



HAL
open science

Corrélateurs du Futur

Benjamin Quertier, S. Gauffre, Ph. Cais

► **To cite this version:**

Benjamin Quertier, S. Gauffre, Ph. Cais. Corrélateurs du Futur. Les Journées Scientifiques ” Les radiotélescopes du futur: technologies et avancées scientifiques ” Cnam Paris 29 et 30 mars 2011, 2011, Paris, France. hal-00623396

HAL Id: hal-00623396

<https://hal.science/hal-00623396>

Submitted on 27 Oct 2011

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.

Corrélateurs du Futur

Next Generation Correlator

B. Quartier^{1,2}, S. Gauffre^{1,2}, P. Caïs^{1,2}

¹ Université de Bordeaux, Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers, 2 rue de l'Observatoire, BP 89, F-33271 Floirac Cedex, France, quartier@obs.u-bordeaux1.fr

² CNRS, UMR 5804, Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux, 2 rue de l'Observatoire, BP 89, F-33271 Floirac Cedex, France

Mots-clefs : ALMA, Corrélateur, Convertisseur Analogique Numérique, Uniboard

Keywords : ALMA, Correlator, Analog to Digital Converter, Uniboard

Résumé

Le Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux (LAB) a contribué techniquement au projet ALMA à travers la conception de deux sous-systèmes de l'interféromètre : les convertisseurs analogiques numériques (CAN) et les bancs de filtres numériques. Les spécifications de ces deux sous-systèmes ont une incidence directe sur l'architecture du corrélateur, particulièrement les filtres numériques qui sont à l'origine des nombreux modes d'observation proposés et des performances spectrales de l'instrument. Par ses performances et sa prochaine ouverture à la communauté scientifique, le corrélateur ALMA est un corrélateur du futur, cependant des technologies plus avancées que celles mises en œuvre pour sa conception sont d'ores et déjà disponibles. De nouveaux développements sont donc en cours au LAB afin de préparer la prochaine génération d'instrument.

Introduction

La question très large « des corrélateurs du futur » sera traitée au travers du prisme des développements techniques réalisés au LAB, en particulier dans le cadre du projet ALMA. Le corrélateur ALMA[1], dont l'ouverture scientifique est programmé pour 2013, propose un niveau de performances et une souplesse d'analyse qui permettent de le considérer comme un parfait exemple d'instrument du futur. L'architecture du corrélateur et les modes d'observations seront décrits. Le sous-système de filtrage numérique appelé Tunable Filter Bank (TFB), développé au sein du LAB, fera l'objet d'une description plus détaillée, car il est au cœur du fonctionnement du corrélateur. Il est aussi le sous-système du corrélateur le plus récent, ce qui permettra une comparaison instructive avec les nouveaux développements techniques réalisés dans le cadre du projet européen Uniboard, financé par le FP7 au travers de Radionet. En effet si les performances du corrélateur ALMA en tant que système sont remarquables et devraient rester inégalées à moyen terme, les technologies mises en œuvre lors sa conception au cours des années 2000 sont aujourd'hui bien souvent dépassées. Les facteurs d'échelle entre les ressources et les interfaces de la carte ALMA TFB et celles de la carte Uniboard donne une idée du futur des corrélateurs.

1. L'instrument ALMA

ALMA est un double réseau interférométrique qui combine les signaux millimétriques et sub-millimétriques capturés respectivement par 50 et 16 antennes, déployées sur le site de Chajnantor au Chili. Cet instrument se caractérise donc par une grande sensibilité et de multiples capacités d'imagerie. Les 2 réseaux d'antennes, s'ils disposent de 2 corrélateurs totalement distincts présentent des caractéristiques équivalentes pour toute la partie d'électronique analogique, depuis les récepteurs jusqu'aux CAN. La numérisation du signal s'effectue aux moyens de circuits électroniques spécialement dessinés pour ALMA par le LAB. Il s'agit en effet de circuits fabriqués chez STmicroelectronics permettant de numériser les 264 bandes de base de 2GHz dans 2 polarisations. Cette opération

s'effectue à 4 Giga échantillons par seconde (GS/s) et génère des échantillons numériques codés sur 3 bits – 8 niveaux. Tous ces signaux numériques sont transmis par fibre optique depuis chacune des 56 antennes jusqu'au bâtiment technique sur le site d'opérations ALMA (AOS) pour être combinés respectivement par le corrélateur du réseau principal et du réseau compact. La suite de l'article se concentre sur le corrélateur du réseau principal auquel le LAB a fortement contribué.

2. Le corrélateur ALMA

2.1. Architecture du corrélateur ALMA

Les principales spécifications du corrélateur ALMA sont résumées dans la table 1 ci-après. Le corrélateur permet l'analyse d'une très large bande (16GHz à travers deux polarisations) pour 64 antennes et offre de nombreuses possibilités spectrales : résolution fine ou large, positionnement libre des fenêtres d'analyse et diverses sensibilités.

	Spécification
Antennes	≤ 64
Bande de base par antenne	8 x 2GHz
Numérisation	3 bits / 8 niveaux à 4G S/s
Format de corrélation	2 bits / 4 niveaux, 4 bits / 16 niveaux, 3 bits / 8 niveaux
Horloge	125MHz
Ligne de base maximale	30km
Nombre de points spectraux par bande de base (FDM)	≤ 8192
Nombre de points spectraux par bande de base (TDM)	≤ 256
Produits de polarisation	1, 2 ou 4

Table 1. Principales spécifications du corrélateur ALMA

L'architecture initialement imaginée par le NRAO correspond à un corrélateur de type XF (corrélation puis transformée de Fourier) où les fonctions de corrélations sont calculées sur la largeur totale de la bande numérisée. L'électronique fonctionnant à 125MHz alors que le signal doit être traité à 4GS/s, 32 plans de corrélateur travaillant en parallèle sur des tranches temporelles adjacentes de signal sont nécessaires pour réaliser l'analyse spectrale. Ce mode d'analyse est appelé Time Division Mode (TDM). Dans le concept européen, initialement proposé dans le contexte d'un corrélateur de seconde génération, la bande numérisée est découpée en tranches fréquentielles (sous-bandes), individuellement corrélées, l'architecture est dite HXF (pour Hybrid XF). Ce mode d'analyse appelé Frequency Division Mode permet d'adapter la vitesse du corrélateur à la largeur de bande à traiter et ainsi d'offrir des résolutions spectrales extrêmement fines sur de très larges bandes (de quelques kHz à quelques MHz sur des bandes de quelques dizaine de MHz à plusieurs GHz) et une grande souplesse d'analyse [2]. La complexité du système de filtrage numérique traitant le signal en amont du corrélateur est la contrepartie à de telles performances.

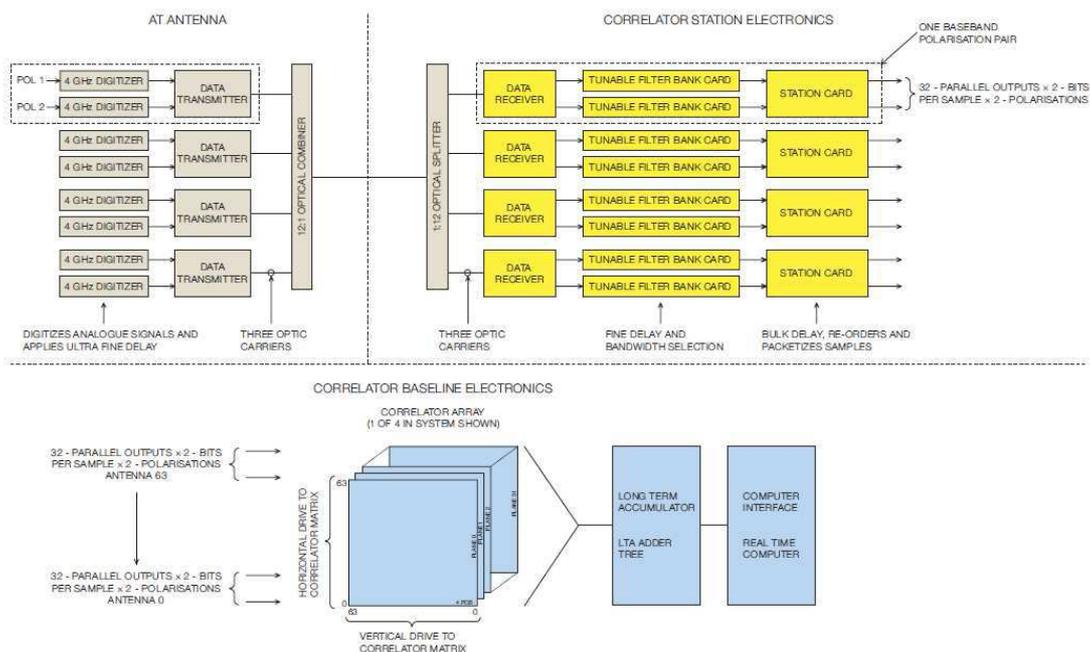


Figure 1. Schéma fonctionnel du corrélateur ALMA
(adapté de Escoffier R., Webber J. and Baudry A. in ALMA-60.00.00.00-001-C-SPE document)

Le LAB a développé et produit les 512 cartes Tunable Filter Bank (TFB) permettant aujourd'hui au corrélateur ALMA d'opérer dans les deux modes d'analyse TDM et FDM pour un réseau maximum de 64 antennes. La Figure 1 ci-après représente les principales fonctions du système ALMA depuis la numérisation du signal et principalement au sein du corrélateur. Chaque bande de base de 2 GHz est numérisée, transmise par fibre optique, 32 fenêtres d'analyse indépendantes de 62.5MHz peuvent ensuite être sélectionnées grâce au système TFB avant d'être individuellement corrélées (en mode FDM). Un processus mathématique complexe permet ensuite (software post-corrélation) de recoller les différentes sous-bandes afin de représenter avec une grande précision la fenêtre effective souhaitée par l'astronome.

2.2. Détails techniques

Le transport du signal au sein du corrélateur est particulièrement problématique. Le système complet doit corrélérer toutes les lignes de base d'un réseau comportant un maximum de 64 antennes générant 4 bande de base x 2 polarisations x 32 sous-bandes. La transmission des signaux entre cartes s'effectue en différentiel à 250MHz, et nécessite 16384 câbles. La phase du signal en sortie de chaque câble est vérifiée et ajustée automatiquement afin d'obtenir une transmission optimale. Le corrélateur est organisé en quadrants, chaque quadrant traite le signal capturé par l'ensemble du réseau d'antenne pour une bande de base et 2 polarisations.

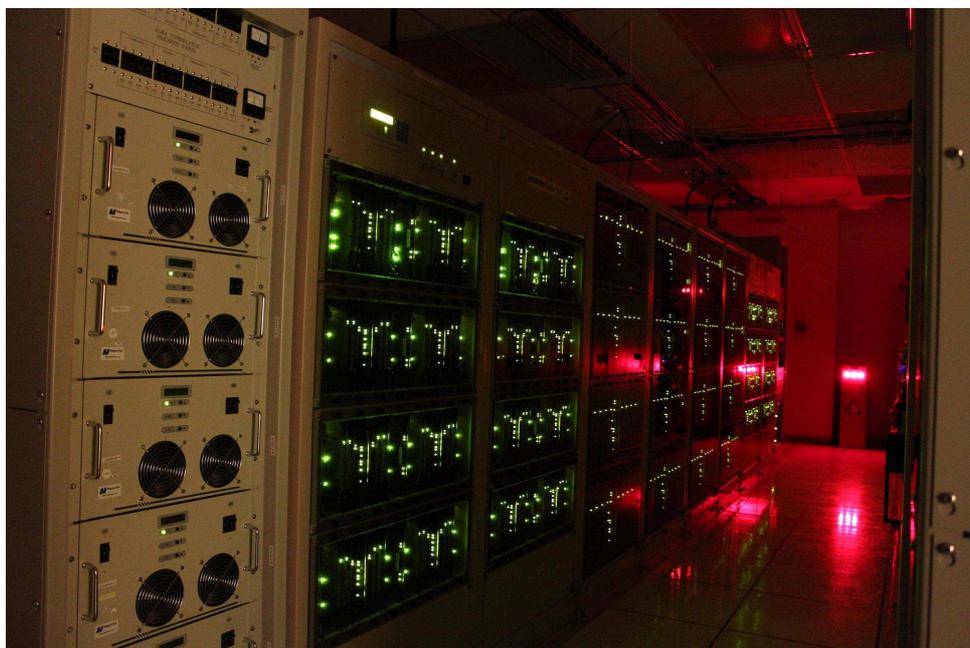


Figure 2. Photographie (tiré de [1]) d'un quadrant du corrélateur dans le bâtiment technique de l'AOS sur le site ALMA. Le système complet comprend 4 quadrants identiques.

Un autre point critique est la dissipation de puissance qui impacte la fiabilité à long terme du corrélateur. Cette question a fait l'objet de nombreux efforts afin d'optimiser la circulation d'air au sein du corrélateur mais aussi en terme d'algorithme implanté dans les composants électroniques. Au final le système corrélateur complet dissipe 130kW pour une puissance de calcul de 17×10^{15} opérations par seconde pour la corrélation 2 bits et environ 10^{15} multi-bits opérations par seconde pour le système de filtrage. Le système TFB a été particulièrement concerné par cette problématique car s'il a permis d'accroître les performances du concept initial d'un facteur 32, il nécessite également une puissance de calcul importante. Dans sa première version une carte TFB dissipait 150W, un changement de technologie et un nouvel algorithme ont permis de limiter la consommation à 60W et de conserver la température de jonctions des composants FPGAs dans la gamme conseillée ($<70^{\circ}\text{C}$) [3]. Le traitement du signal implanté dans les FPGAs pour extraire une sous-bande est représenté schématiquement en Figure 3 : le signal est d'abord traité par un système oscillateur local / mélangeur permettant un positionnement spectral de la fenêtre d'analyse, le signal complexe généré est traité identiquement sur les voies réelles et imaginaires par 3 étages de filtrages cascades, le signal est ensuite converti en signal réel et re-quantifié pour s'adapter au format de corrélation.

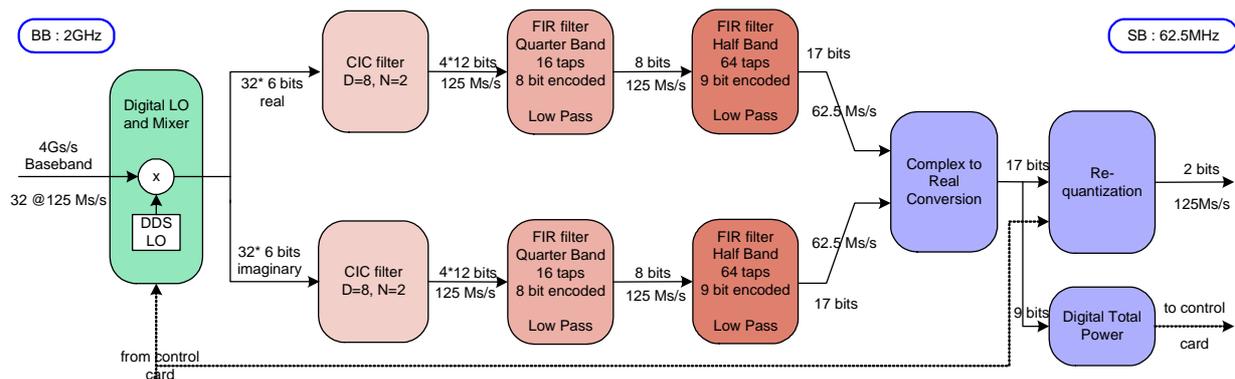


Figure 3. Schéma fonctionnel du système TFB

2.3. Les modes d'observation

Le corrélateur ALMA supporte deux modes d'observations principaux : TDM et FDM. Les modes TDM sont idéaux pour des observations nécessitant des « dump time » rapides (16ms en cross-corrélation) et des résolutions spectrales « modestes ». Les nombreux modes FDM permettent d'obtenir de très bonnes résolutions spectrales nécessaires aux observations spectroscopiques sur diverses largeurs de bande. Il existe également plusieurs possibilités en termes de sensibilité : en FDM des modes « twice nyquist » et « 4 bits x 4 bits » permettent d'accroître la sensibilité au détriment de la résolution, de la largeur de bande ou du nombre de produits de polarisation, comme les modes « 3 bits x 3 bits » en TDM. D'une manière générale les 71 modes proposés par le corrélateur correspondent à une répartition différente des ressources du corrélateur sur les sous-bandes générées par le système de filtrage. Initialement, seuls 21 modes seront disponibles pour les premières observations scientifiques «ALMA Early Science » (cf Table2).

Largeur de bande effective (MHz)	Résolution spectrale (kHz)								Résolution spectrale (MHz)			
	Frequency Division Mode									Time Division Mode		
	7.6	15.3	30.5	61	122	244	488	977	7.8	15.6	31.3	
1800						1	2	4	1	2	4	
938					1	2	4					
469				1	2	4						
234			1	2	4							
117		1	2	4								
62.5	1	2	4									

Table 2. Les 21 modes d'observation disponibles pour ALMA Early Science.

Pour une largeur de bande donnée la résolution spectrale dépend du nombre de produits de polarisation (1, 2 ou 4).

Les modes « basiques » présentés précédemment s'appliquent à des fenêtres uniques de dimension comprise entre 31.25MHz et 2GHz. Le corrélateur ALMA offrira également à terme (certains développements du système informatique sont encore nécessaires) des modes plus évolués, notamment :

- le corrélateur peut opérer des analyses simultanées sur plusieurs fenêtres disjointes, le nombre de fenêtres étant limité à 4 et chaque fenêtre doit avoir une dimension multiple de 62.5MHz.
- des modes multi-résolutions spectrales sont également possibles, chaque quadrant du corrélateur peut en effet être découpé en plusieurs sous-unités opérant dans des modes basiques différents.
- Des sous-réseaux d'antennes pourront également être définis et les ressources du corrélateur seront partagées pour former des corrélateurs indépendants opérant sur chaque sous-réseau.

Certains modes « avancés » envisagés ne sont pas encore pleinement supportés par le système informatique et la faisabilité de certains doit encore être étudiée, notamment pour ce qui concerne les débits de données générés. A ce titre le corrélateur ALMA demeure un instrument du futur.

3. La future génération d'instrument

3.1. Les enjeux

Bien qu'à l'état de l'art au moment de leur conception, de nombreux sous-systèmes de l'instrument ALMA utilisent des technologies, qui ne sont plus aujourd'hui, les plus performantes. En effet, la plupart des cartes électroniques du

corrélateur ont été développées il y a environ 10 ans, la plus récente (la carte TFB) a été produite entre 2006 et 2008. Les ASICs ALMA (CAN et corrélateur) utilisent une technologie 0.25µm, les FPGAs du corrélateur utilisent le plus souvent des technologies de l'ordre de 0.15µm, le système TFB une technologie 90nm. Aujourd'hui des technologies CMOS 65nm sont disponibles pour développer des ASICs et les FPGAs les plus récents sont fabriqués en 28nm. Une nouvelle génération de CAN permettrait de numériser des bandes encore plus larges, donc de simplifier grandement le dessin des systèmes de découpe et descente en fréquence, mais aussi d'augmenter la sensibilité du corrélateur en travaillant avec une plus grande dynamique de signal. En particulier un CAN capable de numériser la totalité de la bande de 8GHz délivrée par les récepteurs permettrait de s'affranchir totalement des étages de découpe et descente en fréquence du back-end, améliorant la reproductibilité des traitements opérés sur les différents bras de l'interféromètre. De nouveaux prototypes de CAN sont actuellement en cours de développement au LAB, les fréquences visées sont au minimum de 8GS/s et le format supérieur à 3 bits. Les finesses de gravure des composants numériques ont également largement évoluées, modifiant les possibilités d'analyse spectrale des prochains corrélateurs. Enfin la transmission des signaux numériques a été révolutionnée par la démocratisation des liens série rapides, or les débits de données générés par un radiotélescope (notamment dans le corrélateur) constituent un défi pour chaque génération d'instrument. A l'époque l'architecture XF avait été préférée et sélectionnée par l'équipe du NRAO, notamment sur des critères liés au nombre de connexions physiques à réaliser pour transporter le signal au sein du corrélateur.

3.2. L'exemple du projet Uniboard

Dans le cadre du projet Radionet / FP7, un consortium d'instituts* développe depuis 2009 une carte numérique générique pour le traitement du signal en radioastronomie. Cette carte, de taille standard utilise des composants numériques programmables (FPGAs) à l'état de l'art afin d'offrir une très grande puissance de calcul et des débits d'interface très élevés. Des algorithmes de traitement du signal (firmwares) sont également développés dans l'optique de rénover le corrélateur de JIVE. Cette plateforme devrait également être utilisée pour les projets APERTIF et LOFAR. Les principales fonctionnalités envisagées sont : « digital baseband converter », « beamformer », « RFI mitigation », « corrélation ». La Figure 3 donne un aperçu de la carte Uniboard, peuplée de 8 FPGAs, de modules de mémoire externe et disposant de diverses interfaces. La consommation grossièrement estimée à ce jour pour la carte est de 280W.

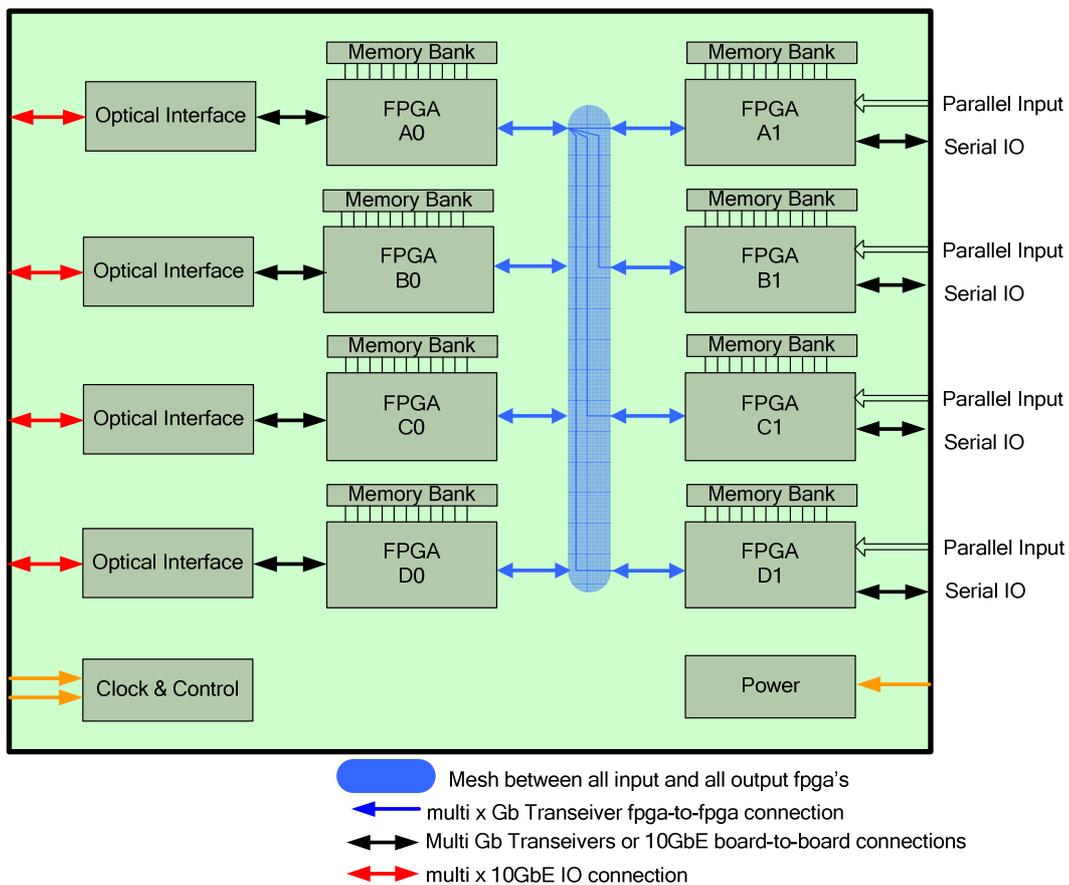


Figure 4. Représentation schématique de la carte Uniboard

* JIVE, ASTRON, University of Manchester, Arcetri-INAF, LAB-Université de Bordeaux 1, Nancay-Université d'Orléans, KASI

La Table 3 ci-après donne un aperçu des ressources disponibles respectivement avec la carte ALMA TFB et avec la carte Uniboard, elle fait apparaître en moyenne un facteur 10 entre les deux. Si on écarte de la comparaison les modules de mémoire externe (dont la carte TFB n'est pas équipée), le facteur d'échelle le plus important concerne les débits potentiels des interfaces. En effet entre les 2 générations de FPGAs, la principale différence concerne l'apparition de liens série rapides, les autres types de ressources ayant « simplement » bénéficiés de l'avancée de la technologie. Ces nouveaux liens rapides supportent de nombreux protocoles de communication et leur utilisation devrait impacter grandement la transmission des signaux numériques des CANs vers les corrélateurs et en interne aux corrélateurs, de carte à carte, ou entre composants numériques. Le LAB qui poursuit ses développements liés aux CANs et aux systèmes de traitement numérique, prête une attention particulière à cette nouvelle technologie. Dans le cadre d'Uniboard, le LAB a dessiné en collaboration avec Arcetri un nouveau système de filtrage [4], dont les performances sont sensiblement 2 fois supérieures à celles d'ALMA. (une version avec un gain de facteur 4 est prévue). Précisons que ce « design » n'utilise qu'une faible proportion des ressources disponibles : pas de mémoire externe et moins de 50% des ressources FPGAs. Enfin les micro-contrôleurs embarqués sont apparus dans les dernières années de développement d'ALMA, ils sont maintenant des fonctions usuelles dans les FPGAs. Leur utilisation devrait permettre de simplifier la problématique de contrôle et de paramétrage des grands corrélateurs. En effet la disponibilité d'un grand nombre de modes d'observations est synonyme de très nombreux paramètres à configurer dans l'ensemble des composants numériques opérant au sein du système de filtrage et du corrélateur.

	Carte ALMA TFB	Carte Uniboard	Facteur d'échelle
Nombre de FPGAs	16	8	0.5
Technologie	90nm	40nm	~0.5
Cellules logiques	~35k x 16	~180k x 8	~2.5
Mémoires	~1.4Mb x 16	~30Mb x 8 (+32Gb x 16 [*])	~10
MAC	32 x 16	644 x 8	~10
Interface	160 lignes ~125MHz	128 lignes ≤ 1.6Gb/s 64 lignes ≤ 6.375Gb/s 16 lignes ≤ 10.325Gb/s	~40

Table 3. Comparatif des cartes ALMA TFB et Uniboard

4. Conclusion

Entre 2008 et 2010, les 3 premiers quadrants du corrélateur ALMA ont été installés dans le bâtiment technique de l'AOS. Pour l'ouverture à la communauté scientifique, prévue en 2013, des opérations à 2 quadrants seront possibles. Elles permettront, associées à un système de contrôle software adéquat actuellement en développement, de traiter jusqu'à 32 antennes et 4 bandes de base. A terme, le corrélateur ALMA offrira 71 modes d'observations « basiques » et une multitude de modes avancés dont le multifenêtrage, la multi-résolution et le « sub-arraying ». Ces fonctionnalités avancées et les performances spectrales du corrélateur ALMA sont remarquables et font de ce système un instrument du futur. Cependant de nouvelles technologies sont d'ores et déjà disponibles et permettent d'envisager une nouvelle génération d'instruments. Évidemment l'accroissement de la puissance de calcul, liée à la finesse de gravure, est un enjeu essentiel, mais l'apparition des liens série rapides pourrait s'avérer plus importante encore, car elle permet de reconsidérer l'architecture même du corrélateur. Les microcontrôleurs embarqués, quant à eux, devraient faciliter les opérations de contrôle et de paramétrage de ces instruments toujours plus versatiles.

Références bibliographiques

- 1- The ALMA Correlators, A. Baudry, ALMA Newsletter, January 2011, No 7, p. 18
<http://www.almaobservatory.org/en/outreach/newsletter/252-newsletter-no-7>
- 2- Enhancing the Baseline ALMA Correlator Performances with the Second Generation Correlator Digital Filter System, B. Quertier, G. Comoretto, A. Baudry, A. Gunst, A. Bos, ALMA Memo n°476, 2003
<http://www.alma.nrao.edu/memos/html-memos/abstracts/abs476.html>
- 3- The new 3 stage, low dissipation digital filter of the ALMA correlator, P Camino, B. Quertier, A. Baudry, G. Comoretto, D. Dallet, ALMA Memo n°579, 2008
http://science.nrao.edu/alma/aboutALMA/Technology/ALMA_Memo_Series/alma579/abs579.shtml
- 4- Uniboard digital receiver initial design document, G. Comoretto, A. Russo, G. Tuccari, A. Baudry, P. Camino, B. Quertier, 2010
<http://www.arcetri.astro.it/science/Radio/instr/uniboard/GeneralDescription.pdf>

* il ne s'agit pas de la mémoire du FPGA mais de modules externes