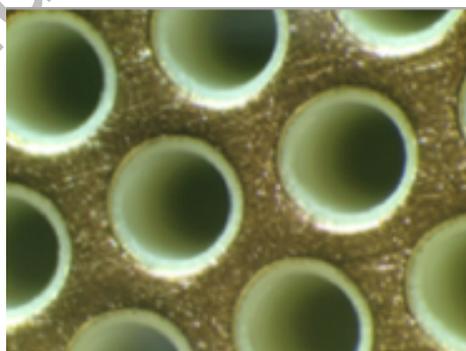
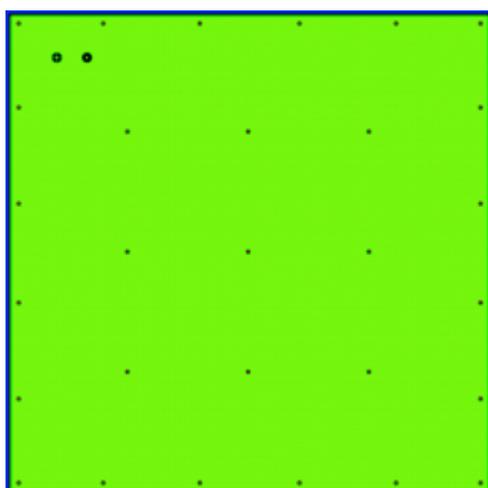


  	Cahier des charges	Réf : CdCLEMWA105Fr
	LEM DU PROTYPE WA105 (DUNE/DP)	Date création : 30/09/2016
		Page 1 sur 23

CAHIER DES CHARGES ET DES SPECIFICATIONS TECHNIQUES

PRODUCTION DES LEM DU PROTOTYPE WA105 (DUNE/DP)



HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Pages modifiées	Motifs
DRAFT	30/09/2016	Création	Pour diffusion restreintes et corrections
DRAFT2	19/01/2017		Modifications et corrections après l'appel à candidatures
DA	01/02/2017		Version A pour corrections par la collaboration WA105
DB			Version B pour diffusion de l'appel d'offre

Rédacteurs		Vérificateurs		Approbateur
Nom	A. DELBART	E. MAZZUCATO	Y. PENICHOT	M. ZITO
Fonction	Chef de Projet	Resp. Physicien	Resp. QA	Resp. Scientifique
Date				
Visa				

Table des matières

1 - Introduction : le projet WA105 (démonstrateur DUNE/DP)	4
2 - Principe de fonctionnement des LEM	4
3 - Objet	5
3.1 - Fourniture du Titulaire	5
3.2 - Fourniture CEA	7
4 - Conditions générales	8
4.1 - Définition des phases	8
4.2 - Suivi du contrat et du déroulement de la production	8
4.3 - Responsabilité du Titulaire	8
4.4 - Devoir d'alerte	8
4.5 - Inspection technique	9
4.6 - Modifications	9
4.7 - Outillages	9
4.8 - Planning demandé	9
5 - Assurance Qualité	10
6 - Description technique du LEM	10
7 - Directives de réalisation	13
7.1 - Fichiers gerber Tels Que Construits (TQC)	13
7.2 - Matériau de base : spécifications de la plaque d'époxy cuivré	13
7.3 - Perçage	14
7.4 - « Desmearing »	14
7.5 - Polissage	14
7.6 - « Micro-etching » des RIM par le procédé de « Global Etching »	14
7.7 - Traitement de surface Nickel/or (Ni/Au)	15
7.8 - Détourage du LEM à ses dimensions finales	15
7.9 - Nettoyage, rinçage, et étuvage	15
8 - Traitement des non-conformités	15
9 - Contrôles et tests	16
9.1 - Procédure de contrôle de fabrication (incluse dans la LOFC)	16
9.2 - Contrôles dimensionnels et sélection des plaques d'époxy cuivré de base	16
9.3 - Contrôle visuel et dimensionnel final du LEM	16
9.4 - Contrôles et mesures sur les témoins pour coupes métallographiques	18
9.5 - Contrôle d'isolement entre les 2 faces du LEM	18
10 - Recette	18
11 - Emballage / Transport	19
11.1 - Emballage	19
11.2 - Transport	19
12 - Contenu du dossier de fabrication et de Contrôles	20
13 - Contenu du dossier de réponse à l'appel d'offre	20
14 - Représentants CEA	21
Annexe 1: liste des fichier gerber fournis par le CEA	22
Annexe 2: Photos d'exemples de non-conformités constatées sur prototypes	23

GLOSSAIRE

A.O.I	Automatic Optic Inspection
BV	Breakdown Voltage (Tension de claquage)
CERN	Organisation européenne pour la recherche nucléaire
DDP	Différence De Potentiel
DFC	Dossier de Fabrication et de Contrôles
DRF	Direction de la Recherche Fondamentale (du CEA)
DUNE	Deep Underground Neutrino Experiment
DUNE/DP	Détecteur « Double Phase » de l'expérience DUNE
ETHZ	Swiss Federal Institute of Technology in Zurich
FSFC	Fiche de Suivi de Fabrication et de Contrôles
HT	Haute Tension
Irfu	Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers (de la DRF)
LEM	Large Electron Multiplier
LOFC	Liste d'Opération de Fabrication et de Contrôle
MPGD	Micro Pattern Gaseous Detector
PAQ	Plan d'Assurance Qualité
PCB	Printed Circuit Board
PV	Procès Verbal
RIM	Anneau d'époxy nu autour des trous actifs du LEM
SEDI	Service d'Electronique, des Détecteurs et de l'Informatique (de l'Irfu)
SPP	Service de Physique des Particules
TQC	(Plans) Tels Que Construits

1 - Introduction : le projet WA105 (démonstrateur DUNE/DP)

Le projet WA105 a pour objectif la réalisation d'un démonstrateur de 300 tonnes d'argon liquide ($6 \times 6 \times 6 \text{ m}^3$) dont la technologie repose sur l'utilisation d'une Chambre à Projection Temporelle (TPC) utilisant des détecteurs MPGD (Micro Pattern Gaseous Detectors) et fonctionnant en argon liquide diphasique (liquide-gaz). Ce prototype de détecteur est en cours de production et sera testé en faisceau au CERN à Genève mi-2018. Il permettra de valider la technologie proposée pour l'expérience internationale DUNE de physique des neutrinos qui utilisera des détecteurs souterrains de très grande taille, d'environ 10 kT d'argon liquide (87 K), capables de fournir une image tridimensionnelle de très haute résolution des produits d'interaction des neutrinos dans la cible d'argon liquide.

Le système de détection proposé pour le projet WA105 (figure 1) est constitué d'un ensemble de 144 PCB de type LEM (Large Electron Multiplier) couvrant une surface de 36 m^2 dans la région en phase gazeuse située juste au-dessus du volume d'argon liquide. Chaque détecteur LEM, de dimension $50 \times 50 \text{ cm}^2$, est fait d'une plaque de circuit imprimé en FR4 d'environ 1 mm d'épaisseur recouverte sur chaque face d'une fine couche de cuivre. Cette plaque est percée par une multitude de trous de $500 \mu\text{m}$ de diamètre et espacés de $800 \mu\text{m}$ selon une disposition hexagonale (0,4 million de trous). Une différence de potentiel électrique d'environ 3000 V, maintenue entre les deux faces du détecteur, permet la multiplication dans les trous actifs du LEM des électrons extraits du milieu liquide où s'est produite l'ionisation primaire au passage de particules chargées. Un circuit imprimé (PCB « Anode ») de même dimension est placé à 2 mm au-dessus du LEM pour collecter et localiser les charges issues du LEM. Dans le cadre de ce projet, le CEA est responsable de la fourniture de la moitié de la surface totale de détection (18 m^2).

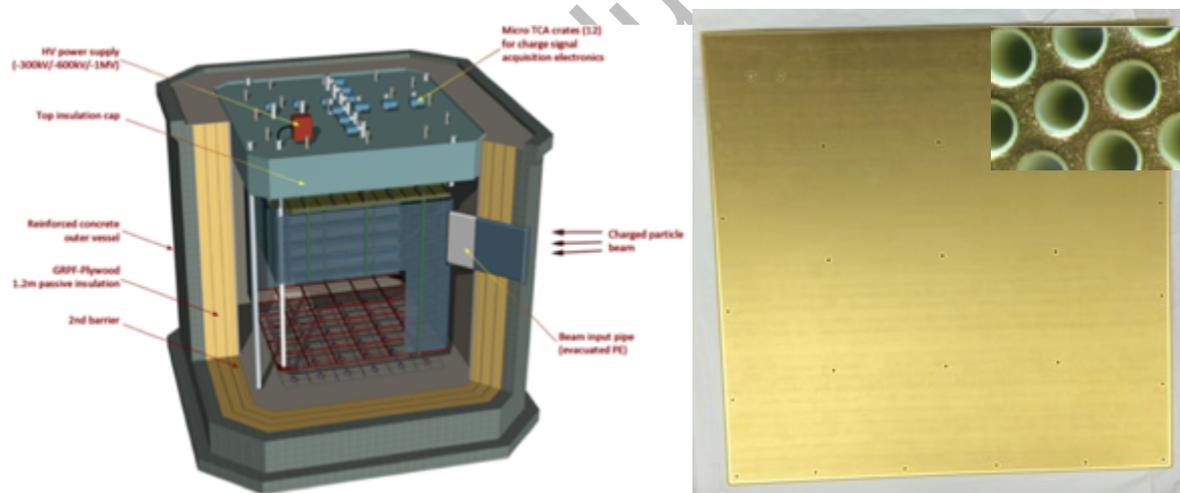


Figure 1. Vue générale du démonstrateur WA105 et photo d'un détecteur LEM. Un zoom sur les trous actifs du LEM montre l'anneau non cuivré appelé « RIM » autour du trou.

2 - Principe de fonctionnement des LEM

Une particule chargée passant dans l'argon liquide libère le long de sa trajectoire des électrons par l'ionisation des molécules d'argon. Ces électrons dits primaires sont extraits de l'argon liquide puis guidés vers les trous du LEM sous l'action du champ électrique défini par les potentiels appliqués sur la face du LEM en regard du liquide (V_{BOTTOM} fixé sur la face BOTTOM du LEM) et sur une grille d'extraction placée juste en dessous de la surface du liquide. Un potentiel V_{TOP} est appliqué sur la face

TOP du LEM ($DDP = V_{TOP} - V_{BOTTOM}$) de telle sorte que le champ électrique dans le trou soit suffisamment intense (≈ 3000 V/mm) pour permettre la multiplication des électrons entrant dans les trous du LEM par un processus dit d'avalanche mis en œuvre dans les détecteurs gazeux de rayonnement ionisant. Le facteur de multiplication des électrons (appelé gain) dépend principalement de l'intensité du champ électrique dans les trous et de son uniformité sur l'épaisseur du circuit. Une variation d'épaisseur du circuit de 5% se traduit par une variation de 50% sur le gain du LEM (à une DDP appliquée fixée).

Dans le cas du LEM, le processus d'amplification par avalanche est très sensible à toute imperfection du champ électrique dans et au bord des trous. Une discontinuité de champ électrique causée par un défaut local dans un trou, au voisinage du bord d'un trou, ou sur un bord du LEM, peut favoriser l'initiation d'étincelles et empêcher l'application d'une DDP suffisante pour obtenir du gain sur le LEM, le rendant ainsi inutilisable. Un tel phénomène peut être provoqué par un corps « étranger » dans un trou comme une poussière métallique ou de fibre de verre non éliminée après le perçage, par un perçage irrégulier d'un trou dû à un forêt usé, par un défaut de localisation de perçage d'un ou plusieurs trous sur le LEM, par une gravure du cuivre irrégulière, ou par une poussière métallique ou isolante présente dans ou au bord d'un trou. Un isolement électrique entre les 2 faces du LEM correspondant à résistivité minimale de l'ordre de 10^{11} Ohm est également nécessaire pour un fonctionnement stable du détecteur.

Un soin particulier, notamment de propreté, devra donc être adopté sur toute la gamme de fabrication du LEM : outils de perçage, bains chimiques de gravure, bains de nettoyage et rinçage, préservation de l'intégrité des LEM lors des manipulations par les opérateurs (port de gants, paniers de transports adaptés) ou sur les machines de convoyage des circuits.

3 - Objet

Le soumissionnaire sélectionné (ci-après appelé le « Titulaire ») devra fournir **78 LEM (dont 6 de présérie et 72 de série)** (+ une levée d'option éventuelle de 6 pièces) et les documents constituant le dossier de fabrication décrits au paragraphe 3.1 - ci-dessous :

3.1 - Fourniture du Titulaire

A) Documentation (en français ou en anglais)

Le Titulaire remet au CEA pour validation un dossier initial de fabrication, lors de la **réunion d'enclenchement de la fabrication de la présérie**. Ce dossier **pourra** éventuellement être mis à jour pour la **réunion d'enclenchement de la production de série** mais ils ne pourront plus être modifiés par la suite.

Le dossier initial de fabrication comprend les éléments suivants :

1. Le Plan Assurance Qualité (PAQp).
2. Le planning prévisionnel avec les jalons.
3. Le bon de commande des plaques d'époxy cuivré Panasonic. Le bon de livraison sera ajouté au dossier finalisé pour la réunion d'enclenchement de la production.

4. Les procédures de fabrication et de test, notamment la Liste des Opérations de Fabrication et de Contrôle (LOFC).
5. Les plans Tel Que Construit (TQC) des LEM : fichiers gerber pour fabrication, fournis par le CEA et mis en conformité avec la gamme de fabrication par le Titulaire.
6. Le modèle de la Fiche de Suivi de Fabrication et des Contrôles (FSFC)

A remettre au CEA avec chaque lot de fabrication :

7. Le registre des non-conformités
8. Le registre des modifications
9. Les procès verbaux associés aux contrôles et tests, qui pourront être consignés sous la forme d'une Fiche de Suivi de Fabrication et Contrôles (FSFC) associée à chaque LEM.
10. Ces documents seront regroupés dans un Dossier de Fabrication et de Contrôles, rédigé en français ou en anglais.

B) Prestations à réaliser par le Titulaire

1. La rédaction de tous les comptes rendus de réunions, de contrôles, de tests et d'essai
2. La reprise des fichiers gerber fournis par le CEA pour leur mise en conformité avec la gamme de fabrication.
3. Tous les approvisionnements nécessaires à la fabrication, hormis les éléments précisés de fourniture CEA.
4. La fabrication des 78 LEM, selon les présentes spécifications techniques (voir tableau 1).
5. La fourniture des témoins de coupes métallographiques associés à chaque LEM (voir paragraphe 8).
6. L'étude et la fabrication des outillages nécessaires à la réalisation, à la manutention, aux tests de qualification et au transport des éléments sur le site du CEA/CE Saclay.
7. Tous les contrôles et tests suivant le paragraphe 9.

Matière de base	Approvisionnement en un lot de fabrication en début de production
Matériau	Résine epoxy PANASONIC R-1566W
Dimensions	540 mm x 540 mm mini
Epaisseur de résine epoxy	1 mm (-0.04 /+0 mm selon les spécifications PANASONIC du lot)
Epaisseur de cuivre	105 µm
Epaisseur totale moyenne	1,21 (-0.04/+0) mm +/- 0.04 mm sur la totalité des plaques de base sélectionnées
Uniformité d'épaisseur	+/- 0.04 mm (sur la surface de la plaque de base sélectionnée)
PCB LEM fini	
Dimensions	499.5 mm x 499.5 mm +0/-0.2 mm
Couche de finition Ni/Au	OUI : 5 µm Ni + 0.1 µm Au
Sérigraphie	OUI (si choisie pour marquage d'identification du circuit)
Vernis épargne	NON
Epaisseur finale (Ni/Au compris)	1.15 (-0.04/+0) mm +/- 0.04 mm (moyenne sur la totalité des LEM produits) et uniformité sur la surface de chaque LEM de +/-0.04 mm
Trous « actifs » avec RIM	≈ 400 000 trous non-métallisés de diamètre 0.5 mm -0/+0.01 mm
RIM (fini avec Ni/Au)	40 µm +/- 4 µm

Tableau 1. Résumé des spécifications techniques.

C) *Contrôles et tests*

Réalisation des contrôles et tests, consignés dans **la Fiche de Suivi de Fabrication et Contrôle (FSFC) associée à chaque LEM**, définis au paragraphe 8, comprenant à minima :

- 1 Les contrôles dimensionnels de plaques d'époxy cuivré sélectionnée selon les critères décrits au paragraphe 9.2.
- 2 Les contrôles visuels et sur bancs optiques de type A.O.I du LEM (paragraphe 9.3).
- 3 Les contrôles optiques des témoins pour coupes métallographiques associées au LEM (voir paragraphe 9.4).
- 4 Le contrôle d'isolement entre les 2 faces du LEM (voir paragraphe 9.5).

D) *Transport & Emballage*

1. Les emballages individuels des LEM et les caisses de transport des lots.
2. La livraison des LEM sur le site du CEA/CE Saclay (France).

E) *Réunions*

Le Titulaire organise les réunions suivantes :

- enclenchement du contrat (pouvant être téléphonique),
- enclenchement de présérie (dans les locaux du Titulaire),
- enclenchement de production (dans les locaux du Titulaire),
- clôture du marché (pouvant être téléphonique).

Le CEA et le Titulaire s'entendront sur la tenue de réunions d'avancement, lors des recettes de lots par exemple.

3.2 - **Fourniture CEA**

1. Les présentes spécifications techniques.
2. Le dossier de fichiers Gerber

4 - Conditions générales

4.1 - Définition des phases

Le Titulaire réalise les prestations selon les phases suivantes :

- **Phase 1 : étude de fabrication.**
Le Titulaire réalise et livre le **dossier initial de fabrication** précité. **L'enclenchement de la fabrication de la présérie ne peut débuter que suite à la validation par le CEA de ce dossier.**
- **Phase 2 : réalisation de la présérie.**
A l'issue de l'acceptation par le CEA de la Phase 1, le Titulaire réalise **un lot de 6 LEM de présérie**. **L'enclenchement de la fabrication de la série ne peut débuter que suite à la validation par le CEA de la phase de présérie.**
- **Phase 3 : réalisation de la production.**
A l'issue de l'acceptation du point 2 lors de la réunion d'enclenchement de la production, lancement de la production **des 72 LEM** en 12 lots échelonnés toutes les semaines (voir l'échéancier paragraphe 4.8).
- **Prestations sur bordereaux de prix.**
Sur demande du CEA, le CEA réalisera des prestations sur bordereaux de prix relatives à la fourniture de LEM supplémentaires.

4.2 - Suivi du contrat et du déroulement de la production

Le Titulaire désigne un interlocuteur responsable de l'exécution technique du contrat et de son suivi pendant toute sa durée. Un interlocuteur responsable du suivi commercial du contrat est également nommé pour toute la durée du contrat. La communication entre les interlocuteurs est réalisée en français ou en anglais.

4.3 - Responsabilité du Titulaire

Le Titulaire est responsable de la bonne réalisation des différents éléments de sa fourniture, par rapport aux règles de l'art de l'industrie du PCB, des normes techniques et qualité de cette industrie, et vis à vis des spécifications fournies par le CEA.

4.4 - Devoir d'alerte

Si un problème remettant en cause le bon fonctionnement de l'objet final apparaît, lors de la réalisation ou des contrôles, le Titulaire doit en avvertir le CEA le plus rapidement possible et au plus tard sous 5 jours ouvrés.

4.5 - **Inspection technique**

Pendant toutes les étapes d'études, de fabrication et de tests, le CEA se réserve le droit de venir inspecter pendant les heures ouvrables le Titulaire et ses sous-traitants. Les contrôles en usine sont à la charge et exécutés par le Titulaire. Le CEA doit être informé de leur date, au moins 8 jours ouvrés à l'avance, et se réserve la possibilité d'envoyer un représentant pour y assister.

4.6 - **Modifications**

Le Titulaire peut proposer au CEA toutes les modifications susceptibles de simplifier la fabrication des pièces. Toutes les modifications sont soumises à l'approbation du CEA. Les modifications peuvent être proposées lors de la réunion d'enclenchement de la production de la présérie et exceptionnellement lors de la réunion d'enclenchement de la production. Ces modifications sont consignées dans une mise à jour de la LOFC.

Le CEA pourra être amené à apporter des modifications au dossier de fichiers gerber fourni au moment de l'appel d'offre et utilisé par le Titulaire pour réaliser les fichiers gerber Tel Que Construit.

4.7 - **Outillages**

Le plan des outillages spécifiques éventuellement nécessaires pour la fabrication, le contrôle, la manutention et les tests sont soumis à l'approbation du CEA. Les surfaces des outillages en contact avec la fourniture ne doivent pas être blessantes ou polluantes pour celle-ci, et donc éventuellement protégées.

4.8 - **Planning demandé**

Planning prévisionnel	
T0	Signature du contrat & réunion d'enclenchement
T0 + 2 semaines	Réunion d'enclenchement de la production de la présérie Fourniture du dossier initial de fabrication
T0 + 4 semaines	Livraison de la présérie de 6 pièces et de la documentation associée.
T0 + 6 semaines	Revue de lancement de la production des 12 lots de 6 pièces au rythme de 1 lot par semaine.
T0 + 18 semaines	Livraison du dernier lot de 6 pièces Revue de fin de production (T0+21 semaines)

Ce planning est imposé par le planning de construction du prototype WA105 au CERN. Le T0 est soumis à l'approbation de la collaboration internationale WA105.

5 - Assurance Qualité

Le niveau d'Assurance Qualité requis pour l'exécution des prestations citées dans ce document est :
ISO 9001 :2008 (ou la preuve d'une organisation qualité de niveau équivalent)

Les dispositions d'assurance qualité feront l'objet d'un **Plan Assurance Qualité Particulier (PAQp)** qui sera établi par le Titulaire et soumis au CEA pour validation, avant sa mise en application par le Titulaire. Le Titulaire s'assurera que tous ses sous-traitants respectent les dispositions du PAQp. Une LOFC peut se substituer au PAQ. Le PAQ et les documents qualité, exigés dans le cadre du présent contrat et devant être soumis pour validation, seront remis par le Titulaire au CEA/Irfu à T0 + 2 semaines (T0 étant la date de signature du contrat).

Le CEA ou son représentant se réserve la possibilité d'effectuer à tout moment des vérifications concernant l'application de ce PAQ par le Titulaire. A cette fin, le Titulaire laisse libre accès, à ses installations et facilite les audits qualité, les inspections ou les visites de surveillance missionnés par le CEA. Il donnera libre accès aux emplacements et à la documentation nécessaires, et fera en sorte qu'il en soit de même chez ses sous-traitants éventuels.

6 - Description technique du LEM

Les LEM sont des circuits imprimés carrés de 499,5 mm de côté, de 1,15 mm +/- 0,04 mm d'épaisseur, cuivre et traitement Ni/Au compris (figure 2), percés d'environ 0,4 millions de trous de 500 µm de diamètre (tolérance constructeur des forêts) selon une disposition hexagonale de pas 800 µm (trous appelés « trous actifs » du LEM). La bordure du circuit autour de la surface définie par l'ensemble de ces trous est constituée de 2 mm de cuivre et de 2 mm d'epoxy non métallisé. 29 trous non métallisés de diamètre 2,2 mm permettent le passage de vis de fixation. Dans un coin du LEM, deux motifs de cuivre gravé sont percés en leur centre d'un trou non métallisé de 1,2 mm de diamètre qui sont utilisés pour la connexion électrique Haute Tension (connexions HT) des 2 faces du LEM (figure 3). Des connecteurs sont insérés et soudés ultérieurement par le CEA sur ces motifs.

LEM DU PROTYPE WA105 (DUNE/DP)

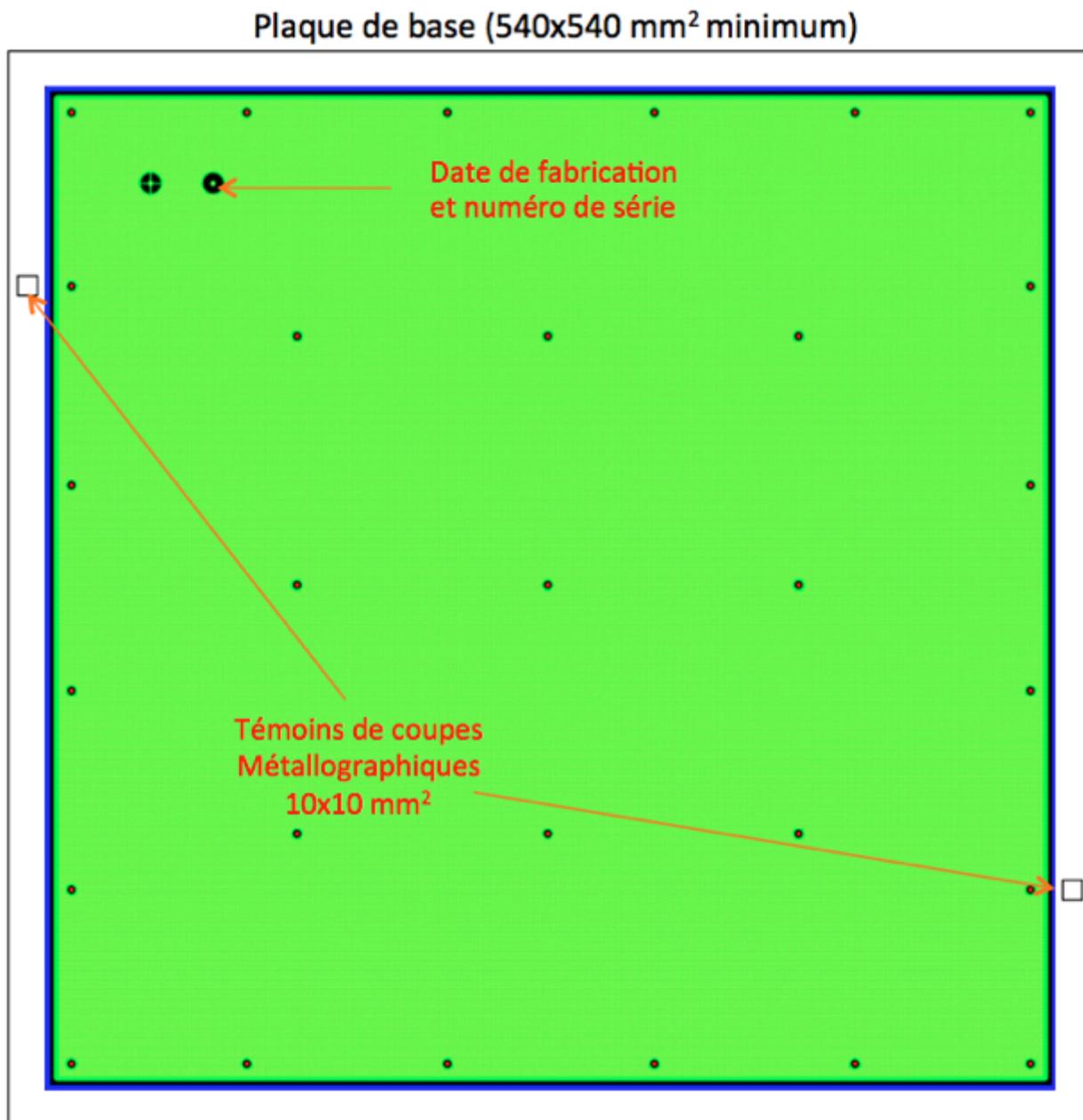


Figure 2. Plan mécanique des LEM (Vue couche du dessus, couche « a.gbr »). Sont représentés : les trous traversant non métallisés pour fixation du LEM (en rouge), les 2 motifs de connexion HT (coin supérieur gauche), les 2 témoins de coupes métallographiques.

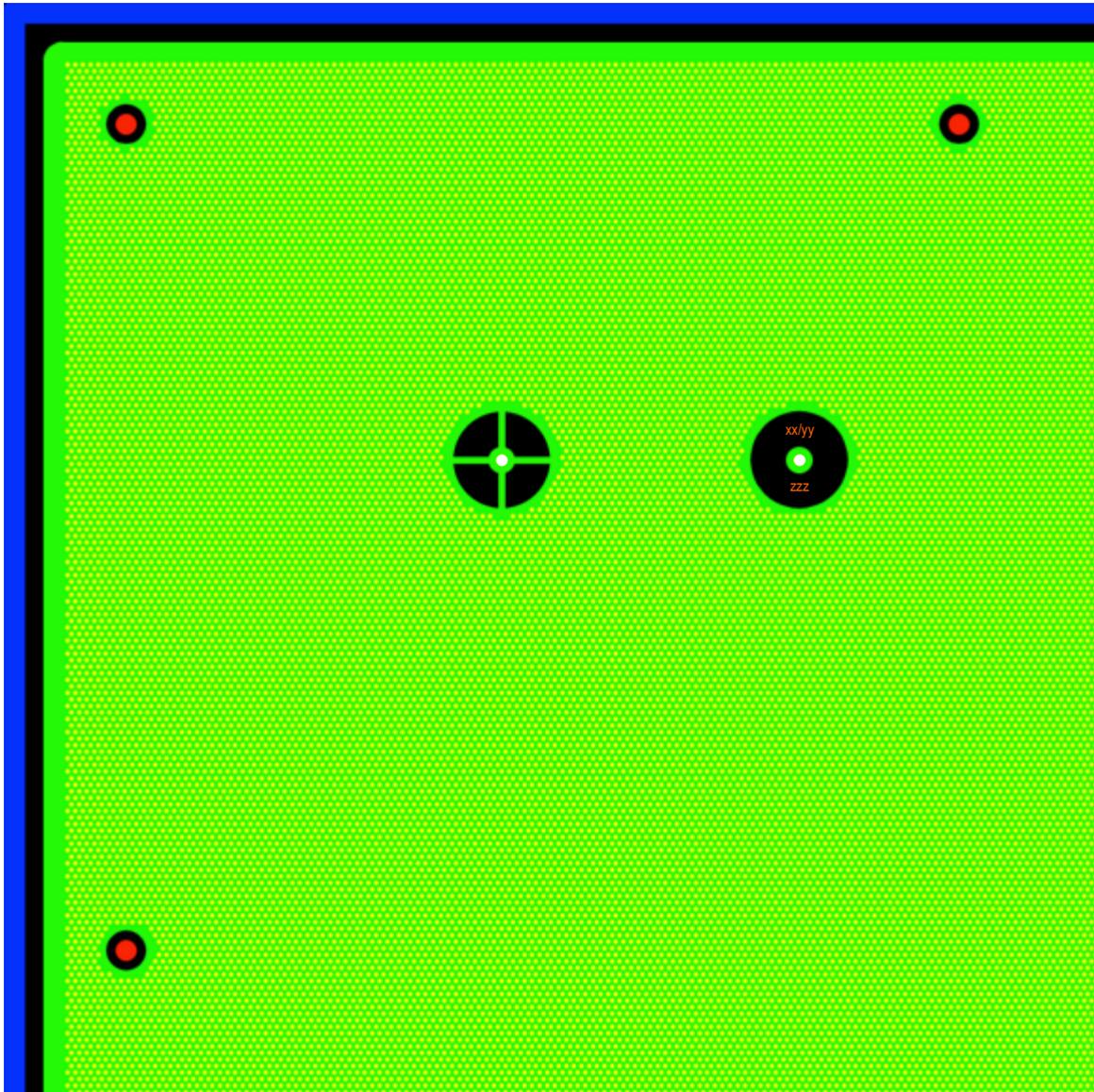


Figure 3. Zoom sur le coin du LEM avec les 2 motifs de connexion HT. En jaune, les trous « actifs » du LEM. En rouge, les trous de fixation des LEM. En blanc, les 2 trous pour les connecteurs HT. Identification du circuit (en orange).

Les trous « actifs » du LEM sont percés à travers la plaque d'epoxy métallisée sur ses 2 faces avec une épaisseur initiale du cuivre du matériau brut de 105 microns. Le cuivre est ensuite gravé chimiquement par la méthode du « global etching » pour créer un anneau d'epoxy nu sans cuivre (appelé « RIM ») autour des trous (figure 4). Le RIM final, après application de la finition Nickel/Or sur tout le circuit (épaisseur de l'ordre de $5 \mu\text{m}$ de Ni + $0,1 \mu\text{m}$ de Au) doit faire $40 \mu\text{m} \pm 4 \mu\text{m}$ de largeur sur les 2 faces du LEM.

7 - Directives de réalisation

La gamme de fabrication (LOFC) respecte à minima les directives décrites ci-dessous. Le Titulaire applique les règles de l'art et les normes de la fabrication industrielle de circuits imprimés pour réaliser la gamme de fabrication. La LOFC comprend par exemple toutes les opérations de préparation du circuit que le Titulaire juge nécessaires avant chacune des étapes de production du LEM : nettoyage et/ou rinçage, préparation de surface avant gravure du cuivre et « global etching » du RIM, etc ...

Pendant toute la gamme de fabrication et des tests de qualification des LEM, la manutention des LEM est toujours effectuée avec des gants adaptés (type gants en Latex) en évitant de toucher la surface active du LEM (la surface percée de trous actifs) et en veillant à les protéger de la poussière. Il est donc proposé de ne réaliser le détournage du LEM à ses dimensions finales qu'au plus tard dans la gamme de fabrication.

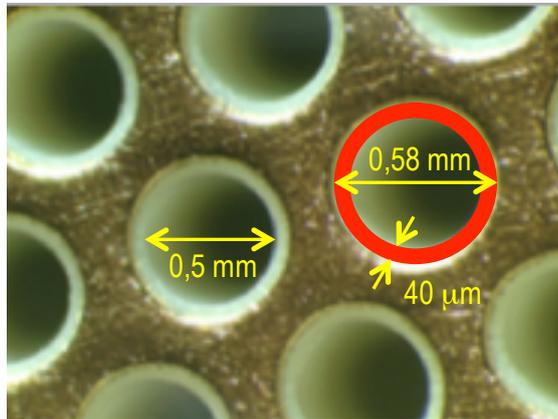


Figure 4. Définition du « RIM » (en rouge) : anneau d'époxy nu autour des trous actifs du LEM

7.1 - Fichiers gerber Tels Que Construits (TQC)

Le Titulaire doit mettre les gerber fournis par le CEA en conformité avec la gamme de fabrication. Il ajoute également l'identification des LEM par sérigraphie ou un autre type de marquage adapté et 2 témoins de 10x10 mm² pour coupes métallographique en périphérie du LEM en bordure de la plaque de base de 540x540 mm² (voir figure 2). L'identification comprend la date de fabrication (xx/yy, avec xx = numéro de semaine de fabrication et yy = année de fabrication) et un numéro de série unique (zzz = numéro incrémenté à partir de 001). Ces témoins sont constitués des mêmes trous « actifs » de 0,5 mm de diamètre que ceux de la surface active du LEM (mêmes spécifications et disposition) et doivent suivre la même gamme de fabrication complète du LEM avant la découpe aux dimensions finales. Chaque témoin sera identifié par un marquage reprenant le numéro de série du LEM et un numéro de 1 à 2 pour chacun des 2 témoins.

7.2 - Matériau de base : spécifications de la plaque d'époxy cuivré

La matière brute epoxy métallisée est le PANASONIC R-1566W (« Hallogène Free » et « Fire Retardant »). L'épaisseur d'époxy est de 1 mm (-0,04/+0 mm selon les spécifications PANASONIC du

lot approvisionné), et l'épaisseur de cuivre sur les 2 faces est de 105 μm . L'épaisseur de la plaque d'époxy cuivrée brute est donc de 1,21 mm (-0,04/+0 mm). Le titulaire approvisionnera **en une fois** la matière de base nécessaire pour la totalité de la production avec la marge qu'il jugera adaptée pour satisfaire les tolérances d'épaisseur selon les modalités de sélection des plaques de 540x540 mm² décrites au paragraphe 9.2.

7.3 - **Perçage**

Il est interdit de percer avec un même forêt un empilement de plusieurs circuits. Les forêts de 0,5 mm de diamètres utilisés pour le perçage des trous actifs des LEM doivent être changés **par des forêts neufs tous les 1000 trous**. La vitesse de rotation du forêt et la vitesse le long de l'axe de rotation du forêt doivent respecter les recommandations du fabricant du forêt. Un soin particulier est apporté à la propreté du plan de travail de la machine de perçage pour éviter tout dommage sur la surface de cuivre du LEM. Toute interruption du perçage d'un LEM doit être consignée dans la FSFC du LEM. Il est très fortement recommandé d'éviter tout démontage et remontage en position du LEM sur le support de perçage avant que le perçage complet du LEM soit terminé.

7.4 - « **Desmearing** »

Cette opération permet de nettoyer les trous après perçage : élimination des résidus d'époxy accumulés dans et au bord des trous au moment du retrait du forêt et élimination des poussières métalliques laissés par l'usure du forêt dans les trous. Cette opération peut associer l'utilisation de brosses rotatives, d'un solvant pour ramollir l'époxy, un nettoyage à eau sous pression (type karcher) et l'utilisation d'un bain de permanganate de Potassium.

7.5 - **Polissage**

Cette opération consiste à arrondir le bord des trous. Elle doit être faite avant le « micro-etching » des RIM (opération 7.6) et peut également être refaite après. Elle est réalisée avec de la poudre de pierre ponce de grain fin (type « dentaire »). Dans le cas de l'utilisation d'une machine à polir sur convoyeur linéaire, l'opération est faite 4 fois, en retournant le circuit (faces TOP Vs BOTTOM) et en tournant de 90° le circuit.

7.6 - « **Micro-etching** » des RIM par le procédé de « **Global Etching** »

Le cuivre est gravé par le procédé contrôlé de gravure chimique appelée « Global Etching ». Le cuivre est gravé globalement sur toute la surface du LEM de telle sorte qu'un anneau d'époxy nu sans cuivre (le « RIM ») est réalisé autour des trous actifs du LEM. Les paramètres de réglage du procédé sont ajustés par des mesures intermédiaires du RIM sur les 2 faces du LEM à chaque fois que cela est jugé nécessaire, et obligatoirement à chaque changement de bain de gravure. Le RIM final, après application de la finition Nickel/Or (étape 7.7) sur tout le circuit doit être de 40 μm +/- 4 μm de largeur sur les 2 faces du LEM. La gravure du cuivre par « global etching » doit donc être de 35 μm avant

l'opération de traitement Ni/Au. L'épaisseur de la couche de cuivre sur les 2 faces du LEM est donc de 70 µm après le micro-etching.

7.7 - *Traitement de surface Nickel/or (Ni/Au)*

Une surcouche de 5 microns de Nickel et 0,1 microns d'Or est déposée sur le cuivre des LEM. L'épaisseur finale du LEM est donc de 1,15 +/- 0.04 mm (cuivre et traitement Ni/Au compris).

7.8 - *Détourage du LEM à ses dimensions finales*

Après le détourage final du LEM à ses dimensions finales de 499,5 x 499,5 mm², les 2 témoins de coupes métallographiques sont détachés et associés au LEM correspondant dans des sachets comportant le numéro d'identification du LEM.

7.9 - *Nettoyage, rinçage, et étuvage*

Le LEM est dégraissé, rincé dans un bain d'eau dé-ionisée (résistivité contrôlée supérieure à 2 MOhm) et séché dans une étuve pendant au moins 3 heures pour éliminer l'eau (50-60 °C).

8 - **Traitement des non-conformités**

Le CEA/Irfu doit être informé sous 48h de toutes les **non-conformités majeures** détectées. Les actions correctives qui en découlent doivent être soumises pour approbation écrite préalable au CEA.

Non-conformité Majeure : Non-conformité impactant directement les performances du système ou les caractéristiques attendues.

Non-conformité Mineure : Non-conformité non majeure, dont la réparation, acceptée par le CEA, peut permettre au système de satisfaire les contrôles et tests de qualification et les performances attendues.

Une spécification non respectée dans les tolérances du tableau 1 est considérée comme une **non-conformité majeure**.

9 - Contrôles et tests

Les étapes de contrôles et tests de qualification sont consignées dans la FSFC et leurs résultats font l'objet d'un document papier ou informatique joint à la FSFC.

9.1 - *Procédure de contrôle de fabrication (incluse dans la LOFC)*

Cette procédure comprend les contrôles suivants (consignés dans chaque FSFC associée à une LEM) :

- Contrôles dimensionnels et sélection des plaques de base d'époxy cuivré.
- Contrôles visuels et dimensionnels finaux du LEM (mesure optique des RIM et de l'épaisseur)
- Mesures sur les 2 coupes métallographiques des épaisseurs d'époxy et de cuivre, des RIM et des dimensions des trous.
- Contrôles d'isolement et de continuité électrique.

Le Titulaire établit lors de la Phase 1 la liste des opérations de fabrication et des contrôles (LOFC) regroupant l'ensemble des phases de suivi de la fabrication. Le Titulaire décrit les moyens qu'il mettra en œuvre pour garantir chacun de ces contrôles, en rapport avec les tolérances et les dimensions à vérifier.

Pour chaque phase de contrôles, sont indiqués les points suivants :

- Référence des plans, spécifications ou documents de contrôles applicables.
- Points clés : établissement de document ou de PV, convocations ou points d'arrêt nécessitant la présence du CEA, d'un organisme ou de l'ensemble des intervenants.
- Référence des procès-verbaux éventuels.
- Dates des interventions et visas des intervenants.

9.2 - *Contrôles dimensionnels et sélection des plaques d'époxy cuivré de base*

La sélection des plaques découpées aux dimensions nécessaires à la gamme de fabrication (540x540 mm² minimum) est faite au moyen d'une cartographie de relevés d'épaisseur totale (FR4 + cuivre) dans les 13 zones localisées sur la figure 5. Les 78 plaques retenues doivent avoir une épaisseur moyenne de 1,21 mm (-0.04/+0 mm selon les spécifications du lot PANASONIC approvisionné) +/- 0.04 mm. L'uniformité en épaisseur sur la surface de la plaque doit être de +/- 0.04 mm. La cartographie de relevés des 13 épaisseurs sera jointe à la FSFC associée à chaque LEM.

9.3 - *Contrôle visuel et dimensionnel final du LEM*

1/ Le Titulaire effectue une inspection visuelle de chaque LEM pour identifier et localiser d'éventuelles non-conformités qui sont traitées selon les modalités décrites dans le paragraphe 8 :

- a/ défauts d'aspect du cuivre : rayures, dépôts, surépaisseurs ou absences locales de cuivre,
- b/ non-conformités de gravure du cuivre en référence aux fichiers gerber TQC.

c/ non-conformités de localisation des trous « actifs » du LEM, des trous de fixation ou des trous de connections HT.

d/ défauts d'intégrité d'un trou « actif » : trou bouché (ou partiellement obstrué) par un corps étranger, défaut de perçage (diamètre non conforme, forme non cylindrique du trou)

Les défauts constatés font l'objet d'une photo qui est jointe à la FSFC du LEM concerné.

Les défauts de type b/, c/, d/ et e/ sont considérés par défaut par le CEA comme des **non-conformités majeures** et les LEM concernés rejetés.

Les défauts de type a/ sont considérées par défaut par le CEA comme des **non-conformités mineures**.

Plaque de base (540x540 mm² minimum)

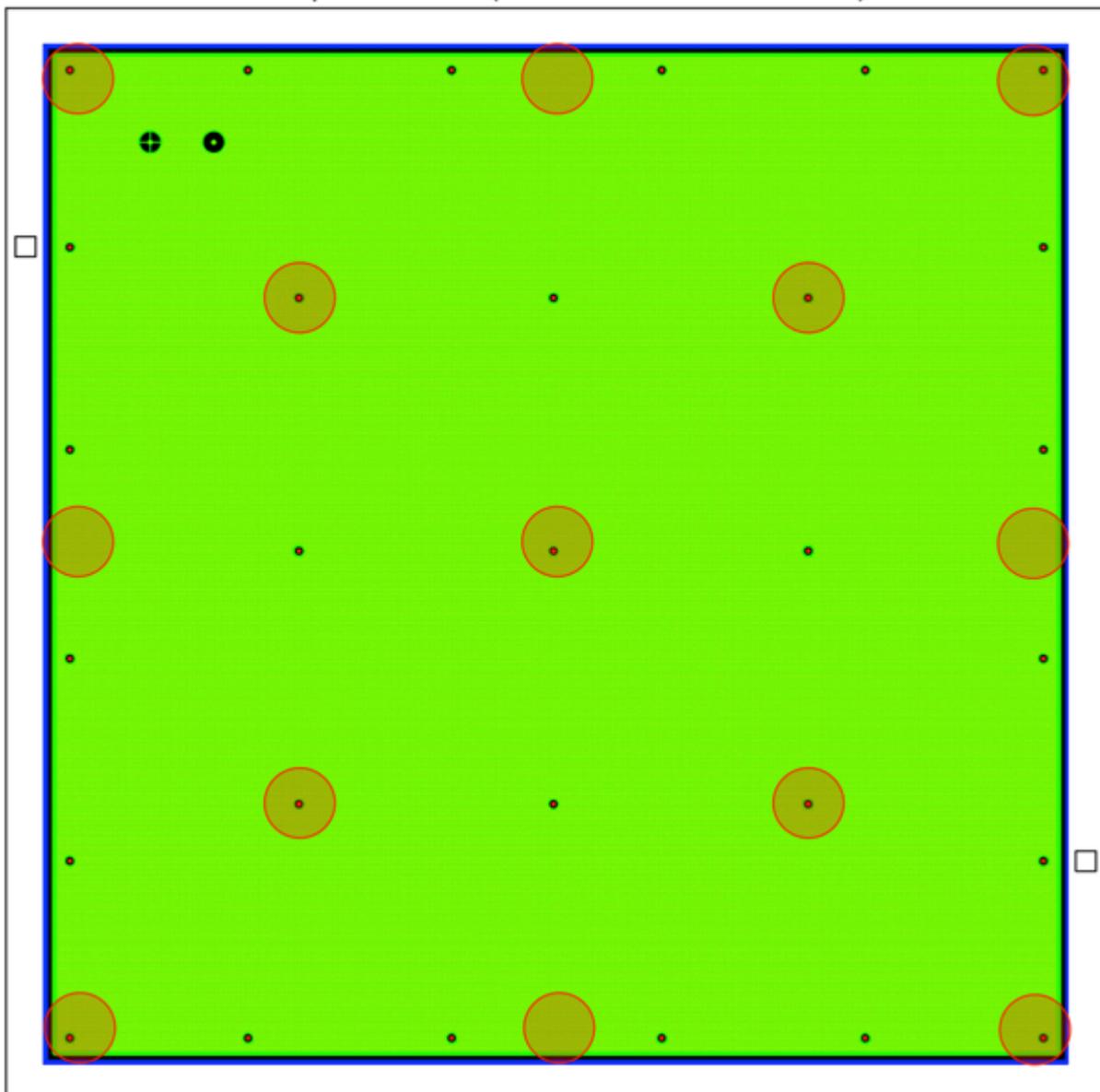


Figure 5. Localisation des zones de mesures d'épaisseur de la plaque de base d'epoxy cuivré et de mesures A.O.I des diamètres des trous « actifs » et des RIM (cercles rouges).

2/ Le Titulaire inspecte chaque LEM au moyen d'un équipement optique de type A.O.I pour mesurer le diamètre d'un trou « actif » et de son RIM dans chacune des 13 zones localisées sur la figure 5. Ces 13 mesures, et les 13 photos du trou mesuré, seront jointes à la FSFC associée à chaque LEM.

9.4 - **Contrôles et mesures sur les témoins pour coupes métallographiques**

Les 2 témoins de 10x10 mm² sont utilisés pour mesurer les épaisseurs de cuivre et Ni/Au, le diamètre et la forme des trous, la dimension et la forme des RIM, au moyen de coupes métallographique dont les résultats de mesure et des photos sont joints à la FSFC.

9.5 - **Contrôle d'isolement entre les 2 faces du LEM**

L'isolement entre les 2 faces du LEM est contrôlé avec un contrôleur d'isolement ou tout autre moyen de mesure adapté, en prenant le contact électrique sur la bordure de cuivre de 2 mm de large en périphérie du LEM. Des précautions seront prises pour ne pas rayer la surface du cuivre lors de cette opération. Le contrôleur d'isolement doit permettre une mesure sous une tension d'essai minimale de 500 V pour une mesure dans une gamme incluant 1 GOhm.

Un isolement mesuré inférieure à 1 GOhm est considéré comme une **non-conformité majeure**.

10 - **Recette**

La recette de chaque lot de 6 pièces est réalisée selon les modalités suivantes :

- Les résultats des contrôles et tests décrits au paragraphe 8 réalisés par le Titulaire sont soumis au CEA pour validation.
- Le CEA donne l'autorisation de livrer le lot de 6 LEMs.
- A réception des LEMs, le CEA réalise le test de tenue en tension des LEMs dans une enceinte remplie d'air synthétique (voir la description de ce test ci-dessous).
- Le CEA communique au Titulaire les résultats du test de chaque LEM et la liste des LEMs définitivement acceptés.

Tests de tenue en tension des LEMs :

Les LEMs sont testés dans une enceinte étanche conçue par l'équipe projet WA105 de l'IRFU et installée dans un local propre de classe 8. L'enceinte est remplie d'air synthétique. La tension entre les 2 faces du LEM est augmentée graduellement. Le courant débité par l'alimentation de tension et le nombre de claquages, identifiés par une augmentation importante et rapide du courant (de l'ordre du μ A), sont mesurés et enregistrés en continu. Un LEM passe le test si une tension de 3200 V au moins peut être maintenue pendant 15 minutes avec moins de 1 claquage par minute et un courant débité (hors claquages) inférieur à 1 nA. Ce seuil en tension de 3200 V est 30% inférieur à la tension atteinte par les LEMs prototypes dont les spécifications sont identiques à ceux faisant l'objet du présent cahier des charges.

11 - Emballage / Transport

L'emballage et la livraison sur le site du CEA Saclay sont de la responsabilité et à la charge du Titulaire.

11.1 - Emballage

Les LEM doivent être soigneusement emballés individuellement dans un papier dont la propreté aura été préalablement contrôlée (papier de soie type « salle blanche »), conditionnés dans un film plastique hermétique (type emballage sous vide) et maintenus entre 2 plaques de bois mélaminé rigides. Le conditionnement d'un lot est fait dans une caisse ou boîte en carton rigide avec toutes les protections mise en œuvre contre les chocs, les déformations, et les intempéries. Le contenu de la caisse doit être indiqué sur celle-ci, ainsi que la référence de la commande CEA.

11.2 - Transport

Le Titulaire assure le transport du matériel sur site. La livraison est effectuée au CEA Saclay (France). Le Titulaire prend à sa charge les assurances nécessaires pour garantir le matériel pendant le transfert entre ses ateliers et le site destinataire.

DRAFT DA du 10/02/2014

12 - Contenu du dossier de fabrication et de Contrôles

Le Dossier de Fabrication et de Contrôles, composé selon les paragraphes suivants, est constitué au fil de la livraison des lots de production et livré complet à la livraison du dernier lot de production.

> Sommaire général

Ce document est établi à partir du sommaire ci-après :

1. Plan Assurance Qualité (PAQ)
2. Liste des Sous-traitants et de leurs responsabilités
3. Liste des Opérations de Fabrication et de Contrôles (LOFC)
4. Procédures de Fabrication et de Contrôles
5. Certificats d'approvisionnement des plaques Epoxy
6. Fiches de suivi de fabrication et contrôles (FSFC) associées à chaque LEM
7. Registre des Non-Conformités
8. Procès Verbal de Recettes
9. Registre des Comptes Rendus de Réunions approuvés
10. Plans TQC avec la liste des modifications datées éventuelles

13 - Contenu du dossier de réponse à l'appel d'offre

Le soumissionnaire devra fournir les éléments.

1. Une offre chiffrée
2. Un Plan Assurance Qualité Particulier préliminaire (PAQp)
3. Une version préliminaire de Liste des Opérations de Fabrication et de Contrôles (LOFC)
4. Un descriptif des Procédures de Contrôles et Tests (listés au paragraphe 8)
5. Une version préliminaire de la Fiche de Suivi de Fabrication et Contrôles (FSFC)

14 - Représentants CEA

Correspondants technique

DELBART Alain (Chef de projet)
CEA Saclay
IRFU/SEDI
91191 Gif-sur-Yvette
FRANCE

Tél : 01 69 08 34 54
Fax : 01 69 08 30 24
Mél : alain.delbart@cea.fr
<mailto:patrice.charon@cea.fr>

MAZZUCATO Edoardo
CEA Saclay
IRFU/SPP
91191 Gif-sur-Yvette
FRANCE

Tél : 01 69 08 44 76
Mél : edoardo.mazzucato@cea.fr
<mailto:patrice.charon@cea.fr>

Correspondant commercial

Pour tous les aspects commerciaux, financiers ou juridiques :

BONINO Pierre
CEA Saclay
Service Commercial / BEPII
91191 Gif-sur-Yvette
FRANCE

Tél : 01 69 08 15 67
Fax : 01 69 08 87 72
Mél : pierre.bonino@cea.fr

Annexe 1: liste des fichier gerber fournis par le CEA

Version du 16 SEPTEMBRE 2016 : 6 fichiers

Nom du fichier	Description
« a.gbr »	Couche de gravure de la face TOP du LEM
« for.gbr »	Fichier de perçage
« p.gbr »	Couche de gravure de la face BOTTOM du LEM
quad_cli.gbr	
rout.gbr	
Serp.gbr	

DRAFT DA du 10/02/2017

Annexe 2: Photos d'exemples de non-conformités constatées sur prototypes

