de génération de la haute tension

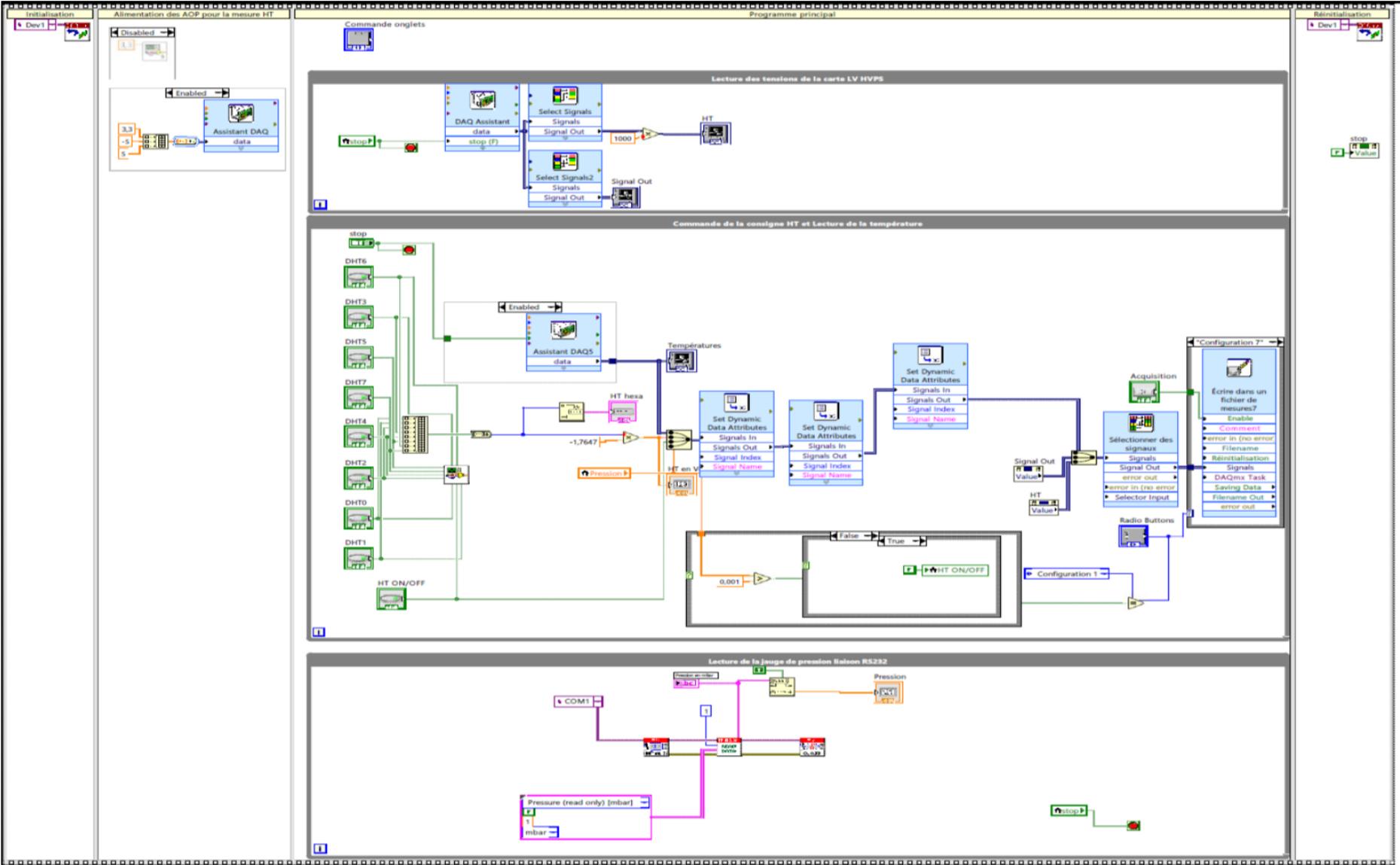


Modifié le:	Par:	
MICROTEC		Carte LV-HVPS
CLIENT: IRAP		EQM DPIX
DATE: 18/02/2019		HT
DES: SN	REF: MIC2539-M.scm	3 / 4

Annexe 8 Dégazage du potting HT1



Annexe 9 Exemple du diagramme Labview pour la carte LV-HVPS



Liste des figures

Figure I-1 Vue d'artiste du satellite Planck.....	15
Figure I-2 Instrument SuperCAM.....	15
Figure I-3 Vue d'artiste du satellite Solar Orbiter.....	15
Figure I-4 Organigramme fonctionnel de l'IRAP	17
Figure I-5 Vue d'artiste du satellite SVOM	19
Figure I-6 Représentation des instruments du satellite SVOM ainsi que les moyens sol.....	21
Figure I-7 Représentation schématique du télescope ECLAIRs,.....	25
Figure I-8 Architecture ECLAIRs	25
Figure I-9 Principe de l'imagerie à masque codé	26
Figure I-10 Vue éclatée en 3D du DPIX.....	27
Figure I-11 Vue éclatée en 3D d'un module XRDPIX, en haut à gauche une vue de dessous et en bas à gauche une vue de dessus, de l'XRDPIX assemblé.....	29
Figure I-12 Phénomène d'absorption dans un semi-conducteur.....	30
Figure I-13 Corrélation entre l'énergie de création de paires $E!$ et la largeur de la bande interdite E_g pour différents matériaux semi-conducteurs. D'après les spécifications techniques des détecteurs CdTe $E_g = 1,44\text{eV}$ et $E! = 4,43\text{eV}$ [4]......	31
Figure I-14 Fonctionnement des détecteurs CdTe d'ECLAIRs.....	32
Figure I-15 Évolution temporelle de l'impulsion de courant induite par le transit de chaque type de porteur sous l'effet du champ électrique.....	33
Figure I-16 Représentation schématique de l'ASIC IDef-X.....	34
Figure I-17 Fonctionnement de l'ASIC IDef-X.....	35
Figure I-18 Photos des ELS prototypes	37
Figure I-19 Méthodologie de développement.....	38

Figure I-20 Protocole de validation des cartes électroniques	39
Figure II-1 Synoptique de la carte LV/HVPS.....	46
Figure II-2 synoptique de la carte MUX ADC	47
Figure II-3 Synoptique du banc de tests	48
Figure II-4Exemple de diagramme 5M.....	51
Figure II-5 Incertitude de mesure	52
Figure II-6 Tolérance	52
Figure II-7 Incertitude et tolérance	53
Figure II-8 Boitier USB NI 6363	55
Figure II-9 Exemple de programme Labview.....	58
Figure II-10 Module NI 9217	59
Figure II-11 Exemples de passages Plugin.....	60
Figure II-12 Synoptique de l'enceinte vide thermique.....	60
Figure II-13 Synoptique du banc de tests	61
Figure II-14 Synoptique d'acquisition d'un signal analogique du NI USB 6363.....	62
Figure II-15 Montage électrique représentant une source connectée à une charge	64
Figure II-16 Pont diviseur de tension	66
Figure II-17 Montage suiveur	66
Figure II-18 Synoptique baie de tests de caractérisation	67
Figure II-20 IHM « Face avant » du programme permettant de surveiller l'environnement de test	70
Figure II-21 allure de la courbe de Pashen	71
Figure II-22 IHM « Face avant » du programme permettant de surveiller l'évolution des tensions générees par la carte	72

Figure II-23 Onglet du programme permettant de surveiller l'environnement de test.....	73
Figure II-24 Onglet permettant de lancer les tests automatiques en fonction de la configuration de l'environnement	74
Figure III-1 Saturation haute de la chaine de gain de la carte MUX-ADC	82
Figure III-2 Saturation haute de la chaine de gain pour la configuration 4	83
Figure III-3 Saturation basse de la chaine de gain de la carte MUX-ADC	83
Figure III-4 Différence du nombre de canaux entre la conf 4 et la conf 6	85
Figure III-5 synoptique de l'asservissement de la haute tension.....	89
Figure III-6 Variation de CTRL HT et REF HT en fonction de la température.....	90
Figure III-7 retour de la HT et génération du signal CTRL HT	92
Figure III-8 Courant de fuite en entrée de l'AOP.....	93
Figure III-9 Haute tension en fonction du temps pour la configuration 4 à 50°C	94
Figure III-10 Inspection à la binoculaire du potting HT	95

Liste des tableaux

Tableau 1 répartition des personnels de l'IRAP.....	16
Tableau 2 Domaines d'observation de chaque instrument du satellite.....	22
Tableau 3 tableau extrait du document « <i>design and justifications of the DPIX sub-system</i> »	44
Tableau 4 Tableau des incertitudes extrait de la datasheet de l'instrument USB6363	55
Tableau 5 Spécification de l'AOIP 8310 extraite de la datasheet.....	57
Tableau 6 Configurations de l'environnement de test.....	69
Tableau 7 Valeurs minimales et maximales de la sortie de l'ADC	84
Tableau 8 Equations des courbes de sortie de l'ADC.....	86
Tableau 9 Analyse statistique des basses tensions.....	88
Tableau 10 Évolution de CTRL HT	91

Conception, développement et analyse d'essais de caractérisation en environnement spatial des cartes électroniques de l'instrument ECLAIRs

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Toulouse 2019

RESUME

Pour garantir une fiabilité technique de l'instrument ECLAIRs embarqué sur le satellite SVOM, différents essais sont menés tout au long de son développement pour vérifier les fonctionnalités et la conformité des différents sous système qui le compose.

La caractérisation en environnement spatial est une étape importante, elle permettra d'observer, d'analyser et de valider le comportement des électroniques dans les conditions d'utilisation finales. Pour cela il faut concevoir et développer un banc de tests pour simuler l'environnement et étudier les fonctionnalités importantes.

L'étude des résultats a permis de caractériser le comportement des électroniques en fonction de la température, d'améliorer le procédé de fabrication des cartes électroniques et de détecter une anomalie permettant de modifier l'architecture finale des cartes.

Mots clés : Essais, Electronique, Banc de tests, Analyse, Conception, Spatial

SUMMARY

To ensure the technical reliability of the ECLAIRs instrument on the SVOM satellite, various tests are carried out throughout its development to verify the functionalities and compliance of the various subsystems that compose it.

The characterization in space environment is an important step, it will observe, analyze and validate the behavior of electronics in the end use conditions. For that, it is necessary to design and develop a test bench to simulate the environment and study the important functionalities.

The study of the results made it possible to characterize the behavior of the electronics as a function of the temperature, to improve the manufacturing process of the electronic boards and to detect an anomaly allowing to modify the final architecture of the boards.

Key words : testbench, electronic, test, analyse, Space, Design