



CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIERES

**Réalisation, fourniture et livraison de 45
cartes Front-End pour l'expérience LHCb au
CERN (Genève)**

CHAPITRES

I – Description de l'expérience

II – Description de l'environnement

III – Description technologique des cartes et mode de fabrication

IV – Déverminage

V – Test

VI – Assurance qualité

VII – Suivi et traçabilité

VIII – Processus d'exécution

IX – Suivi de fabrication

X – Conditionnement

XI – Livraison

ANNEXES :

- | | |
|---|-----------|
| 1 – Schéma de principe de la carte FE-LHCb | (1 page) |
| 2 – Schémas d'implantation : plan face 1 – plan face 2 | (4 pages) |
| 3 – Liste complète de tous les composants
(En vert et orange composants fournis par
IJCLab) | (2 pages) |

PREAMBULE

Le présent cahier des charges définit les exigences techniques nécessaires à la fabrication de cartes électroniques haute fiabilité en technologie mixte CMS.

Le degré de qualité nécessaire à la réalisation de ces cartes exige du soumissionnaire un savoir-faire dans le domaine de l'assemblage qu'il devra pouvoir faire valoir à travers des références de production en volume et performances similaires à celles décrites dans ce document. Il devra aussi mentionner ses certifications aux normes industrielles (certification ISO 9001 ou équivalent) pour l'assurance qualité au niveau production et la certification pour la garantie d'un savoir-faire dans l'assemblage des circuits électroniques de hautes performances (exemple type IPC 610 en précisant le niveau de classe).

I – Description de l'expérience

L'expérience LHCb est installée au CERN (Laboratoire de physique des particules) à Genève dans une des sections droites du collisionneur LHC. Cette expérience, située à environ 100 mètres sous la surface, comprend un calorimètre électromagnétique et un calorimètre hadronique qui mesurent l'énergie des photons, des électrons et des hadrons.

L'énergie des particules absorbée par les calorimètres est proportionnelle à la lumière produite dans des empilements de scintillateurs et d'absorbeurs. Cette lumière, d'abord transportée par fibres optiques, est transformée en impulsions électriques par un ensemble d'environ 7 500 photomultiplicateurs actuellement. Ce nombre sera augmenté à environ 10 000 en 2030.

Les impulsions électriques sont envoyées vers l'ensemble des cartes appelées Cartes de lecture ou « Front-End ». 244 cartes ont déjà été produites en 2020, et installées au CERN en 2022, et sont fonctionnelles depuis. Le nombre de cartes supplémentaires à produire pour équiper les nouveaux photomultiplicateurs en 2030 est au minimum de 45 cartes (Tranche Ferme). Une première pré-production de 2 cartes est demandée au titulaire. Une deuxième pré production de 16 cartes sera à réaliser ainsi qu'une troisième production de 27 cartes.

Les cartes utilisées pour les deux calorimètres sont identiques ; chaque carte reçoit les impulsions de 32 photomultiplicateurs.

Les cartes ont pour fonction d'amplifier les impulsions et de les numériser à la fréquence de 40 millions d'échantillons par seconde. Les informations digitales sont ensuite traitées en effectuant des calibrations, des additions, des comparaisons et en stockant les résultats dans des mémoires. Ces calculs complexes sont réalisés par des composants reprogrammables FPGA.

II – Description de l'environnement

Les cartes Front-End sont placées dans 22 châssis, pouvant contenir au maximum 16 cartes chacun et situés sur une plate-forme au-dessus des calorimètres.

Les châssis seront refroidis par une circulation d'air, l'air lui-même étant refroidi par un échangeur où circule de l'eau régulée en température ; la puissance dissipée dans chaque carte est inférieure à 40 Watts.

Les impulsions sont amenées aux cartes par des câbles coaxiaux. Les résultats des traitements de l'information réalisés dans les cartes sont sérialisés à 5Gbits/s et transmises par quatre fibres optiques en face avant des cartes vers le système d'acquisition situé en surface.

III – Description technologique des cartes et mode de fabrication

III.1 – Circuit Imprimé (CI)

La prestation attendue comporte la fourniture du circuit imprimé, dont la conception et le routage ont été effectués par l'IJCLab (dossier technique fourni par l'IJCLab) et dont le fournisseur, si ce n'est pas le Titulaire, doit être clairement indiqué dans son offre technique puis déclaré en tant que sous-traitant et devra respecter la certification ISO 9001 ou équivalent ainsi que les normes IPC-A-600K Classe 2, IPC-6011, IPC-6012, IPC-4101, IPC-4552 ou équivalentes. Chaque CI fera l'objet d'un certificat de conformité.

La dimension du circuit imprimé est 366 mm par 280 mm, épaisseur 2mm. Il faut prévoir un vernis épargne 2 faces et une sérigraphie sur les deux faces. La carte comporte 12 couches, l'isolement entre piste est de 120 microns minimums, la taille des pistes est de 110 microns et le perçage est de 0.25 mm

Le circuit devra être certifié sans halogène + HTG 150.

La carte comporte des circuits type BGA ainsi que des connecteurs de type pressfit. Le titulaire devra proposer une solution de fabrication compatible avec les spécifications techniques pour le soudage des BGA demandant une finition du type Ni – Au et celles des connecteurs pressfit demandant une finition spéciale.

Il est demandé un mode d'insertion automatique et le titulaire doit préciser si ce dernier est asservi par un système de contrôle de vitesse et/ou de pression d'insertion.

Les empreintes d'accueil ont été définies après réalisation d'une carte prototype. Elles sont conformes aux critères des assembleurs. Toute modification de ces empreintes doit faire l'objet d'une autorisation de notre part et être motivées par le titulaire.

Le CI sera soit fabriqué par le titulaire soit par un sous-traitant du titulaire. Chaque CI produit devra être identifié par un numéro unique par son fabricant. Cet identifiant devra être mentionné sur tous les documents de suivi inhérents aux procédures de tests et validations de ce CI.

Dans le cadre de la traçabilité du CI, le titulaire devra effectuer un contrôle des coupons à la réception des CI et fournira un compte-rendu de ce contrôle. La vérification des circuits imprimés sera basée sur l'utilisation de la norme IPC-A-600 K classe 2 ou équivalent. Les certificats de conformité liés à la production des circuits imprimés devront être fournis à l'IJCLab. Pour chaque circuit imprimé, le titulaire ou son sous-traitant devra porter une attention particulière à la vérification des points suivants :

- Planéité, dimensions et épaisseur du circuit imprimé.
- Centrage du perçage des via.
- Planéité et régularité de l'étamage.
- Lisibilité de la sérigraphie.
- Conformité du vernis épargne.

Les tests électriques de continuité et de court-circuit seront réalisés avec l'émission d'un rapport de test. Les rapports de test seront transmis à l'IJCLab.

Sur quelques échantillons le titulaire ou son sous-traitant devra effectuer des tests par coupe métallographique. Cela concerne :

- La mesure de l'épaisseur des couches.
- La vérification de la matière première.

Les points suivants devront être également testés :

- La vérification de la largeur et de l'espacement des conducteurs (BGA,...).
- La vérification des lignes à impédance contrôlée.

Pour chaque lot de fabrication, le titulaire devra faire subir sur un coupon des chocs thermiques et des mesures. Les coupons de test et les résultats d'essai devront être transmis à l'IJCLab.

L'ensemble des résultats des tests effectués sera à fournir en même temps que la livraison du lot de cartes finies concernées.

Si un circuit ne satisfait pas aux tests à 100%, il devra être écarté du lot et la fiche de suivi des tests doit être mise à jour (numéro de la carte défectueuse, raison du rejet). Aucune réparation de CI n'est autorisée sans l'accord exprès de l'IJCLab.

Le rapport de test défectueux sera envoyé en même temps que ceux de la série produite, IJCLab aura un mois pour faire un retour au titulaire sur la suite à donner...

III.2 – Composants

Ils sont définis dans la nomenclature jointe en annexe au présent CCTP. Tous les composants devront être RoHS.

Les composants majeurs de la carte sont fournis par IJCLab. Ces postes sont indiqués sur la nomenclature en annexe et sont :

- FPGA
- Composants CERN
- Carte mezzanine DCDC

Le titulaire est responsable de l'acquisition de tous les composants passifs et actifs non-fournis par l'IJCLab et stipulés dans la nomenclature en annexe. Le titulaire devra assurer la traçabilité de tous les composants au travers d'un logiciel de gestion de configuration.

Si un composant ne peut être livré à temps, ou si le titulaire ne le trouve pas, l'IJCLab doit être contacté au plus tôt afin de voir si ces composants peuvent être remplacés par d'autres références compatibles.

Nous attirons l'attention du titulaire sur la nécessité de gérer tous les composants, du fait de leur valeur par une traçabilité des composants reçus et un conditionnement adapté dont il précisera obligatoirement le niveau MSL et qui inclura par exemple un étuvage dans des armoires sèches et un stockage en sachets hermétiques. Le reliquat des composants fournis par l'IJCLab devra être restitué en fin de fabrication avec le dernier lot.

Ces dispositions, mises en place par le Titulaire afin de garantir l'intégrité de ces composants, doivent être clairement spécifiées dans sa réponse technique.

Pour des raisons de maintenance des cartes sur la durée de l'expérience, nous avons besoin de constituer un stock de composants. Pour chaque composant, le Titulaire devra donc intégrer dans sa fourniture 10% de composants en plus de la quantité nécessaire à la fabrication. Ces composants seront livrés en fin de fabrication avec le dernier lot, dans leurs conditionnements d'origine ou équivalents.

III.3 – Composants hors circuit imprimé

Cette prestation comprend le montage de la face avant et des équerres associées. Il comprend aussi le montage et vissage de certains composants comme indiqué dans la nomenclature.

Le fabricant des circuits imprimés ou des cartes pourra demander les modifications nécessaires au dossier technique fourni par IJCLab pour la fabrication, afin que celui-ci soit optimisé avec les process et les contraintes du titulaire ou de l'éventuel sous-traitant. Des modifications de

CAO pourront être proposées. Toutes les modifications seront soumises à l'accord express de l'IJCLab.

Le titulaire devra proposer une solution de face avant dont il assurera l'assemblage sur la carte. Sur la face avant et sur le circuit imprimé devra être apposé une étiquette autocollante avec un code d'identification unique, identique sur la face avant et sur le circuit imprimé.

Le titulaire assurera aussi le montage de la carte DCDC sur la carte mère.

Pour résumer : le titulaire doit préparer les fichiers détaillés de fabrication pour son système de production à partir du dossier technique fourni par IJCLab. Après l'approbation formelle de l'IJCLab, au cours d'une revue avec le titulaire, ces documents feront parties intégrantes du marché.

III.4 – Assemblage

Le nombre important de composants de type BGA implique l'utilisation de machines offrant les meilleures garanties de positionnement, de contrôle de valeur et polarité. Il est demandé au titulaire, dans la mesure du possible, de disposer sur les lieux de production d'une machine à rayons X.

La soudure des BGA devra pouvoir être contrôlée par rayons X par le titulaire en particulier pour les premières cartes produites et le résultat des tests sera intégré au compte-rendu fourni avec chacune d'elles.

Il devra préciser si le dépannage de BGA défectueux est effectué en interne ou en sous-traitance et quels sont les moyens dont il dispose pour le contrôle.

Les normes à respecter pour l'assemblage de CI sont les normes IPC-A-610H Classe 2, IPC/EIA J-STD-001G Classe 2 ou équivalentes.

III.5 – Brasage

La nécessité de l'adoption d'un process identique, pour la réalisation des cartes de la pré-production, et de la production, nous conduit à rejeter toute solution de brasage manuel pour les composants CMS.

Le titulaire devra indiquer clairement le « taux de void » qu'il peut assurer.

Le type de four utilisé devra être également précisé : convection forcée, inerte ou non, phase vapeur sous vide ou non.

IV – Déverminage

Le titulaire devra effectuer, par séries de 16 cartes, un déverminage sous tension. Ce déverminage inclut un contrôle des consommations avant et après variation rapide de température (VRT). Les alimentations nécessaires sont fournies par IJCLab ainsi qu'un générateur à 40 MHz utilisé pour l'injection d'une horloge.

Nous proposons au minimum le cycle suivant :

- Définition d'un cycle :
 - 0° - 3h
 - 40° - 3h
 - 70° - 3h
- Durée du déverminage : 72h soit 8 cycles

Le titulaire pourra proposer un cycle différent avec, en particulier, des variations de température plus rapides pour un meilleur déverminage.

Le déverminage nécessitant une mise sous tension et une fonctionnalité minimale de la carte, il sera procédé au préalable au déverminage, par le titulaire, à une programmation des FPGA avec le bus JTAG et les outils de programmation fournis par IJCLab. Cette opération prend environ 15 minutes par carte.

V – Tests

Il est prévu, à la charge du titulaire, deux niveaux de tests, pour toutes les séries de cartes. Ces tests seront effectués par le titulaire, avant l'expédition des cartes :

- Test 1 :

Contrôle des consommations (inclus dans le déverminage). La carte est alimentée par 3 sources de tension (+3,3V + 5V et +7V). Il sera demandé à l'issue de l'assemblage de procéder à une mesure de la consommation d'une carte.

Ces mesures seront conservées afin de les comparer avec une seconde mesure, toujours à la charge du titulaire, après vérification de la carte.

Toute carte, à l'issue de ce second contrôle, présentant une anomalie de consommation fera l'objet d'un diagnostic au sein de l'IJCLab.

- Test 2 : Takaya ou équivalent :

Ce test permet de tester des connecteurs en bord de carte et des zones inaccessibles.

Si une carte montée ne satisfait pas aux tests ci-dessus à 100%, elle devra être écartée du lot et la fiche de suivi des tests devra être mise à jour (numéro de la carte défectueuse, raison du rejet). L'IJCLab devra être tenue informée, et une décision sera prise après concertation avec le câbleur sur l'avenir de cette carte.

Si une reprise est possible, l'IJCLab devra préalablement fournir son accord pour l'opération, la carte reprise devra repasser tous les tests de validation et les fiches de suivi devront être mises-à-jour en conséquence. La norme à respecter pour la reprise d'assemblage des CI est la norme IPC 7711/21B classe 3.

Si la réparation n'est pas possible, certains composants devront être extraits de la carte défectueuse afin d'être assemblés sur d'autres cartes. La réutilisation d'un composant doit être spécifié sur la fiche de suivi de la carte receveuse.

Un composant ne pourra pas être installé sur plus de 2 cartes différentes.

Cette opération est censée rester exceptionnelle.

Un quatrième test d'admission sera effectué au laboratoire par l'IJCLab.

Les tests prévus pour l'admission consistent à faire fonctionner les cartes dans des conditions réalistes d'utilisation. Les FPGA de la carte seront programmés avec leur programme définitif et le traitement des données par la carte sera réalisé sur un banc de test dédié à IJCLab. Le bon fonctionnement de la carte sera validé ainsi que l'exactitude du traitement de données de test.

VI – Assurance qualité

La norme AFNOR ISO 9001 définit les exigences requises en matière de qualité. Nous avons relevé les points qui nous paraissent essentiels pour la bonne réalisation de ces cartes :

- ◆ Existence d'un manuel qualité.
- ◆ Définition écrite de la politique qualité de l'entreprise soumissionnaire (objectif, action corrective).
- ◆ Méthode d'identification et traçabilité des cartes : QR code, code barre etc...
- ◆ Désignation d'un chargé d'affaires.

VII - Suivi et traçabilité

Chaque carte devra être identifiée et accompagnée d'une fiche de fabrication (support informatique éventuellement).

Cette fiche comportera les points suivants :

- ◆ Identification du circuit imprimé et compte rendu.
- ◆ Date de réalisation.
- ◆ Condition de brasage (profil de chauffe).
- ◆ Résultat du contrôle par rayons X
- ◆ Nom du vérificateur.
- ◆ Commentaires après contrôle.

Nota : il n'est pas demandé l'identification des lots de composants.

Traitement des non-conformités

Il sera demandé au titulaire un suivi rigoureux de l'assemblage des cartes, avec en particulier les repères topographiques des composants changés.

Un examen régulier de ces fiches sera fait conjointement entre le titulaire et IJCLab.

En particulier, tout défaut récurrent pourra faire l'objet d'un arrêt de la production pendant le temps nécessaire à l'analyse des défauts, et pour effectuer les études éventuelles afin d'y palier.

Changement des composants défectueux

Niveau 1 :

Au cours de l'assemblage, il peut arriver que des composants soient cassés, des polarités inversées – des valeurs soient non conformes (liste non exhaustive)

Ces remplacements (achat, dessoudage et soudage) seront entièrement à la charge du titulaire pour la totalité des composants y compris ceux à la charge de l'IJCLab.

Niveau 2 :

Changement de composants jugés défectueux ou douteux après vérification et test fonctionnel.

Ces changements sont à la charge du titulaire jusqu'à hauteur en nombre de 3% pour les types de composants à la charge de l'IJCLab et doivent donc être inclus dans l'offre de prix des cartes.

Le remplacement des composants fournis par le titulaire sera exclusivement à sa charge.

VIII– Processus d'exécution

Le marché est composé de : **1 Tranche Ferme de 45 cartes comprenant :**

- ◆ Une série de qualification de deux cartes dites de pré-production (S1) inclus dans la Tranche Ferme.
- ◆ Une série de qualification de 16 cartes de pré production ayant passé le déverminage pour test d'un châssis complet (S2) inclus dans la Tranche Ferme.
- ◆ 27 cartes de production réparties en 1 série de 16 cartes et une de 11 cartes (S3) selon le calendrier d'exécution détaillé au CCAP inclus dans la Tranche Ferme.

Une tranche optionnelle 1 (S1') comprenant :

Une deuxième série de qualification de deux cartes de pré-production, conditionnée aux résultats obtenus par la première série et à leurs performances (S1'). Cette seconde série est optionnelle (Tranche Optionnelle 1) et n'est donc pas incluse dans le total des quarante-cinq cartes à réaliser.

Une tranche optionnelle 2 (S2') comprenant :

- ◆ Une deuxième série de qualification de 16 cartes de pré production conditionnée aux résultats obtenus par la première série et à leurs performances (S2'). Cette seconde série est optionnelle (Tranche Optionnelle 2) et n'est pas incluse dans le total des quarante-cinq cartes à réaliser.

Une tranche optionnelle 3 (S3) comprenant :

- ◆ 60 cartes de production réparties en 3 séries de 16 cartes et 1 série de 12 cartes (S4), optionnelles (Tranche Optionnelle 3) suivant les besoins de l'expérience, selon le calendrier d'exécution détaillé au CCAP.

IX – Suivi de fabrication

IX.1 – Tranche Ferme : Séries de qualification de deux cartes de pré-production (S1)

Vérification en usine des deux cartes de pré-production par le titulaire

- ◆ Contrôle visuel
- ◆ Examen des fichiers de fabrication

Le délai de vérification par IJCLab de cette série (S1) est de 10 semaines à compter de la date de livraison.

- ◆ Test fonctionnel, performance et validation.

En cas de non-conformité une seconde série de qualification de pré-production de deux cartes (S1') pourra être demandée (Tranche Optionnelle N°1). Le délai de vérification de cette série (S1') par IJCLab est de 5 semaines à compter de la date de livraison.

IX.2 – Tranche Ferme : Série de qualification de 16 cartes de pré production (S2)

Vérification en usine des 16 cartes par le titulaire

- ◆ Contrôle visuel
- ◆ Programmation des FPGAs avec les outils de programmation fournis par l'IJCLab
- ◆ Examen des tests de consommation avant et après déverminage

Le délai de vérification par IJCLab de cette série (S2) est de 5 semaines à compter de la date de livraison.

- ◆ Test fonctionnel, performance et validation. Les performances analysées devront être au même niveau que celles des 2 cartes de pré-production (S1) (voir tests laboratoire, série de deux cartes de pré-production).

En cas de non-conformité une seconde série de qualification de seize cartes de pré-production (S2') pourra être demandée (Tranche Optionnelle N°2). Le délai de vérification par IJCLab de cette série (S2') est de 5 semaines à compter de la date de livraison.

IX.3 – Tranche Ferme : Séries de production de 27 cartes (S3)

Le cadencement de la production se fera en une série de 16 cartes et une série de 11 cartes à produire en une semaine chacune.

Vérification en usine des séries par le titulaire

- ◆ Contrôle visuel
- ◆ Programmation des FPGAs avec les outils de programmation fournis par l'IJCLab
- ◆ Examen des tests de consommation avant et après déverminage

Évaluation en laboratoire par l'IJCLab

- ◆ Test fonctionnel, performance et validation. Les performances analysées devront être au même niveau que celles des cartes dites de pré-production

Les tests des cartes se feront au fur et à mesure de leur livraison.

Les cartes en panne, pour les petites interventions ne nécessitant pas d'appareillage spécifique, pourront être réparées au laboratoire par l'IJCLab.

Les cartes nécessitant une intervention complexe seront renvoyées pour réparation au fur et à mesure du déroulement des tests.

L'admission définitive par IJCLab de cette série (S3) sera faite 25 semaines après la livraison de la dernière série de cartes.

IX.4 – Séries de production de 60 cartes (S4) en Tranche Optionnelle (TO N°3)

- ◆ 60 cartes réparties en 3 séries de 16 cartes et une série de 12 cartes (S4), optionnelles suivant les besoins de l'expérience, selon le calendrier d'exécution détaillé au CCAP.

Le cadencement de la production se fera par série de 12 ou 16 cartes à raison de 2 séries par semaine.

Vérification en usine des séries de 12 ou 16 cartes par le titulaire

- ◆ Contrôle visuel
- ◆ Examen des tests de consommation avant et après déverminage

Évaluation en laboratoire par l'IJCLab

- ◆ Test fonctionnel, performance et validation. Les performances analysées devront être au même niveau que celles des cartes dites de pré-production

Les tests des cartes se feront au fur et à mesure de leur livraison.

Les cartes en panne, pour les petites interventions ne nécessitant pas d'appareillage spécifique, pourront être réparées au laboratoire par l'IJCLab.

Les cartes nécessitant une intervention complexe seront renvoyées au titulaire pour réparation au fur et à mesure du déroulement des tests.

L'admission définitive par IJCLab de cette série (S4) sera faite 25 semaines après la livraison de la dernière série de cartes.

X – Conditionnement

Chaque carte doit faire l'objet au minimum d'un emballage antistatique individuel.
L'identification de la carte devra figurer clairement sur le dessus de l'emballage.

XI – Livraison

L'adresse de livraison :

Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène
Joliot Curie
Bâtiment 100M
15 rue Georges Clémenceau
91405 Orsay
France