

Etat des lieux de la logique RSFQ pour les applications spatiales

[Review of RSFQ logic for space applications]

Youssef Kebbati

Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace LPC2E-CNRS,
Université d'Orléans/Observatoire des Sciences de l'Univers en Région Centre OSUC,
LPC2E 3A, avenue de la recherche scientifique,
Orléans, France

Copyright © 2019 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The state of the art of RSFQ logic shows that this technology is viable for different areas of application. In fact, we have seen a significant increase in the number of circuits developed over the past twenty years, and the performances achieved: speed, power consumption, integration density and also in terms of technology: new JJ, submicron technologies ... the space domain, this technology has not yet found its place and this despite the need for more and more important in terms of computing power. The generation of cold remains the main lock of this technology. In this article, we will list missions carrying cooled instruments that could integrate the logic of the RSFQ. We will then expose the scientific objectives and the space agencies concerned.

KEYWORDS: RSFQ logic, space missions, superconducting technology, microelectronics technology, RSFQ design flow.

RÉSUMÉ: L'état de l'art de la logique RSFQ montre que cette technologie est viable pour différents domaines d'application. En effet, nous assistons, depuis les deux dernières décades, à une augmentation importante du nombre de circuits développés, des performances atteintes : vitesse, puissance consommée, densité d'intégration et aussi en termes de technologie : nouvelles JJ, technologie submicronique... Toutefois dans le domaine spatial, cette technologie n'a pas encore trouvé sa place et cela malgré les besoins de plus en plus importants en termes de puissance de calcul. La génération du froid restant le principal verrou à cette technologie. Dans cet article, nous listerons les missions qui embarquent du froid et susceptible d'intégrer la logique RSFQ. Nous exposerons alors les objectifs scientifiques et les agences spatiales concernées.

MOTS-CLEFS: Logique RSFQ, missions spatiales, technologie supraconducteur, technologie microélectronique, flot de conception RSFQ.

1 INTRODUCTION

Dans une précédente publication dans le même journal [1], nous avons fait un état des lieux des capteurs refroidis dans le domaine spatial. Dans cet article, nous allons traiter « l'autre extrémité » de la chaîne instrumentale à savoir les circuits numériques. En effet, La logique RSFQ (*Rapid Single Flux Quantum*) est une technologie supraconductrice pour les circuits intégrés numériques. Cette technologie a permis d'atteindre des performances encore inégalées en technologie microélectronique CMOS classique seulement avec un modeste nombre de chercheur dans le monde. Cet accomplissement est dû en partie à un ensemble de caractéristiques inhérentes, qui se manifestent au niveau circuit, à savoir la rapidité de calcul avec une faible puissance consommée, la simplicité de fabrication, l'exactitude du quantum. Dans cet article, nous n'aborderons pas la technologie Qubits pour son manque actuel de maturité nécessaire au domaine spatial.

2 AVANTAGES DE LA LOGIQUE RSFQ

Depuis la découverte de la supraconductivité et de la jonction Josephson (JJ) dans les années 1960, une nouvelle aire de la microélectronique est apparue. En effet, les circuits intégrés supraconducteurs actuels utilisent les caractéristiques inhérentes à la JJ pour atteindre des performances (rapidité de traitement des données à haute fréquence, une faible dissipation de puissance...) jusqu'alors inégalé par les circuits CMOS. Ces caractéristiques peuvent être résumées [2]:

- Disponibilité de lignes de transmission supraconductrice *microstrip* capables de transférer des ondes picosecondes avec une vitesse approchant celle de la lumière.
- Les JJ peuvent être utilisées comme interrupteur/mémoire ultrarapide (~ picoseconde).
- Les JJ peuvent être facilement adaptés en impédance avec les lignes microstrip ce qui permet un transfert balistique des ondes générés. Ainsi, les JJ ont une dissipation de puissance très faible de par les faibles tensions utilisées.

L'élément élémentaire RSFQ consiste en un interféromètre composé d'une diode Josephson couplée avec un élément inductif supraconducteur et des lignes de transmission à base de diodes Josephson. Cette architecture permet de transférer ou de mémoriser une impulsion logique (quanta de flux magnétique) sans atténuation ou distorsion à des fréquences de plusieurs centaines de gigahertz (~ 750 GHz) et avec une puissance consommée extrêmement faible (< 100 nW/porte). Par ailleurs à la différence de la JJ, les circuits RSFQ nécessitent uniquement une alimentation continue DC. De plus, en comparaison avec la technologie CMOS actuelle, ils utilisent une technologie de fabrication relativement simple ne nécessitant pas de dessin submicronique profond. La figure 1 présente le schéma (a) et le layout (b) d'une cellule D flip-flop [2].

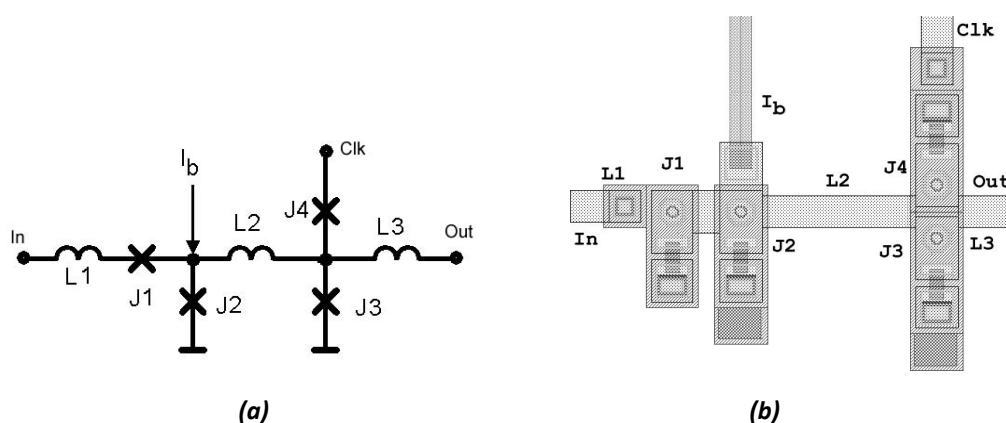


Fig. 1. Cellule D flip-flop, (a) schéma, (b) layout

Notons que la complexité de conception et les performances des circuits logiques RSFQ dépendent principalement de la technologie supraconductrice utilisée et du nombre de JJ intégrés.

Les supraconducteurs à haute température critique (SHT) sont apparus en 1986 lorsque *Bednorz* et *Miller* découvrent un nouvel oxyde céramique supraconducteur $(La, Ba)_2CuO_4$ avec une température critique de 35 K. En 2001, le record de température critique (T_c) avoisinait 133.5 K (160 K à haute pression) pour l'oxyde $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$. Cependant en 2015, le record mondial, détenu par des chercheurs de l'institut Max Planck, est établi à 203°K pour le sulfure d'hydrogène H_2S à très haute pression. Dans les années 2000, Les recherches se sont focalisées principalement sur deux familles de matériaux, YBCO ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$, $T_c \sim 92$ K) et BSCCO ($Bi_2Sr_2Ca_2Cu_2O_{8+x}$ (Bi-2212), $T_c \sim 85$ K, et $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_2O_{10+x}$ (Bi-2223), $T_c \sim 110$ K). La structure cristalline de ces matériaux se présente sous la forme de *pervoskites* déficient en oxygène avec la surface d'oxyde de cuivre CuO_2 . Le comportement des SHT est décrit dans la théorie de *London* et *GL*. Cependant, cette théorie n'est pas totalement acceptée par la communauté scientifique comme théorie microscopique [3].

La plupart des matériaux SHT restent supraconducteurs à la température d'ébullition de l'azote liquide 77.4 K. Au départ, cette caractéristique a suscité beaucoup d'intérêt. Les mécanismes des SHT n'étant pas totalement maîtrisés, les scientifiques pensaient avoir à porter de main un fonctionnement à température ambiante. Même à la température de l'azote liquide, les SHT présentent un intérêt certain. En effet, la suppression d'un watt de chaleur générée à 77 K nécessite 10 W ou moins à température ambiante en opposition aux 1000 W nécessaires à 4 K. De plus, les coûts de fonctionnement de la réfrigération

(cryocoolers), à base de liquide cryogénique, sont extrêmement faibles puisque le prix d'un litre d'azote liquide avoisine les 60 ¢ comparés aux 25 \$ pour hélium liquide.

Cependant, l'intérêt suscité c'est vite transformé en déception. Le fonctionnement à température ambiante n'a pas encore été atteint, les densités de courant critique restent faibles pour des applications technologiques et la tenue mécanique des matériaux SHT est médiocre. Comme les céramiques, les SHT nécessitent, pour leur formation, des hautes températures en présence d'oxygène. Ils sont ainsi cassants, difficiles à façonner et à manipuler mais surtout, incompatibles avec les procédés conventionnels de fabrication microélectronique. Bien que très rapide, les circuits RSFQ SHT actuels se limitent d'une part à une très faible densité d'intégration (quelques dizaines de JJ) et d'autre part à un petit nombre de circuits intégrés. Pour le moment, la fabrication en grande série n'est pas maîtrisée.

De nouveaux matériaux SHT, qui ne sont pas des oxydes de cuivre comme par exemple le MgB_2 , $T_c \sim 39$ K découvert par l'équipe de Jun Akimitsu à l'université Aoyama-Gakuin de Tokyo, ont été révélés récemment. Ils constitueront, peut être car les recherches continues, la solution pour atteindre une densité d'intégration élevée et une fabrication en grande série.

De nos jours, la majorité des circuits RSFQ fonctionnels (CAN, microprocesseurs, filtres ...) sont fabriqués en supraconducteurs à basse température critique (SBT). Ces circuits utilisent des fréquences d'horloge pouvant atteindre 100 GHz (750 GHz de fréquence de fonctionnement pour les nouvelles portes RSFQ) avec une puissance consommée extrêmement faible de l'ordre de 10^{-8} Joule/bit (5 ordres de grandeur moins que les circuits CMOS modernes). La faible dissipation de puissance permet une grande densité d'intégration ainsi qu'un transfert de donnée (quanta de flux magnétique) sans atténuation ou distorsion. Ces caractéristiques permettent de maintenir des vitesses de calcul très importantes même dans le cas de circuits numériques complexes. Ainsi, les circuits RSFQ récents comportent jusqu'à 70.000 jonctions Josephson comme par exemple le microprocesseur FLUX-1 (20GHz, 65.759 JJ) [4].

Les circuits RSFQ SBT sont fabriqués principalement dans les filières technologiques en niobium (Nb, $T_c < 6$ K) et en nitrure de niobium (NbN, $T_c < 12$ K). L'avantage principal de cette technologie est sa compatibilité avec les procédés conventionnels de fabrication microélectronique. En effet, elle ne nécessite pas de croissance d'épitaxie, pas de profil de dopage à calculé, pas de déposition en phase vapeur ni de procédé haute température comme cela était le cas des SHT. Les infrastructures microélectronique, utilisées il y a une dizaine d'année pour fabriquer des circuits CMOS en technologie 1.5, ..., 0.6 μm , sont parfaitement adaptées pour fabriquer des circuits RSFQ SBT sans coût supplémentaire.

Notons que le principal fondeur est américain : Hypres. Celui-ci propose déjà des fonderies commerciales en 3 et 1.5 μm (cf. annexe 1). Citons aussi Northrop Grumman (TRW précédemment), SUNY, MIT ... toujours aux Etats-Unis et NEC, Hitachi, ... au Japon. La figure 2 présente une coupe technologique 4 niveaux de Nb d'Hypres. Nous remarquerons enfin, que la littérature fait état d'applications en 0.8 μm (calculateur PetaFlops [4]) et une technologie en 0.4 μm [5].

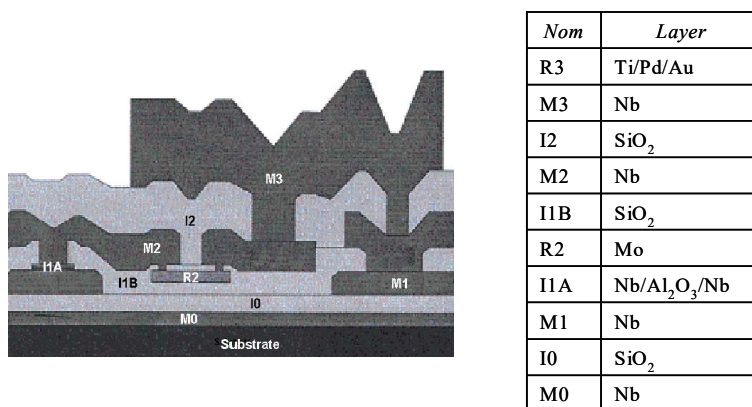


Fig. 2. Coupe technologique de chez Hypres

3 AVANTAGES DE LA LOGIQUE RSFQ DOMAINES D'APPLICATION ET EXEMPLES DE RÉALISATION

L'état de l'art de la logique RSFQ montre que cette technologie est viable pour différents domaines d'application. En effet, nous assistons, depuis la dernière décennie, à une augmentation importante du nombre de circuits développés, des performances atteintes: vitesse, puissance consommée, densité d'intégration et aussi terme de technologie : nouvelles JJ,

technologie submicronique... La figure 3 montre les différentes plateformes pouvant accueillir une technologie supraconductrice.

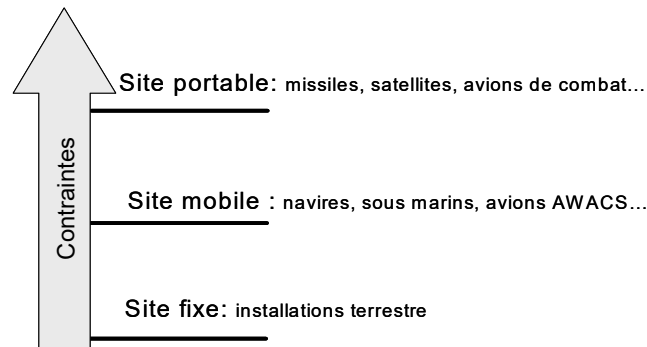


Fig. 3. Plateformes pouvant accueillir une technologie supraconductrice

Le **Error! Reference source not found.**, d'après D. K. Brock (Hypres), donne une représentation des différents circuits (numériques) RSFQ fonctionnels développés en technologie Nb 2-3 μm .

Tableau 1. Représentation des circuits RSFQ fonctionnels en technologie Nb 2-3 μm [6]

Type de circuit	Performances du circuit
Toggle flip-flop	144 GHz
4-bits shift register	66 GHz
6-bits Flash ADC	3 ENOB à 20 GHz
14-bits ADC haute résolution	14 ENOB et -100 dBc SFDR à 2 MHz
1: 8 Demultiplexeur (synchrone)	20 Gb/s
1- bit Half-Adder	23 GHz
8xN bit Multiplieur série	16 GHz
128-bit autocorrelateur	16 GHz
2-bit compteur	120 GHz
1-kbit registre à décalage	19 GHz
6-bit Transient digitizer with 6x32 bit on-chip memory buffer	16 GS/s
19-bit CAN	Fonctionnement à basse vitesse
1: 2 Demultiplexeur (asynchrone)	95 Gb/s
2- bit full-Adder	13 GHz
14-bit digital comb filter	20 GHz
Time-to-digital converter	31 GHz

ENOB= effective number of bits

SFDR= spurious-free dynamic range

4 AVANCÉES ET VÉRROUS DE LA LOGIQUE RSFQ

Les dernières années ont mis en évidence de nouveaux progrès dans la fabrication de jonctions Josephson en technologie 3 niveaux de Nb. Des jonctions en technologie submicronique profonde avec une densité de courant supérieur à 200 kA/cm² ont été réalisées. En concordance avec la théorie, ces jonctions sont intrinsèquement auto-amortie (*self-shunted*). Ainsi, elles ne nécessitent pas de résistance de shunt ce qui réduit les parasites par effet inductif. De plus ces jonctions ont une valeur élevée du produit $I_c R_N$ (de l'ordre de 2.0 mV, i.e très proche de la valeur maximum théorique du Nb) ce qui augmente encore la vitesse des circuits RSFQ. Par exemple, des tests sur un circuit T flip-flops (diviseur de fréquence numérique) ont montré une vitesse de fonctionnement supérieur à 770 GHz. Par ailleurs, ces jonctions s'avèrent tout à fait reproductibles, permettant une propagation sur circuit totale de I_c inférieur à 10%.

Le second progrès concerne le développement de jonctions Josephson empilées verticalement (*vertically stacked*) avec un contact externe sur l'électrode (commune) du milieu. En combinant ces progrès, des estimations montrent que cette nouvelle

approche permettra aux circuits logiques RSFQ d'atteindre une densité d'intégration équivalente aux circuits CMOS avec 15 millions de transistors et 16 Mbits de mémoire cryogénique CRAM [4]. Notons aussi les avancées très intéressantes réalisées à l'université de *Nagoya*, sur des jonctions en NbN fonctionnant à 10 K avec une densité de courant $\sim 50 \text{ A/cm}^2 - 3.3 \text{ kA/cm}^2$, et ceux du Communication Research Laboratory (CRL) au *Japon* concernant la fabrication de jonctions tunnel en NbN/AlN/NbN sur substrat de MgO et résistance de shunt en Cu (figure 4) avec une densité de courant à 4.2 K de 2.2 kA/cm^2 [6]. En effet, les jonctions en NbN présentent un avantage certain sur la filière Nb d'une part par un fonctionnement à haute température 10 K au lieu de 4 K, ce qui permet un allègement de la réfrigération, et d'autre part pour leurs vitesses de fonctionnement pouvant atteindre le THz [7].

Enfin, nous renvoyons vers l'article de *Gaj* [7] qui discute sur les possibilités d'avoir des circuits RSFQ avec des jonctions submicroniques.

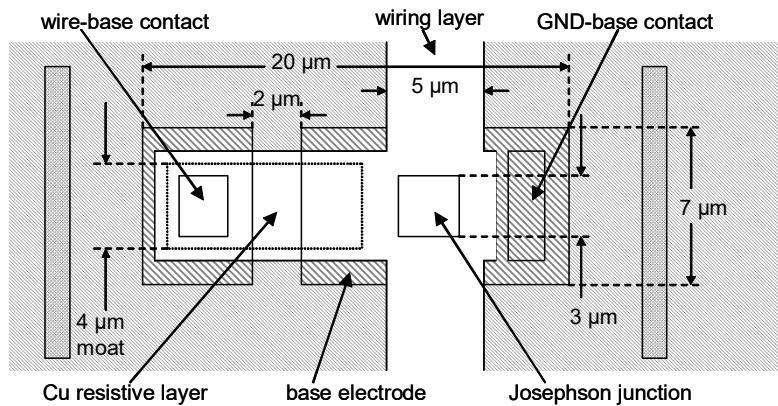


Fig. 4. Schématisation d'une jonction tunnel NbN/AlN/NbN utilisant une résistance de shunt Cu

Bien que nous assistions depuis la dernière décade à une augmentation importante du nombre de circuits RSFQ développés, le flot de conception n'a pas connu le même essor. En effet pour ce premier verrou, les flots RSFQ reposent principalement sur les flots semi-conducteurs déjà existants comme indiqué sur la figure 5 ci-dessous. Cependant, les caractéristiques inhérentes à la logique RSFQ ne sont pas prises en compte : distribution des lignes DC, distribution des horloges (portes logiques principalement synchrone) ... Le fait qu'il n'y a pas de synthétiseur RSFQ dédié illustre cette situation. De nos jours, la synthèse repose sur des méthodes manuelles fortement dépendantes de l'expérience du concepteur [8].

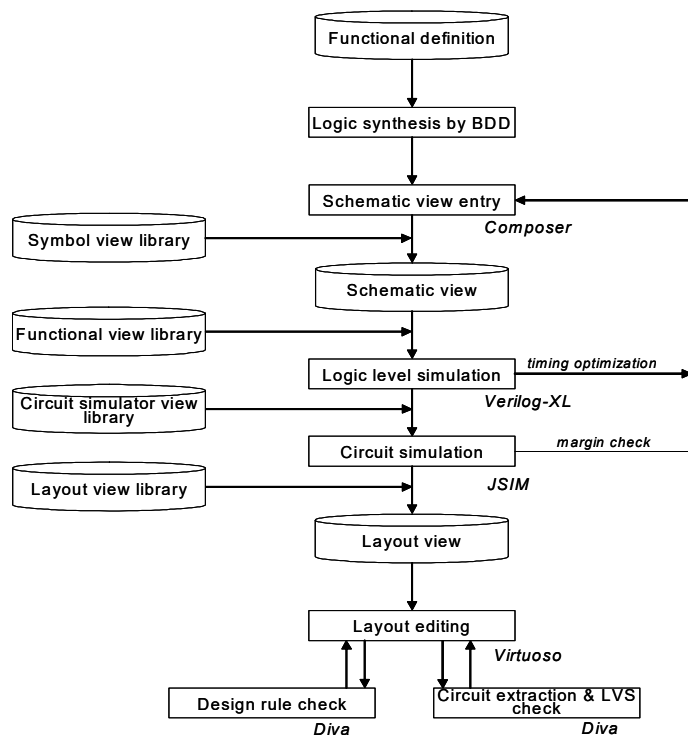


Fig. 5. Flot de conception VLSI de la logique RSFQ

Cependant, il existe une multitude de logiciels spécifiques : JSIM, MALT, WinS, ... conçus par des universités (U. de Savoie, U. de Rochester, U. de Berkeley...) et/ou par des industriels (Whiteley research inc, TRW... [7] destinés à la simulation d'un circuit RSFQ. Le tableau 2 ci-dessous donne un aperçu des différents logiciels utilisés.

Tableau 2. Les différents logiciels utilisés pour la conception de circuits à base de logique RSFQ

Groups	Layout tool	Circuit simulator	Optimizer	Inductance estimator	Logic simulator
Chalmers University (Sweden)	Cadence Virtuoso & Diva	PSCAN	COWBOY	Lmeter & 3D-MLSI	Leapfrog VHDL
University of Twente (Netherlands)	CleWin	Jsim (with GUI)	-	Fast Henry & Lmeter	-
University of Ilmenau (Germany)	Magic, Lasi, Autocad	Eldo	XOPT	MFB, SCIM	Eldo/ Powerview
University of Savoie (France)	Wavemaker	WINS/JSIM	-	Sonnet em, sline, MTRM	-
University of Karlsruhe (Germany)	Cadence Virtuoso & Diva	Spice 3f4	ABAK	Sonnet EM	Verilog-XL
DERA (UK)	L-Edit	Jsim_n	rtry	Lmeter	Lard

Il est à noter que des simulations analogiques réalisés sous environnement CADENCE, pour connaître les limites en température permises, montrent une limite autour de -135,4 °C. Il apparaît donc, que pour utiliser ce logiciel, la température réelle doit être "transparente".

Le deuxième verrou est celui des sources de froid. Deux sources principales de froid ont pu être dégagées au cours de cette étude :

- La première est constituée d'une réserve de froid (souvent de l'Hélium superfluide) contenue dans un cryostat. Dans le cas du spatial, la durée de la mission dépend de l'orbite retenue, de la puissance nécessaire au fonctionnement des instruments et de la réserve placée dans le cryostat. Des exemples de ces types de missions sont :

- Herschel (future mission), SIRFT, ISO, IRAS.
- La seconde est constituée par le développement de cryo-générateurs. Plusieurs types de cryostats sont actuellement développés ou en cours de développement pour les futures missions spatiales :
 - Aux USA : TRW, Martin Looked, Creare, Ball Aerospace
 - En Europe : Thalès Cryogenie SA, Air Liquide.

La figure 6 ci-contre montre un exemple de cryostat développé par la NASA.



Fig. 6. Exemple de cryostat développé par la NASA

Comme nous l'indiquerons dans la seconde partie (plus en détail dans l'annexe), les missions d'observation infrarouge nécessitent une cryogénie importante, aussi bien pour les détecteurs que pour les miroirs. De même, les détecteurs pour rayons X (ou pour les particules) nécessitent aussi la présence de cryogénie. Dans certains cas, la température à atteindre est de quelques mK, ce qui est obtenu au moyen de plusieurs étages :

- Des cryogénérateurs basés sur différents principes : Stirling, turbo Brayton ou pulse-tube qui permettent d'atteindre 6K
- Ces étages sont suivis de réfrigérateurs adiabatiques qui peuvent fournir le froid nécessaire au fonctionnement de capteurs.

5 LES PROJETS SPATIAUX

5.1 ARISE (VSOP-2)

Ce projet correspond à la réalisation d'un très grand interféromètre de radioastronomie, placé en orbite. ARISE est l'acronyme de: « Advanced Radio Interferometry between Space and Earth », il correspond à un radiotélescope orbital destiné à fonctionner entre 5 et 43 GHz. Avec une moins bonne précision, il est également envisagé d'utiliser les fréquences de 60 et 86 GHz.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Il s'agit d'obtenir des images de radio source avec une résolution de 10 à 20 microsecondes d'arc, ce qui correspond à une amélioration de deux ordres de grandeur par rapport aux résolutions actuelles. Ce radiotélescope est destiné à fonctionner en conjonction avec les radiotélescopes au sol et son objectif principal est d'observer les objets de l'univers les plus énergétiques, à savoir les trous noirs super massifs. Il devrait pouvoir également évaluer les échelles de distance extra galactiques (50 à 200 Mpc) en utilisant le mouvement propre des masers à vapeur d'eau extérieur à la galaxie et enfin estimer la température et l'abondance des molécules d'oxygène dans une douzaine de nuages interstellaires de notre galaxie. Ces objectifs correspondent à une amélioration de la sensibilité de l'interféromètre de 50 à 200 aux fréquences de 5 à 22 GHz, par rapport au premier programme VSOP.

5.2 CONSTELLATION X

Les missions Constellation X sont formées d'un ensemble de télescopes à rayons X qui compléteront les observations effectuées par certains télescopes à rayons X déjà existant comme le télescope Chandra (NASA) et XMM-Newton (ESA). Ce télescope aura la plus grande résolution spectrale et constituera, sûrement, le plus grand télescope rayon X jamais construit. Actuellement, ce projet occupe la deuxième place, après le télescope James Webb, dans les priorités de télescopes spatiaux.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Comme tous les télescopes à rayons X, Constellation X doit être positionné dans l'espace car les rayons X ne traversent pas l'atmosphère. Les 4 (ou 6) satellites constituant la mission doivent être suffisamment légers pour être lancés individuellement ou par paires. Ils devront avoir une sensibilité cent fois plus grande que les télescopes existant à rayons X, ce qui signifie que les observateurs doivent être capables de recevoir en une heure plus d'informations qu'ils n'en collectent actuellement en quelques jours ou quelques semaines. L'objectif principal de ce télescope géant est d'observer les trous noirs, les galaxies en formation, de tester la théorie de la relativité générale, l'évolution de l'univers et la nature de la matière noire.

5.3 FORMATION FLYING

Dans le cas présent, il ne s'agit pas à proprement parler d'une mission ou d'un ensemble de missions précises mais plutôt d'un nouveau concept spatial. Ce concept offre une manière révolutionnaire de planifier, concevoir, implémenter et exploiter les missions. Cette technologie permet à un ensemble de vaisseaux autonomes, formant un réseau distribué d'agir à la manière d'une unité collective. L'intérêt principal est de réduire d'une manière considérable la limitation, les coûts et les rendez-vous associés d'une manière traditionnelle aux missions scientifiques. On peut probablement considérer qu'un précurseur de ce concept a été démontré par le vol de Techsat 21 réalisé par l'Air Force Research Laboratory. Afin de mieux comprendre le fonctionnement de ce type de missions, il est nécessaire d'examiner rapidement la mission Techsat 21.

La mission Techsat 21 : il s'agit d'un ensemble de trois vaisseaux de 150 kg en formation circulaire à 550 km altitude. Les points clés du programme étaient au nombre de 3 :

- Démonstration de la possibilité d'avoir une formation, en vol non aligné, et maintenue à distance contrôlée d'une manière autonome (c'est-à-dire sans intervention depuis le sol).
- Possibilité de faire des observations au moyen de cet ensemble de satellites, en utilisant des traitements de signal avec des formes d'ondes innovantes.
- Validation des modèles et des simulations.

La distance a été maintenue automatiquement par les satellites en utilisant le GPS. Pendant un an, les distances ont varié expérimentalement de 100 m à 5 km en utilisant des communications inter satellites. Les capteurs embarqués sur ces satellites fonctionnent comme un capteur à grande ouverture répartie, ce qui présente un avantage décisif pour certaines observations comme par exemple les observations SAR.

Les intérêts de cette technique :

- Il est possible de faire à bord une détection avec un traitement des données de manière à ne transmettre au sol que les informations majeures. Cela nécessite de pouvoir disposer à bord d'une unité de calcul importante, capable de trier et de mémoriser les données (par exemple identifier les événements météorologiques importants, ou bien les émissions volcaniques ou les tremblements de terre). Naturellement, la puissance de calcul est fonction de la mission.
- Ce type de missions s'adapte aussi bien aux missions de surveillance qu'aux missions d'observations scientifiques, astronomiques ou radio astronomiques.
- Une telle plate-forme présente aussi l'intérêt d'améliorer considérablement la précision des observations car les différents capteurs embarqués peuvent travailler de concert, comparer leurs observations et éliminer les artefacts.
- L'ensemble de la plate-forme avec ses différents capteurs représente en fait un capteur unique de dimensions considérables.
- Le fait d'avoir plusieurs capteurs permet aussi de fiabiliser les observations, en effet en cas de défaillance d'un capteur, les observations ne sont pas compromises.
- Il est annoncé que cette méthode permettrait de pouvoir exploiter les données avec simplement un ordinateur portable, car l'ensemble du travail scientifique serait fait à bord (Science from a Laptop).

- Un dernier point important à signaler est la réduction considérable des transmissions de télémétrie à cause de l'autonomie des groupements de satellites.

Le développement de telles plateformes nécessite un travail important au niveau de l'automatisme et des logiciels de contrôle de vol, de manière à assurer l'autonomie d'une manière efficace.

Il est également nécessaire de développer des techniques de calcul permettant des transferts rapides d'informations, et plusieurs pistes sont actuellement à l'étude :

- Transmission descendante optique
- Compression importante de données
- Codage de canaux à fort débit (probablement par le développement de turbo codes)
- Développement important de microcontrôleurs

Parmi les équipements en développement, il faut citer des cryo-générateurs capables de descendre en dessous de 4 K sans vibrations, à faible consommation électrique et faible poids. Il convient aussi de mentionner l'appel aux technologies micro-électroniques et micro systèmes, tels que par exemple :

- Un magnétomètre MEMS basé sur un « xylophone » (mise en résonance d'une fine lame de silicium qui se déforme sous l'influence d'un champ magnétique local et qui, par exemple, fait varier la fréquence de résonance) .
- Un micro gyroscope MEMS
- Un micro accéléromètre MEMS etc.

Il est estimé que l'utilisation de la micro-électronique permet d'avoir les mêmes fonctionnalités avec un satellite de 100 kilos aujourd'hui qu'avec un satellite d'une tonne il y a dix ans. Ce projet a été abandonné en 2003 due au coût.

5.4 GAIA

Après le succès de la mission Hypparcos, qui représentait la première étape du projet de mesures astrales, le concept de la mission GAIA a été dégagé (*Global Astrometric Interferometer for Astrophysics*).

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

L'objectif à atteindre consiste à améliorer de plusieurs ordres de grandeur, par rapport à Hypparcos, la précision, le nombre d'objets observés et leur magnitude. Il s'agit de construire une carte précise en trois dimensions de la Voie lactée. Un paramètre supplémentaire est à rajouter par rapport à la mission Hypparcos, la mesure des vitesses radiales, ce qui permettrait d'améliorer grandement les études cinématiques, l'identification et la compréhension des systèmes multiples. Ceci permettrait l'étude de l'origine et de l'histoire de notre galaxie. Le but est d'atteindre des mesures sur environ un milliard d'étoiles avec les caractéristiques suivantes :

- Une précision requise de 10 à 20 μ sec d'arc
- Observer les objets ayant une magnitude $V < 20$
- Mesurer la vitesse radiale pour des magnitudes $V < 16-17$
- Effectuer des mesures photométriques dans plusieurs bandes d'observation

La mission a une durée prévue de cinq ans, avec la possibilité de continuer à exploiter les résultats trois ans après la fin de la mission.

5.5 HERSCHEL

La mission Herschel initialement désignée sous le nom de FIRST est un télescope submillimétrique et infrarouge dédié à l'observation du cosmos aux longueurs d'ondes comprises entre 85 et 700 μ m. Il s'agit d'un télescope de 3.50 m de longueur à la température de 80 K. Il comporte des instruments dans les plans focaux qui peuvent être refroidis à des températures inférieures à 11 K en utilisant un cryostat à l'hélium liquide.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Les objectifs primordiaux de la mission sont les suivants :

- Effectuer une surveillance photométrique extra galactique à large bande en sélectionnant des régions avec une faible résolution spatiale et une haute sensibilité ;
- Faire un suivi spectroscopique des objets découverts durant les observations ;
- Etudier la physique et la chimie du milieu interstellaire, y compris la formation des étoiles ;
- Etudier l'astrochimie des gaz et des poussières ;
- Effectuer des études spectroscopiques à haute résolution des comètes et des planètes.

5.6 IRSI/DARWIN

Il s'agit d'un interféromètre infrarouge spatial centré autour de 1,55 μm .

L'objectif de cette mission est très proche de celui de la mission TPF (*Terrestrial Planet Finder*) présentée ci-dessous. Ce projet est développé par un consortium européen avec une contribution industrielle à laquelle participe Alcatel.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

On peut distinguer deux objectifs principaux :

- Le premier consiste à réaliser un interféromètre spatial ayant une grande résolution angulaire associée à un spectroscopie. Les observations concernent les amas globulaires, les disques proto-stellaires etc.
- Le second est la recherche et la caractérisation d'exoplanètes similaires à la terre, ainsi que des signatures spectrales évoquant les possibilités de vie. La détection et l'étude de telles planètes, orbitant autour d'un soleil, sont des projets d'observation ambitieux, mais rendus possible par une observation des spectres en infrarouge et dans le visible.

Quelques centaines d'étoiles naines sont situées à 15 parsec de notre système solaire. Les instruments doivent résoudre au moins une séparation angulaire de 0.05 à 0.1 seconde d'arc, ce qui correspond à 1 unité astronomique autour d'une étoile située entre 10 à 20 parsec.

5.7 GLAST (FERMI GAMMA-RAY SPACE TELESCOPE)

L'origine du projet correspond à une collaboration entre la physique des hautes énergies et l'astrophysique. Cette collaboration est internationale, les États-Unis, la France, l'Italie, le Japon et la Suède sont impliqués. La mission GLAST (Gamma-Ray Large Area Space Telescope) a été lancée en juin 2008.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Il s'agit d'un télescope à grande ouverture pour la détection de rayons gamma dont les énergies sont comprises entre 20 MeV et 300 GeV. Ce projet fait suite à la mission EGRET (*Energetic Gamma Ray Experiment Telescope*) qui a été mise en orbite en 1991. Cette dernière a effectué une observation du ciel pour des énergies supérieures à 30 MeV et a permis de construire un catalogue de sources qui forme une référence. La mission GLAST maintient les mêmes objectifs avec une technologie plus élaborée, elle permettra un accroissement de la surface effective d'un facteur 10 et l'angle de vue d'un facteur 5. Le lancement est prévu par une fusée DELTA 2, ce qui limite le poids du satellite à 4 tonnes et ses dimensions à 4 m³. Son orbite aura une altitude de 550 km. Le débit d'informations vers le sol est prévu à 0.3 Mb/s.

5.8 IRSRI (LOBSTER)

Il ne s'agit pas ici d'un projet de mission spatiale précis (quoique le projet LOBSTER puisse être inclus dans cette approche), mais plutôt de l'étude de détecteurs capables de recevoir les particules très énergétiques en provenance des différents objets stellaires. Il s'agit d'une phase préliminaire destinée à développer au sol des détecteurs qui pourront ensuite être placés sur des satellites mais aussi pourront équiper des accélérateurs de particules. Il s'agit principalement de calorimètres dont les principes seront présentés en annexe. IRSRI est un projet présenté en mars 2005 à la commission européenne (*Spacerad 6th European Framework Programme*). C'est un consortium constitué de laboratoires ou organismes de quinze pays, de trois industriels et d'une agence spatiale (ESA). Les domaines scientifiques abordés concernent les détecteurs cryogéniques de photons allant des rayons X durs à l'infrarouge (qui se divise en cinq groupes), ainsi que des groupes de travail au nombre de huit.

5.9 JESMINE

Il s'agit d'un plan japonais de développement d'une instrumentation future pour une observation spatiale astrométrique dans l'infrarouge.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Le principal objectif de JASMINE est d'étudier la structure fondamentale et l'évolution du disque formé par la voie lactée de notre galaxie. Les observations sont délicates à faire en optique à cause de l'extinction apportée par la présence des poussières. Les observations seront donc faites dans l'infrarouge proche (2.2 μ m) avec une précision de 10 μ as. La construction de l'observatoire sera faite en deux étapes : JASMINE-I, prévu pour un lancement à partir du centre d'Alcantara au Brésil sur une fusée Tsiklon-4. Le projet est conçu pour une observation de plusieurs centaines de millions d'étoiles. La durée des missions est prévue pour cinq ans.

5.10 MAXIM

MAXIM (*Micro-Arcsecond X-ray Imaging Mission*) est une mission à très long terme car il reste un certains nombres de problèmes au niveau de la technologie à résoudre.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Les objectifs de cette mission s'inscrivent dans la continuité d'une part de Hubble et d'autre part de l'observatoire à rayons X Chandra. C'est une mission du même type que « Constellation X ». L'objectif attendu concerne l'observation du halo (désigné par : « event horizon ») qui se trouve autour d'un trou noir. Par définition, le trou noir lui-même ne peut pas être observé, mais on peut observer un halo de rayonnements qui parviennent à s'échapper de la très forte gravité.

L'observatoire est constitué par un ensemble de 32 miroirs collecteurs répartis sur un cercle de 200m de diamètre au centre duquel se trouve un satellite collecteur. Celui-ci renvoie les rayons sur un satellite de convergence situé à 10km, et enfin l'ensemble est renvoyé sur un satellite muni de détecteurs CCD pour faire l'imagerie. Le satellite collecteur central a aussi pour mission de maintenir correctement l'espace entre les étages. Par certains côtés, il y a une certaine similitude avec la disposition: «Formation Flying » décrite ci-dessus.

5.11 SAFIR ET SPECS

SAFIR (Single Aperture Far-IR) et SPECS (the Submillimeter Probe of the Evolution of Cosmic Structure) sont deux projets spatiaux dans les domaines submillimétrique et lointain infrarouge, le premier est la réalisation d'un télescope et le second celle d'un spectromètre.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

SAFIR est un télescope destiné aux observations dans les longueurs d'ondes comprises entre 15 et 600 μ m, ce qui permettra un léger recouvrement avec la mission JWST et les possibilités des observatoires au sol. Dans le livre blanc de SAFIR, il est mentionné que le spectre continu F-IR et les raies observées sont d'excellents indicateurs pour connaître la vitesse de formation des étoiles et les conditions physiques nécessaires à la formation des nuages moléculaires. SAFIR peut être utilisé pour étudier des sites individuels d'étoiles en formation par une méthode spectroscopique. Il y a également un intérêt dans l'étude des trous noirs.

5.12 SPICA (ANCIENNEMENT HII/L2)

SPICA (*Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics*) est une mission de la prochaine génération dans l'infrarouge qui devrait être lancée par une fusée japonaise HIIA au point L2 du système terre-soleil. Elle doit faire suite à la mission IRTS lancée en 1995 et elle s'inscrit dans le projet de surveillance en imagerie infrarouge japonaise (ASTRO-F/IRIS).

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

La figure 7 ci-dessous compare les sensibilités entre les résultats attendus de Herschel (anciennement FIRST), et de JWST (anciennement NGST). Il est annoncé que cette mission a pour objectif une très haute sensibilité dans l'infrarouge moyen et en lointain infrarouge. Cette mission est considérée comme le complément des observatoires infrarouges et submillimétriques ci-dessus.

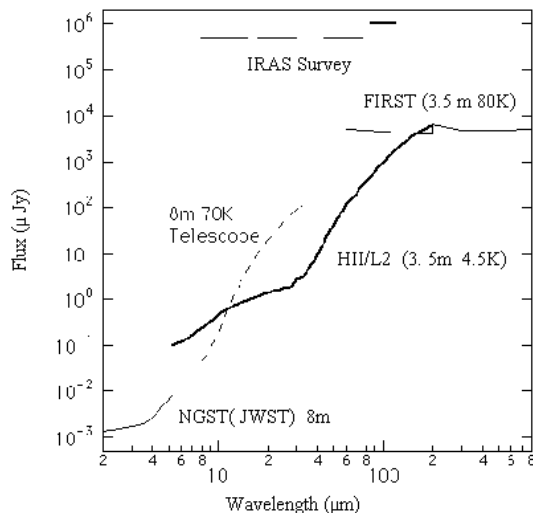


Fig. 7. Comparaison des sensibilités Herschel, JWST

5.13 SUBMIMMETRON

Il s'agit d'un télescope cryogénique submillimétrique dont le déploiement, la maintenance et éventuellement les réparations seront effectuées en utilisant la partie russe de la station spatiale internationale.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Il s'agit d'obtenir une cartographie complète du ciel en ondes submillimétriques (1 THz) avec une résolution angulaire, à cette fréquence, d'une seconde d'arc. Plus précisément, les objectifs de cette mission seront les suivants :

- Etudier en submillimétrique et en infrarouge lointain les composants froids de la matière de l'Univers ;
- Etudier l'anisotropie du rayonnement cosmique micro-ondes ;
- Etudier le spectre des sources astronomiques et leurs variations.

5.14 VLBI (À BASSE FRÉQUENCE)

Comme dans le cas précédent, ce projet ne correspond pas à une mission parfaitement identifiée, mais il s'agit de montrer la possibilité de réaliser un observatoire spatial destiné à l'observation du ciel dans des gammes de fréquences très basses, actuellement inexplorées pour la plupart. Dans aucune des études que nous avons explorées il n'est question de mettre un équipement cryogénique embarqué. Les deux intérêts majeurs de ce projet, par rapport aux radios observatoires déjà existants dans cette bande (au sol), sont d'avoir une très bonne propagation des ondes et d'éviter les interférences avec les émetteurs. En effet les observations au sol sont fortement gênées par la présence de l'ionosphère. Par ailleurs, en étant suffisamment loin de la terre on élimine la réception des émetteurs terrestres. Les observations faites sur le satellite WIND, situé à $\sim 2 \times 10^5$ km de la terre montre encore un niveau supérieur de 5dB pour les RFI (*Radio Frequencies Interferences*) par rapport au bruit du ciel, et dans la bande 1 à 15 MHz. La condition d'éloignement est donc primordiale pour le succès d'une telle entreprise.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

- La compréhension des processus physiques responsables d'une émission et d'une absorption de rayonnement qui sont observés à basse fréquence.
- La possibilité d'observer les émissions radio produites par les électrons de basse énergie, ce qui forme une excellente source d'information sur les évolutions des galaxies.
- L'étude de l'échange de matière entre le milieu intergalactique et les étoiles.

Il y a également un intérêt en ce qui concerne l'imagerie du soleil, la cartographie du champ magnétique interplanétaire à grande échelle et la compréhension des mécanismes d'émission et d'accélération des particules.

5.15 VSOP-2

La mission japonaise VSOP_2 fera suite à la mission VSOP. Elle est actuellement étudiée par un Working Group pour définir un interféromètre spatial, à très longue base, de la prochaine génération. La conception du satellite est fortement contrainte par les dimensions de la fusée porteuse, et le poids total du satellite devrait être de 910 kg et nécessiter une consommation électrique de 1800 W.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

- Une étude des mécanismes d'émission en conjonction avec les satellites de prochaines générations comportant des télescopes à rayons X et rayons gamma ;
- Une étude de l'orientation de la polarisation du champ magnétique et l'évolution des jets ;
- Des mesures de rotation Faraday ;
- Une étude à haute résolution de la collimation et de la formation des jets dans l'environnement des trous noirs super massifs ;
- Une étude haute résolution spectrale des lignes maser et méga-maser.

5.16 WISE

WISE a été retenu en phase B par la NASA en août 2004 et le projet préliminaire était examiné en avril 2005. Le lancement a été effectué en décembre 2009.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Il s'agit d'un télescope infrarouge qui fonctionnera entre 3.5 et 23 μm . Il sera 1000 fois plus sensible que le télescope de surveillance IRAS.

L'un des objectifs principaux est de compléter les observations et les découvertes effectuées par IRAS. Ce satellite a en effet découvert une classe de galaxies qui sont 100 fois plus lumineuses dans l'infrarouge que dans visible, et qui rivalisent ainsi avec la luminosité totale des quasars. La sensibilité attendue de WISE doit permettre d'observer des galaxies hyper lumineuses jusqu'à 3 μm de longueur d'onde. Un autre objectif concerne la recherche d'étoiles proches du soleil; en effet, les étoiles dont la masse est inférieure à 0.08 fois celle du soleil ne sont pas suffisamment chaudes pour être observées dans le visible (étoiles froides, naines brunes). Parmi les autres objectifs, on peut également citer la détection de la ceinture d'astéroïdes supérieure à 3 km. Enfin cette mission permettra d'aider les observations effectuées ultérieurement par le télescope JWST.

5.17 XEUS

XEUS est l'acronyme de «X-ray Evolution of Early Universe ». Le projet a été sélectionné par l'ESA, en octobre 2007, comme candidat à la mission Cosmic Vision. Il devrait entrée en fonction vers 2020.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Les objectifs de cette mission couvrent un très vaste domaine, allant de l'astrophysique, la recherche fondamentale sur la physique du soleil et des planètes jusqu'à exobiologie. D'une manière générale, les objectifs concernent l'étude et l'évolution de l'univers chaud. On peut distinguer:

- La recherche de l'origine et subséquemment l'étude de la croissance des premiers trous noirs à l'origine de l'univers ;
- L'évaluation de la formation des premiers petits groupes de galaxies et leur évolution ;
- La caractérisation réelle du milieu intergalactique.

Pour atteindre ces objectifs, les caractéristiques de l'observatoire seront:

- 1) Un système spectroscopique particulièrement performant avec une surface sensible supérieure à 20 m² pour des photons d'énergie inférieure à 2 keV et une résolution spectrale meilleure que 2 eV, ceci permettant une détection des raies significatives.
- 2) La résolution angulaire comprise entre 2 et 5 sec d'arc permet de réduire la confusion des sources aussi bien que le bruit galactique des rayons X.

6 CONCLUSION

Ainsi qu'il a été mentionné ci-dessus, l'utilisation de la logique RSFQ n'apparaît pas, et ceci quelques soit le type de mission: en micro-ondes, en submillimétrique dans l'infrarouge, et même jusqu'aux rayons X. Aucun des projets mentionnés signale une limitation des observations à cause des temps de calculs ou de problèmes liés à un trop grand flot de données. Par contre, une bonne partie des projets en question nécessitent une électronique refroidie, et parfois même à très basse température. La raison essentielle est que dans ces gammes de fréquences, le ciel apparaît comme froid, et que la température système en sortie est dominée par celle des récepteurs. Par ailleurs, les observations effectuées sont toujours limitées en termes de bande passante. Par exemple, le projet ARISE montre que quatre fréquences de réception sont utilisées : 5, 22, 44 et 86 GHz avec une bande maximum de 4 GHz. Par ailleurs la dimension des antennes est très grande vis-à-vis de la longueur d'onde, il en résulte que le domaine visible de l'antenne est étroit. Dans ces conditions la quantité de données à traiter reste raisonnable, puisque le débit vers le sol est estimé entre 1 et 8 Gbs. Une remarque similaire peut être faite pour l'ensemble des missions, sauf probablement pour les missions du type Formation Flying. C'est en effet autour de ces projets que l'on peut envisager l'utilisation d'une logique extrêmement rapide à cause d'un grand flot de données à traiter lors du vol.

Trois projets de missions rentrent actuellement dans ce cadre: MAXIM, TFP et VLBI à basse fréquence. Le projet MAXIM est clairement à la limite de la radioastronomie, et les compétences pour l'étudier plus en détail relèvent du domaine de la physique des particules. Il n'est pas fait mention d'un volume important de données, mais plutôt de la difficulté de détecter le rayonnement. Le projet TFP rentre probablement beaucoup plus dans un domaine des longueurs d'ondes plus grandes, mais il s'agit d'un ensemble de réflexions destiné à définir des architectures de futures missions et non pas d'un projet clairement identifié, avec des fréquences précisées et des bandes passantes attribuées. Il semble aussi que l'étude porte beaucoup plus sur les équipements nécessaires pour atteindre l'objectif cherché que sur la définition précise d'une mission.

Le projet VLBI à basse fréquence a été déjà évoqué depuis très longtemps puisque l'un des premiers papiers identifiés est celui d'Alexander en 1971. Périodiquement, on voit apparaître dans la littérature, des articles qui évoquent ce type de mission, la raison majeure étant que l'ionosphère n'est pas parfaitement transparente dans ces gammes de fréquences et qu'elle affecte très sérieusement la propagation. En outre, dans cette bande de fréquences, l'activité humaine terrestre perturbe considérablement les observations. Il est donc normal que la communauté radio astronomique se soit penchée très tôt vers les possibilités offertes dans le domaine spatial. Par ailleurs, en comparaison des projets précédents, la bande passante à couvrir est considérable puisqu'elle demande plus de 7 décades. Pour ces raisons, si un projet de radioastronomie devait utiliser la logique RSFQ, c'est probablement pour construire un interféromètre à très basse fréquence. Si on se réfère à l'étude effectuée par Oberoi et Pinçon [9], il apparaît toutefois qu'un ensemble de 16 microsattellites est capable de faire le traitement de signal avec des DSP actuellement existants. Il est cependant noté que le volume du flot des données à traiter est limité principalement par les liaisons intra-satellites. En outre l'implantation de cryogénie n'est actuellement pas concevable sur des microsattellites : problèmes de poids et de consommation électrique. En conséquence, si on devait envisager l'utilisation de la logique RSFQ, il faudrait repenser complètement la structure proposée et les contraintes imposées par ces auteurs. En effet, en dehors de la possibilité de réaliser une «baseline» pour faire une interférométrie à très basse fréquence, le souci d'un faible coût pour la mission reste un guide de base pour cette étude.

Sur le plan pratique, l'introduction de la logique RSFQ dans un tel projet reste conditionnée à la présence de cryogénie, on est alors en droit de se demander si une autre approche n'est pas plus pertinente. En effet, ce qui semble un point dur n'est pas le volume des calculs mais la transmission des données entre les satellites pour un problème de dimensionnement d'antenne. Si ce point peut être résolu, par exemple en utilisant une antenne gonflable comme dans le projet ARISE, alors les perspectives du développement de la microélectronique dans un proche avenir, avec des nano transistors (voir la référence [2] qui fait le point sur les perspectives), offriront un recul substantiel sur les limites actuelles des moyens de calcul. Dans ces

conditions, l'introduction de la logique RSFQ semble apparaître comme une seconde étape après avoir épuisé les possibilités des techniques à semi-conducteurs.

RÉFÉRENCES

- [1] Y. Kebbati, H. Souffi « Etat des lieux des capteurs refroidis dans le domaine spatial » International Journal of Innovation and Scientific Research, ISSN 2351-8014 Vol. 25 No. 1 Jun. 2016, pp. 287-298
- [2] A. Svizhenko, et al "*nanotechnology*", IEEE Transaction on Nanotechnology Volume: 3 Issue: 1 Date: March 2004
- [3] M. Lundstrom, "*Is nanoelectronics the future of microelectronics?*" Proceedings of the 2002 International Symposium on: Low Power Electronics and Design, p: 172- 177 (2002)
- [4] Svizhenko, A. et al. "*Role of Scattering in Nanotransistors*", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 50, p 1459 (2003)
- [5] Yoshikawa, N. Koshiyama, J., "*Top-down RSFQ logic design based on a binary decision diagram*" IEEE Trans. On Appl. Supercond. Vol. 11, p. 1098-1101, (2001).
- [6] Kerkhoff, H. G. Speek, H. "*The testing of high-speed Josephson junction circuits*", Proceeding of the ProRISK/IEEE workshop, p. 317-321, (2000).
- [7] Gaj, K. et al. "*Tools for the computer-aided design of multigigahertz superconducting digital circuits*", IEEE Trans. On Appl. Supercond. Vol. 9, p. 18-38, (1999).
- [8] "SCENET Roadmap for superconducting digital electronics", Version 1.4, March 2000.
- [9] D. Oberoi, J.L. Pinçon « A new design for a very low frequency spaceborne radio interferometer » Radio Science, AGU journal, July 2005.