



leti

Direction de la recherche technologique
Département Systèmes et Intégration Système

N° Chrono : DRT-LETI-DSYS-SSCE-LAIC-26-06-001376

SPECIFICATIONS TECHNIQUES

Objet : Qualification et support de logiciel embarqué en C/C++ pour plateformes Zynq

Date : 15/06/2026

Affaire suivie par : Sébastien Boisseau

Nom	Fonction	Entité	Date	Visa
Auteur(s)				
S. BOISSEAU	Chef de laboratoire	DSYS/SSCE/LAIC	BOISSEAU, Sébastien Signé numériquement Le 15/06/2026	
Vérificateurs				
M.MIELET	Ingénieur Sécurité	DSYS/DIR	MIELET, Magali Signé numériquement Le 15/06/2026	
J. KEIGNART	ASSI	DSYS/DIR	KEIGNART, Julien Signé numériquement Le 16/06/2026	
Approbateur				
M. PLISSONNIER	Chef de Service	DSYS/SSCE	PLISSONNIER, Marc Signé numériquement Le 17/06/2026	
F. CLERMIDY	Chef de Département	DSYS/DIR	CLERMIDY, Fabien Signé numériquement Le 17/06/2026	

Diffusion :

Prestataires





- ☒ Le présent cahier des charges ne contient aucune information de niveau « Diffusion Restreinte » ou « classifiées » ou relevant de la protection du potentiel scientifique et technique de la nation, ce qui permet la mise en ligne de ce document sur la plate-forme dématérialisée du CEA
- ☐ Le présent cahier des charges contient des informations Diffusion Restreinte (DR) ou relevant de la Protection du Potentiel Scientifique et Technique de la Nation de ce fait la mise en ligne sur la plateforme dématérialisée du CEA de ce document est possible via un conteneur chiffré ZED !
- ☐ Le présent cahier des charges contient des informations classifiées, de ce fait la mise en ligne sur la plate-forme dématérialisée du CEA de ce document est strictement interdite.

1 Objet

Le présent cahier des charges porte sur la qualification de fonctions embarquées sur plateformes Zynq, ainsi que sur le développement de fonctionnalités complémentaires en C/C++.

Il intervient dans le cadre du développement d'un instrument scientifique pour de la mesure de champ magnétique terrestre et destiné à être embarqué dans un satellite. L'objectif est de qualifier les briques logicielles embarquées en C/C++ permettant de contrôler les fonctions intégrées dans la logique programmable d'un FPGA. La prestation s'effectuera sur site ou en partie sur site, pour le compte du CEA, et pour une durée estimative de 8 mois, dont 4 mois fermes et 4 mois optionnels.

Description de l'unité :

Le Laboratoire Autonomie et Intégration de Capteurs (LAIC) du CEA LETI a pour principales missions le développement de systèmes de capteurs, et en particulier de capteurs quantiques pour des applications de mesures hautes précisions de champs magnétiques. Les activités de l'équipe sont à l'interface du hardware (électronique, optronique, semi-conducteurs), du software (intelligence artificielle, traitement du signal) et du Système (architecture électronique, mécatronique, modélisations multiphysiques).

Le projet Swarm (<https://swarm.cnes.fr/fr/>) qui a permis de mettre en orbite en 2013 nos capteurs quantiques pour la mesure du champ magnétique terrestre fait partie de nos track records, et un nouveau programme aux objectifs similaires démarre



cette année (projet NanoMagSat : <https://www.leti-cea.fr/cea-tech/leti/Pages/actualites/News/nanomagsat.aspx>).

Contexte :

Afin d'accompagner nos développements autour des capteurs magnétiques à Hélium 4, nous recherchons un prestataire avec des connaissances en développement logiciel, en hardware, en traitement du signal et en métrologie autour des technologies quantiques pour qualifier du code embarqué en C/C++ à embarquer sur des plateformes Zynq, et pour une durée estimative de 8 mois.

Les prestations à réaliser comprendront les tâches suivantes :

- Développer de nouvelles briques permettant la surveillance de l'instrument de mesure en C++ embarqué
- Porter le logiciel embarqué sur de nouvelles plateformes DPU-EQM, DPU-FM en maintenant la compatibilité avec la plateforme EDU.
- Mettre en œuvre les flots pour obtenir des métriques sur la base de code existante (taux de couverture, analyse statique de code, ...)
- Etendre la base de test unitaires écrites en Python.
- Améliorer et maintenir l'infrastructure de tests et de validation (Hardware in the Loop).
- Fournir un support à l'équipe de métrologie lors des différentes campagnes de test mettant en œuvre l'instrument
- Compléter la rédaction des documents de conception

2 Définition de la prestation

2.1 Description détaillée des tâches

La prestation est composée de 3 missions complémentaires et 8 tâches décrites ci-dessous :

Mission 1 : Développement de briques logicielles de surveillance et portage sur plateformes DPU [tranche ferme]

L'instrument est composé de deux capteurs magnétiques à hélium 4 : Miniature Absolute Magnetometer (MAM) et High Frequency Magnetometer (HFM). Ils s'appuient sur une électronique de pilotage faisant intervenir des fonctions de filtrage, de démodulation, de boucles d'asservissement et de gestion de look-up tables. Ces fonctions ont été écrites en Python et doivent être transposées en C/C++ pour être embarquées sur des plateformes Zynq qui piloteront le capteur dans le satellite. Il

s'agira également de réaliser le test unitaire des fonctions et de rédiger la documentation associée.

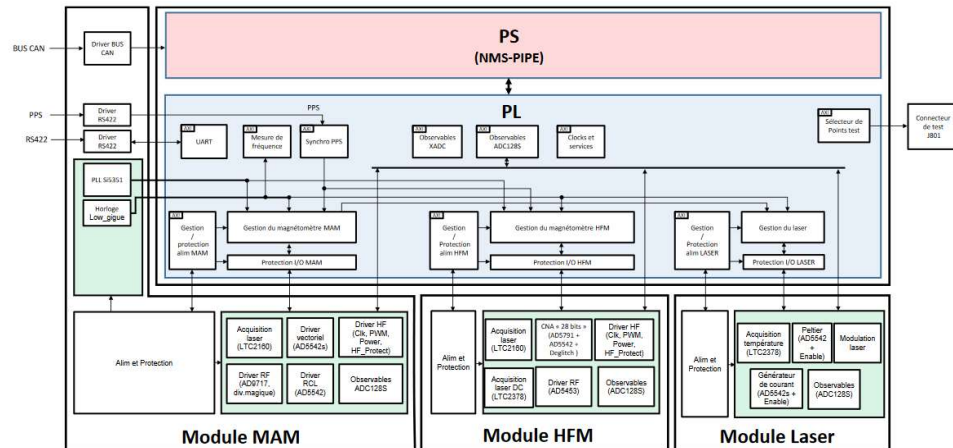


Figure 1: Synoptique général de l'instrument NMS.

Lors d'une précédente prestation, des briques logicielles ont été développées pour le contrôle du MAM et du HFM.

De nouvelles briques logicielles sont à réaliser pour permettre la surveillance du système. Les fonctions à réaliser sont les suivantes :

Tâche 1.1 : Ajout de fonction de surveillances

L'objectif est de surveiller les alimentations des modules hardware. Cette brique doit pouvoir être testée en injectant des fautes à travers les registres hardware d'interface.

Par ailleurs, de nombreux observables doivent être monitorés par une tâche de surveillance pour déterminer l'état de l'instrument. En cas de problèmes, l'instrument doit pouvoir de manière autonome se replier en défaut dans un état garantissant son intégrité.

Lors d'une précédente mission, il a été développé une mise à jour les LUT de pilotage du Rotateur de Polarisation en fonction de la T°. D'autres paramètres doivent également être recalculés en fonction de la T°. Plusieurs tâches de surveillance devront être développées et testées dans le cadre existant.

Le MAM et le HFM sont capables de produire une information vectorielle qui est utilisée dans les asservissements. Une brique logicielle doit permettre de changer de source d'information et monitorer la qualité d'information en temps réel.

La tâche 1.1 consiste à transposer des fonctions Python en C/C++ pour une implémentation sur la plateforme Zynq, suivie de tests unitaires. Elle inclut l'analyse



du code Python, la réécriture des fonctions en C/C++, le maintien de l'intégrité fonctionnelle et de la logique des algorithmes, et la gestion des dépendances. L'implémentation implique la configuration de la plateforme Zynq et l'optimisation des fonctions transposées. Des scénarios de test seront développés et exécutés pour valider le bon fonctionnement des fonctions réécrites en C/C++ et implémentées sur la plateforme.

<i>Fonction 1 : Ajout de surveillances</i>
<i>L'objectif est de surveiller les alimentations des modules hardware. Cette brique doit pouvoir être testée en injectant des fautes à travers les registres hardware d'interface. Par ailleurs, de nombreux observables doivent être monitorés par une tâche de surveillance pour déterminer l'état de l'instrument. En cas de problèmes, l'instrument doit pouvoir de manière autonome se replier en défaut dans un état garantissant son intégrité.</i>
<i>Fonction 2 : Surveillance de la température</i>
<i>Lors d'une précédente mission, il a été développé une mise à jour les LUT de pilotage du Rotateur de Polarisation en fonction de la T°. D'autres paramètres doivent également être recalculés en fonction de la T°. Plusieurs tâches de surveillances devront être développées et testées dans le cadre existant.</i>
<i>Fonction 3 : Surveillance des informations vectorielles</i>
<i>Le MAM et le HFM sont capables de produire une information vectorielle qui est utilisée dans les asservissements. Une brique logicielle doit permettre de changer de source d'information et monitorer la qualité d'information en temps réel.</i>

Livrable L1.1.1 : Code embarqué Fonction 1 et tests unitaires associés

Livrable L1.1.2 : Code embarqué Fonction 2 et tests unitaires associés

Livrable L1.1.3 : Code embarqué Fonction 3 et tests unitaires associés

Tâche 1.2 : Portage sur plateforme DPU

Le logiciel embaqué initialement développé sur la plateforme EDU devra être porté sur les plateformes DPU EQM et FM. Ces plateformes reposent sur la même architecture matérielle. Les modifications concernent des changements de composants. Au niveau logiciel les modifications concernent essentiellement des changements sur la récupération des observables du système. La difficulté de cette tâche est de maintenir un seul code pour toutes les plateformes en évitant du code mort préjudiciable à la qualification.

Livrable L1.2.1 : Portage sur la plateforme DPU-EQM

Livrable L1.2.2 : Portage sur la plateforme DPU-FM



Mission 2 : Qualification du logiciel [tranche ferme]

Les fonctions développées ont été testées fonctionnellement. Une analyse plus exhaustive doit être menée pour qualifier ces fonctions avant leur intégration dans le logiciel de vol. Les analyses menées devront être intégrées dans un flot de validation pour permettre une mise à jour des résultats lors des évolutions du logiciel.

<i>Tâche 2.1 : Analyse taux de couverture, analyse statique de code</i>
<i>Le flot de CI/CD actuellement basé sur Jenkins devra être étendu pour intégrer les outils d'analyse de taux de couverture (Gcov) et d'analyse statique de code (SonarQube) permettant de générer une métrique de la qualité.</i>
<i>Tâche 2.2 : Extension des tests unitaires</i>
<i>Une base de test unitaires a été mise en place lors d'une précédente prestation. A la date de rédaction, elle contient une cinquantaine de validation. Cette base doit être étendue pour obtenir une couverture fonctionnelle à 100% et un taux de couverture de code > 90%.</i>
<i>Tâche 2.3 : Maintenance des plateformes de tests</i>
<i>La plateforme de test consiste en un instrument piloté depuis un PC à partir d'agent Jenkins. La plateforme doit être adaptée en fonction des nouveaux besoins en particulier permettre l'interprétation automatique des résultats.</i>

Tâche 2.1 : Analyse des taux de couverture, analyse statique du code

Les briques logicielles étant destinées à être embarquées dans le logiciel de vol. Le niveau de criticité tel que défini dans les ECSS est de niveau C. Une analyse de code exhaustive et détaillée doit être menée. Pour cela les outils Gcov et SonarQube seront mis à disposition. La configuration de SonarQube étant déjà définie, quelques adaptations pourront être envisagées.

Livrable L2.1.1 *Documentation de l'infrastructure utilisée pour l'analyse de code*

Tâche 2.2 : Extension des tests unitaires

Les tests unitaires permettent de s'affranchir des régressions lors des phases de développement et d'intégration. Ces tests doivent être lancés par des agents dans la chaîne CI/CD. Une partie des résultats est interprétée automatiquement, l'autre partie doit aboutir à des résultats qui sont analysés à posteriori par un expert de la magnétométrie.

Livrable L2.2.1 *Rapport hebdomadaire sur l'état de la base de test, sur le taux de couverture et l'analyse statique de code*

Livrable L2.2.2 *Rapport final sur le taux de couverture et l'analyse statique de code*



Tâche 2.3 : Maintenance des plateformes de tests

Les tests unitaires sont lancés à partir de PC connectés aux instruments au cours du flot d'intégration continue par des agents Jenkins dans des environnements contrôlés (docker, environnement virtuel python, ...). Ces plateformes doivent être maintenues et adaptées au fil du projet en fonction du matériel connecté, des nouvelles briques à tester. Des scripts en Python ou en TCL pour Vivado XSCT pourront être développés pour contrôler et provoquer des fautes nécessaires à l'analyse du taux de couverture.

Livrable L2.3.1 : Bilan hebdomadaire des validation exécutées

Livrable L2.3.2 : Documentation de la plateforme de test

Mission 3 : Support et maintenance lors des opérations de métrologie [Tranche optionnelle]

Les briques logicielles sont intégrées dans un logiciel de vol. Cette intégration a été anticipée dans la conception, cependant des modifications peuvent s'avérer nécessaires. Dans ce cas les librairies d'interface avec l'instrument écrites en Python devront être adaptées ainsi que les applications de test.

Les instruments sont déjà utilisés pour réaliser de la métrologie. Ces tâches ne doivent pas être empêchées ni ralenties par les modifications effectuées sur le logiciel. En cas de difficulté, les opérations de support sont prioritaires sur d'autres développements.

<i>Tâche 3.1 : Finalisation de la documentation des briques logicielles</i>
<i>Dans le cadre du support des briques logicielles, la documentation (manuel de référence) doit être mise à jour et enrichie.</i>
<i>Tâche 3.2 : Suivi des problèmes logiciels reportés et analysés</i>
<i>Les problèmes identifiés sont suivis à l'aide de l'outil Tuleap. Le flot de résolution permet à l'ensemble de l'équipe de suivre les avancées et d'analyser la maturité du code déployé.</i>
<i>Tâche 3.3 : Support aux équipes de métrologie</i>
<i>Une assistance présentielle lors des phases des campagnes de métrologie est nécessaire pour tenter de diminuer l'impact d'éventuels problèmes liés au logiciel.</i>

Tâche 3.1 : Finalisation de la documentation des briques logicielles



La documentation des briques logicielles étant actuellement parcellaire, la tâche consiste à grouper dans un document l'ensemble de l'information pour permettre aux développeurs impliqués dans le projet une montée en compétence rapide et efficace.

Livrable L3.1.1 Documentation de l'ensemble des briques logicielles

Tâche 3.2 : Suivi des problèmes logiciels

A l'aide de l'outil Tuleap, les problèmes identifiés devront être renseignés et suivis au quotidien dans le but d'offrir au chef de projet une vision claire de l'état des briques logicielles développées.

Livrable L3.2.1 Rapport mensuel sur le statut des problèmes liés au logiciel

Tâche 3.3 : Support aux équipes de métrologie

Les expérimentations de métrologie sont complexes à mettre en place et peuvent mobiliser beaucoup de ressources. Durant certaines expérimentations de métrologie, un support en présentiel sur le logiciel doit pouvoir permettre de trouver une solution immédiate.

Livrable L3.3.1 Présence sur site lors des campagnes de tests

2.2 Mise à disposition des résultats de la prestation

Les résultats seront documentés et transférés au CEA par le biais des livrables dont la nature, la fréquence et le nombre sont détaillés ci-dessus (§2.1).

Il sera en outre demandé au prestataire d'assister aux réunions hebdomadaires du projet et, à cette occasion, de faire un bref résumé au reste de l'équipe de son avancement sous forme de synthèses techniques régulières (planches powerpoint). Ce suivi vient en complément du suivi d'avancement administratif et organisationnel décrit au paragraphe 5.3 ci-dessous.

3 Planning prévisionnel

Démarrage souhaité de la prestation : 15 septembre 2026

Tâches	Livrables	Durée estimée	Début souhaité	Fin souhaitée	Tranche
Mission 1 : : Développement de nouvelles briques logicielles et portage sur de nouvelles plateformes [tranche ferme]					
Tâche 1 : Ajout de surveillances	Livrables L1.1.1, L1.1.2, L1.1.3	2 mois	T0	T0+2 mois	Ferme
Tâche 1.2 : Portage sur plateforme DPU	Livrable L1.2.1 et L1.2.2.	4 mois	T0	T0+4 mois	Ferme
Mission 2 : Qualification du logiciel [tranche ferme]					
Tâche 2.1 : Analyse taux de couverture, analyse statique de code	Livrable L2.1.1	4 mois	T0 mois	T0+4 mois	Ferme
Tâche 2.2 : Extension des tests unitaires	Livrable L2.2.1 , L2.2.2	4 mois	T0 mois	T0+4 mois	Ferme
Tâche 2.3 : Maintenance des	Livrable L2.3.1 et L2.3.2	4 mois	T0 mois	T0+4 mois	Ferme



plateformes de tests					
Mission 3 : Support et maintenance lors des opérations de métrologie [Tranche optionnelle]					
Tâche 3.1 : Finalisation de la documentation des briques logicielles	Livrable L3.1.1	4 mois	T0+4 mois	T0+8 mois	optionnelle
Tâche 3.2 : Suivi des problèmes logiciels reportés et analysés	Livrable L3.2.1	4 mois	T0+4 mois	T0+8 mois	optionnelle
Tâche 3.3 : Support aux équipes de métrologie	Livrable L3.3.1	4 mois	T0+4 mois	T0+8 mois	optionnelle

4 Compétences requises

Pour le présent cahier des charges, les compétences attendues sont les suivantes :

- Développements en C/C++ sur Zynq (Expertise)
 - o Protocoles de communication I2C/SPI/Ethernet/ IEEE 1149.1
 - o Framework de développement Xilinx
- Développements d'architectures logiciels embarqués Bare Métal et OS temps réel (Expertise)
- Développements en électronique mixte analogique/numérique et en traitement du signal (Maîtrise)
- Flot de développement : Git, Jenkins (maîtrise de Groovy), Tuleap
- Langage de programmation Python (Maîtrise/Expertise)
- Expériences dans la mise en œuvre de moyens d'investigation en interface entre le matériel et logiciel (oscilloscopes, analyseur réseau, ...) et la réalisation de moyens de simulation / Méthodologie de développement et de validation de systèmes complexes
- Analyse de code en utilisant SonarQube



- Analyse de code en utilisant Gcov
- Connaissance du fonctionnement des capteurs quantiques pour la magnétométrie

5 Conditions d'exécution des prestations

5.1 Mise à disposition de locaux et équipements

La prestation sera effectuée sur le site ou en partie sur le site du CEA Grenoble.
Les modalités de mise à disposition des locaux sont décrites dans le document « PROJET DE MARCHE » joint au dossier de consultation.

5.2 Moyens techniques d'exécution - Mise à disposition de fichiers ou programmes informatiques

Dans le cadre des Prestations confiées au Prestataire et pour leur bonne exécution, le CEA peut mettre à la disposition du Prestataire des fichiers informatiques de données, des programmes informatiques, sous quelque forme que ce soit (codes sources, codes objets, codes exécutables).

Il est de convention expresse que le CEA est et reste propriétaire des ensembles mis à la disposition du Prestataire. Les données contenues dans ces fichiers ou programmes ne peuvent être exploitées par le Prestataire que pour les besoins des Prestations qui lui sont confiées. Toute autre diffusion ou exploitation, sous quelque forme que ce soit, lui est interdite. De même, il lui est interdit d'effectuer des copies de ces fichiers ou programmes.

En conséquence, le Prestataire doit s'obliger à prendre toutes mesures tendant à assurer le secret le plus absolu sur les données communiquées. Il ne peut communiquer les éléments relatifs à celles-ci qu'aux membres de son personnel appelés à travailler pour exécuter les Prestations considérées. A l'issue des Prestations, le Prestataire doit restituer sans délais les fichiers ou programmes au CEA et n'en conserver aucune trace.

Les modalités de mise à disposition des fichiers informatiques sont décrites dans le document « PROJET DE MARCHE » joint au dossier de consultation.

5.3 Suivi

Le suivi de l'avancement des prestations sera réalisé entre le chef de laboratoire LAIC et/ou le responsable projet du CEA et le responsable identifié par le prestataire.

La fréquence sera tous les mois et/ou à chaque livraison de livrable comme spécifié dans la description des tâches.

Ces réunions s'accompagnent de remise de comptes rendus d'activités en se basant sur les livrables. Des réunions « projet » seront organisées entre les responsables techniques CEA et le prestataire, comme décrit au paragraphe 2.2 ci-dessus.



Toutes ces activités de suivi (réunions et comptes rendus) sont comprises dans le prix indiqué dans l'offre financière.

5.4 Confidentialité

Les obligations en matière de secret et de confidentialité sont régies par les articles 11 et 12 des Conditions Générales d'Achat (CGA) applicables aux marchés passés par le CEA.

Le prestataire doit préciser quelles sont les informations confidentielles contenues dans son offre. Il précise l'usage qui peut en être fait, la durée de l'obligation de confidentialité, les personnes tenues au secret et les personnes auxquelles l'information ne doit pas être transmise

6 Garanties

Sous réserve de leur acceptation par le CEA, le prestataire explicitera les conditions de garanties de sa prestation.

7 Sécurité

Les règles de sécurité applicables aux entreprises extérieures sont définies dans le document EQ/CS 23-10 indice A, qui est joint au présent cahier des charges.

L'attention du prestataire est attirée sur l'importance d'examiner attentivement ce document, afin de pouvoir répondre point par point à ces règles et s'y conformer dans le cadre du Marché.

Les éléments mentionnés ci-dessous, dans la partie sécurité du cahier des charges ne se substituent pas aux règles définies dans le document EQ/CS 23-10 indice A, qui font référence.

7.1. Dispositions générales

Voir le document **EQ/CS 23-10 indice A**

Le PRESTATAIRE conserve l'entière responsabilité des personnels qu'il emploie. Il est donc de sa responsabilité d'appliquer et de faire appliquer les règles de sécurité en vigueur au CEA-Grenoble.

Un Plan de Prévention (ref. page 4 document EC/CS 23-10) sera conjointement établi, entre le CEA, le Prestataire et ses sous-traitants éventuels, préalablement au démarrage du contrat, et à l'issue de la « visite d'inspection commune ».



L'analyse des risques et le plan de prévention seront mis à jour en cas de travaux non définis dans le plan de prévention initial (activités, lieux, changements des risques d'interférence ou de coactivité etc...).

Le personnel du PRESTATAIRE devra assister aux réunions d'accueil sécurité des nouveaux arrivants d'entreprises extérieures (ref. page 2 document EC/CS 23-10).

7.2. Dispositions particulières (réf. pages 5-6-7 et 8 document EQ/CS 23-10)

Le prestataire est responsable de la formation et de la qualification de son personnel (ref. page 8 document EQ/CS 23-10)

Produits chimiques :

Toute introduction de produits chimiques par le prestataire est soumise à l'accord préalable du Chef d'installation et de l'ingénieur sécurité d'Installation, avec à minima la fourniture au CEA de la Fiche de Données de Sécurité des produits concernés, et leurs quantités.

Risque électrique : Le personnel du prestataire doit être formé, habilité et désigné par son employeur. Le travail sous tension et au voisinage de la tension est interdit (ref. page 6 document EC/CS 23-10).

Un état des formations et habilitations du personnel affecté au Marché sera communiqué en début de contrat, cet état sera nominatif (ref. pages 7 et 8 document EC/CS 23-10).

Les attestations des différentes formations et habilitations seront présentées par le prestataire à toute demande du CEA, lors de l'établissement du plan de prévention, et avant tout changement de personnel.

L'attention du prestataire est attirée sur sa responsabilité de fournir l'ensemble des matériels nécessaires à l'exécution du Marché, y compris les équipements de protection individuelle.