

Etat des lieux des capteurs refroidis dans le domaine spatial

[Current situation of the cooled sensors in space domain]

Youssef Kebbaty¹ and Hayet Souffi²

¹Laboratoire 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

²Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace LPC2E-CNRS,
LPC2E 3A, avenue de la recherche scientifique,
Orléans, France

Copyright © 2016 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: In this paper, we present a current situation of the cooled sensors in the space domain. Thus, we present an immediate image of the recent developments of the cooled technology, a discussion about the relevance of using cold sensors in the spatial domain and influence of the position of sensor in the satellite. To finish, we shall present an example of future mission. It will be about the space telescope James Webb. We shall expose then the scientific objectives, the concerned space agencies and the date of launch. We shall also give information onto the cooled sensors.

KEYWORDS: cooled sensors, space missions, MEMS, James Webb telescope, superconductor technology.

RESUME: Dans cet article, nous faisons un état des lieux de l'utilisation des capteurs refroidis dans le domaine spatiale. Il s'agit de présenter une image instantanée des récents développements de la technologie refroidis, d'une discussion d'une part sur la pertinence d'utiliser des capteurs froids dans le spatial et d'autre part de l'influence de la position du capteur dans le satellite ou la sonde spatiale. Tout le long de l'article, nous donnerons des exemples de capteurs froids ainsi que les missions sur lesquels ils ont été embarqués. Pour finir, nous présenterons dans la dernière partie un exemple de future mission. Il s'agira du télescope spatial James Webb. Nous exposerons alors les objectifs scientifiques, les agences spatiales concernées et la date de lancement. Nous donnerons également des informations sur les capteurs refroidies embarquées.

MOTS-CLEFS: Capteurs froids, missions spatiales, technologie supraconducteur, MEMS, télescope James Webb.

1 INTRODUCTION

Depuis la nuit des temps, l'humanité a toujours été fascinée par l'espace et par la place de l'homme dans l'univers. L'idée d'envoyer un objet ou un homme dans l'espace est évoquée par des philosophes et des romanciers plusieurs centaines d'années avant que cela ne devienne techniquement possible. Au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle, grâce au développement des moteurs de fusées, aux progrès de l'avionique et à l'amélioration des matériaux, l'envoi d'engins dans l'espace passe du rêve à la réalité. Bien que les débuts de l'air spatial fussent le fruit de la guerre froide entre les Etats-Unis et l'Union Soviétique, nous assistons à l'heure actuelle à l'écriture d'une autre histoire à savoir, l'exploration scientifique à travers des collaborations internationales. Cependant l'exploration scientifique de notre planète ou bien d'astéroïdes,

comme fut le cas pour la mission Rosetta, nécessite l'utilisation de capteurs indispensables à la mesure, à l'étude et à la compréhension.

Dans cet article, nous discuterons de la pertinence de l'utilisation des capteurs refroidies dans le domaine spatial. Nous donnerons ainsi une image instantanée des récents développements sans pour autant lister tous les capteurs refroidis, déjà fortement décrits dans la littérature, utilisés dans les missions spatiales.

Dans la première partie de l'article, nous aborderons les récents développements des supraconducteurs. Nous continuerons, dans la seconde partie, par une discussion concernant l'intérêt de refroidir les capteurs dans le cas d'applications spatiales. La troisième partie sera consacrée à l'étude de l'influence de la position des capteurs dans le vaisseau (satellite ou sonde spatiale). Pour finir, nous donnerons un exemple de future mission. Il s'agira du télescope spatial James Webb. Nous présenterons alors les objectifs scientifiques recherchés, les agences spatiales concernées et la date de lancement. Nous donnerons également des informations sur les capteurs refroidies embarquées.

2 LES RÉCENTS DÉVELOPPEMENTS DES MATÉRIAUX SUPRACONDUCTEURS

A très basses températures, les propriétés électriques et magnétiques de certains matériaux tels le plomb, le mercure ou certains oxydes changent radicalement. Ces matériaux deviennent supraconducteurs : ils n'opposent plus aucune résistance au passage du courant électrique et expulsent les champs magnétiques.

Les supraconducteurs sont déjà utilisés dans de nombreux domaines : électricité, médical et même dans le domaine spatial. Ils sont aussi au cœur des laboratoires, dans les accélérateurs de particule, dans le domaine de l'astrophysique avec les bolomètres, dans des capteurs magnétiques ultrasensibles tel que les SQUID, ou pour produire des champs magnétiques très intenses. Cependant, il faut les refroidir à de très basses températures de l'ordre de 4°K.

La Figure 1 montre l'évolution des découvertes des matériaux supraconducteurs au fil des années. Depuis les années 90, nous avons vu apparaître de nouveaux matériaux supraconducteurs dit à haute température critique HTC. Il s'agit alors des *Cuprates* (empilement de couches de cuivre et d'oxygène) et récemment des *Pnictures* (empilement à base de fer et d'arsenic). En 2015, le record mondial, détenu par des chercheurs de l'institut Max Planck, est établi à -203°K pour le sulfure d'hydrogène H₂S [1].

Une précision concernant les SQUIDS : les récents développements montrent la fabrication de nano-jonctions Josephson en YBa₂Cu₃O₇ à une température de 77°K est reportée en 2011 [2]. La fabrication de nano-capteurs (nano-SQUIDS) en Niobium par lithographie à faisceau d'électron et fonctionnant à 4.2 K est indiquée [3].

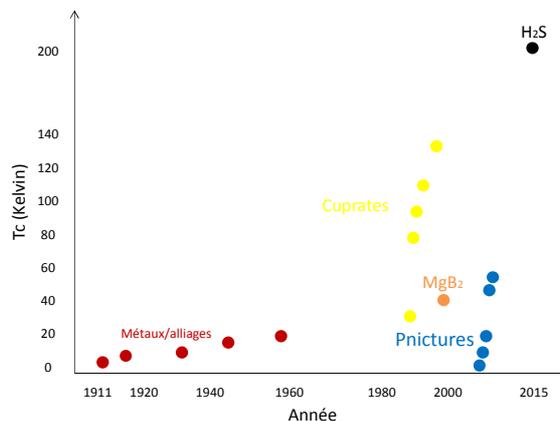


Fig. 1. Evolution des découvertes des matériaux supraconducteurs

3 INTERET DE REFROIDIR LES CAPTEURS

Certains capteurs ne fonctionneront pas correctement en les refroidissant, d'autres verront leurs performances améliorées lorsqu'ils sont placés dans le froid et d'autres enfin nécessiteront obligatoirement d'être refroidis pour fonctionner. Nous allons examiner tour à tour chacune de ces trois possibilités, en prenant des exemples de capteurs parmi ceux qui peuvent être utilisés pour les missions tels que GLAST, XEUS, etc.

3.1 LES CAPTEURS NE FONCTIONNANT PAS CORRECTEMENT DANS LE FROID

Les capteurs qui peuvent présenter un problème dans le fonctionnement à froid sont ceux qui intègrent dans leur constitution des matériaux qui s'améliorent et d'autres qui se détériorent dans le froid. Prenons le cas des capteurs magnétiques comportant un noyau à forte perméabilité. Lors d'une précédente étude menée au LPC2E, nous avons montré l'évolution de la perméabilité d'un noyau magnétique (celui d'une boucle de Rogowski) en fonction de la température. La Figure 2 ci-dessous reporte cette évolution pour trois matériaux : ultraperm, ultraperm 10 et mumétal.

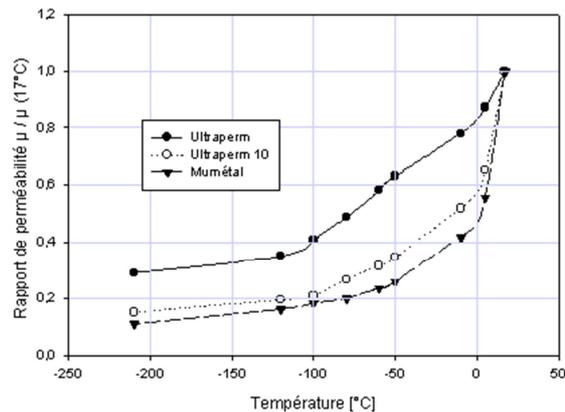


Fig. 2. Evolution de la perméabilité d'un noyau magnétique dans le froid

On constate que la dégradation en température est moins importante pour l'ultraperm que pour les deux autres matériaux, la plus mauvaise correspondant au mumétal.

Toutefois, ces capteurs possèdent un bobinage métallique dont la résistance décroît avec la température, l'évolution globale n'est donc prévisible que par l'expérience, et la figure 3 montre l'évolution de la densité spectrale de bruit du capteur (ramenée à l'entrée) en fonction la température et de la fréquence. Ce qui est intéressant dans ce cas, c'est de voir que le bruit est plus important à -200°C qu'à 17°C . Par contre entre 17°C et -60°C le bruit décroît et augmente ensuite.

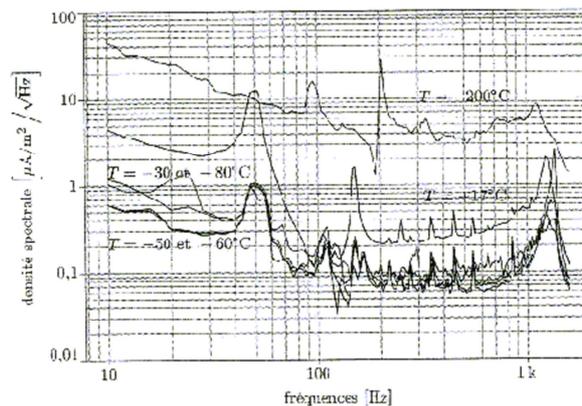


Fig. 3. Bruit d'une boucle de Rogowski (ramené à l'entrée) en fonction de la température.

Le même comportement doit être suspecté pour les autres capteurs magnétiques utilisant des matériaux à forte perméabilité, mais il peut varier selon les cas. Considérons, par exemple, le cas des micro-fluxgates développés par P. Ripka [4] et représentés sur la Figure 4. Malgré les films ferromagnétiques, ce type de micro-capteur présente une stabilité de 30

ppm et une variation de la sensibilité de 0.1 nT/°C. Toutefois cette sensibilité est insuffisante pour certaines missions spatiales qui requièrent des sensibilités de l'ordre du pT.

Cet exemple montre clairement que pour certains capteurs, le refroidissement n'est pas nécessairement préconisé. Toutefois les équipements électroniques (le front-end analogique des capteurs) gagneront évidemment à être refroidis, sans toutefois atteindre le gel des porteurs.

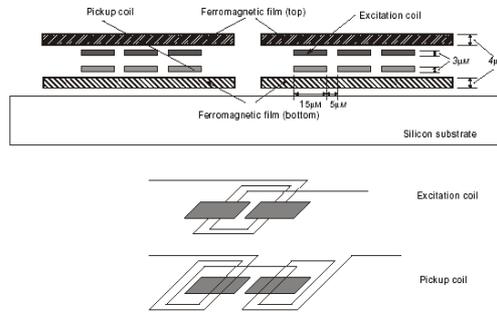


Fig. 4. Structure d'un micro-fluxgate [4]

3.2 LES CAPTEURS QUI AMÉLIORENT LEURS PERFORMANCES DANS LE FROID

Parmi les capteurs qui peuvent améliorer leurs performances, en réduisant la température, on trouve ceux qui utilisent des semi-conducteurs car la densité spectrale de bruit dépend entre autres de la température. Considérons par exemple le cas des capteurs à effet Hall, la densité spectrale de bruit est représentée par la relation suivante :

$$dsp = \frac{\alpha R^2 I^2}{fN} + 4kTR \quad (V^2 / Hz)$$

Dans cette relation, R est la résistance du capteur, N le nombre total de porteurs dans la zone active, α le paramètre phénoménologique de Hooge (environ $5 \cdot 10^{-5}$ à température ambiante), f est la fréquence et T la température absolue. En présence d'un champ magnétique homogène (B) la tension de Hall (Vh) s'écrit :

$$Vh = T_{B-v} B$$

Où T_{B-v} est la fonction de transfert champ-tension. Dans ces conditions, la sensibilité S_I d'un capteur de Hall en fonction du courant équivalent au champ magnétique B est donné par :

$$S_I = \frac{1}{I_d} \frac{dVh}{dB} \approx \frac{1}{n_s} \frac{Vh}{T}$$

Où:

- n_s est la densité d'électrons dans la couche de semi-conducteurs.
- T la temperature
- I_d le courant d'alimentation du capteur.

De même on peut définir la sensibilité en tension par :

$$S_v = \frac{1}{V_d} \frac{dVh}{dB} \approx \frac{\mu W}{L}$$

Où:

- μ est la mobilité des porteurs
- W la largeur et L la longueur du circuit

En utilisant ces relations on peut observer l'évolution des sensibilités S_V et S_I en fonction de la température, par exemple pour des capteurs de Hall InAs/AlGaSb à puits quantique [5], réalisés soit sur un substrat de germanium, soit sur un substrat de GaAs dont les résultats sont reportés sur la Figure 5.

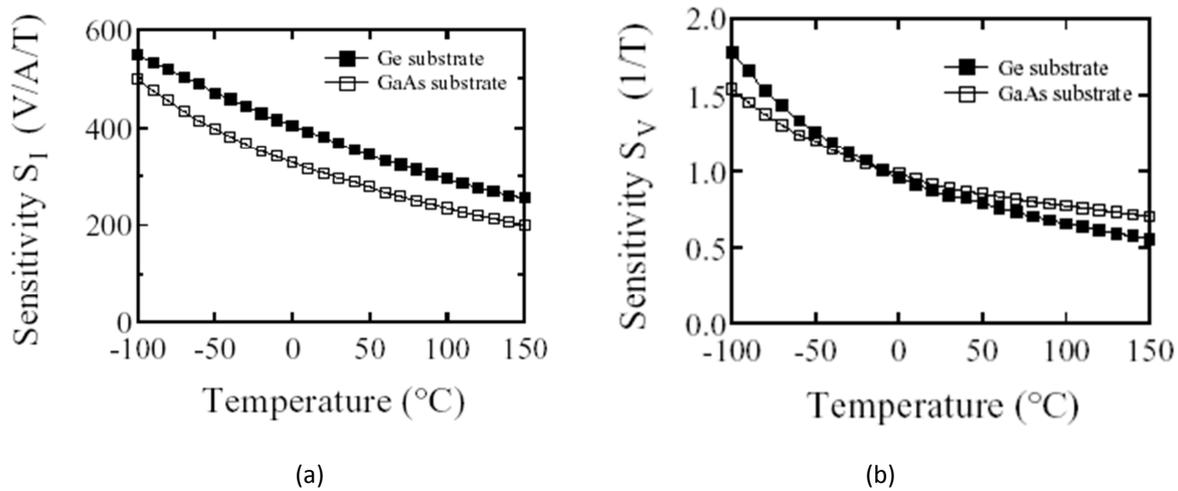


Fig. 5. (a) Sensibilité du courant en fonction de la température pour un courant de 1 mA. (b) Sensibilité de la tension en fonction de la température pour un courant de 1 V.

Dans la gamme des températures reportées par ces auteurs [5] (et qui peuvent être obtenues par des cellules Peltier empilées), on voit que la sensibilité est doublée quand on passe de la température ambiante à -100°C . Il est probable qu'en dessous de cette température, on a encore une amélioration des sensibilités, mais il faut prendre garde au phénomène de gel des porteurs.

Les CCD sont un autre exemple de capteurs dont on améliore les performances en les refroidissant. Les sources de bruit dans les CCD sont diverses mais il y en a trois principales :

- Le bruit de photon (ou bruit statistique) dont le carré de la variance est égale au nombre de photons détectés :

$$\text{var}(n) = \sqrt{n}$$

- Le bruit thermique (ou courant d'obscurité) qui est donné par la racine du produit du temps et du courant d'obscurité à t:

$$T_n = \sqrt{I_{\text{obs}}(t)t}$$

En général ce courant est réduit à la moitié de sa valeur tous les 7°C quand le CCD est refroidi

- Le bruit de transfert des électrons dans le système de lecture (σ_e) qui peut être quantifié par :

$$\sigma_e = \sqrt{nN\varepsilon}$$

Où n est le nombre de transfert effectués, N le nombre de charges transférées et ε le rendement du transfert.

D'autres sources de bruit se rajoutent aux précédentes comme:

- celles liées aux imperfections cristallines du matériau constituant le CCD
- celles de l'électronique de lecture.

Ces sources sont aussi fonction de la température dans le cas général. La Figure 6 montre un exemple d'amélioration de la sensibilité d'un capteur CCD au silicium en le refroidissant.

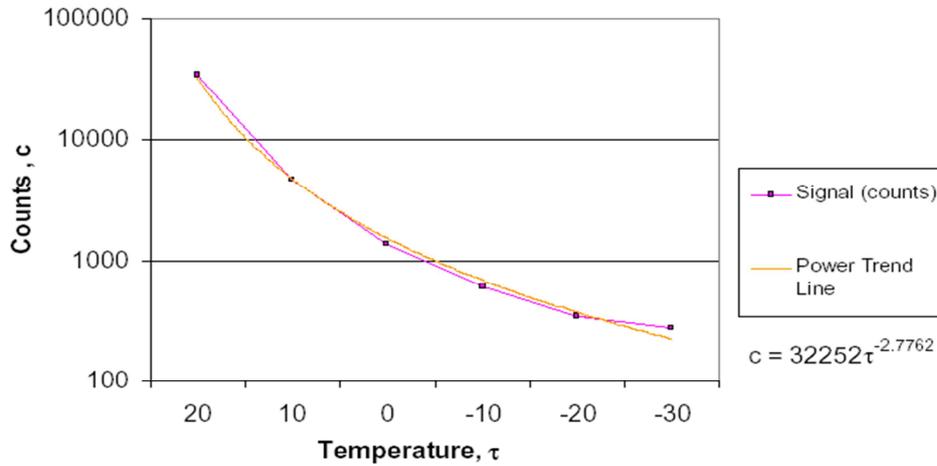


Fig. 6. Sensibilité d'un capteur CCD au silicium en fonction de la température

Le nombre de particules détectées (Counts) correspond au courant obtenu en absence d'illumination. On voit qu'une variation de la température entre l'ambiante et -30°C produit une réduction du courant d'un facteur 1000. En pratique les détecteurs CCD peuvent être refroidis au moyen d'azote liquide, de carbo-glace ou par des systèmes Peltier. Le rendement quantique est aussi fortement amélioré dans le froid, la Figure 7 montre que le rendement approche 100% pour certaines longueurs d'onde.

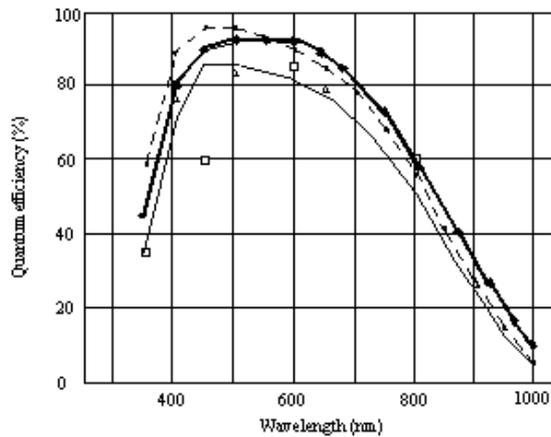


Fig. 7. Rendement quantique d'un CCD à la température de 173 K dans le domaine spectral de 330 à 1000 nm. Les courbes correspondent aux valeurs moyennes, maximum et minimum par rapport aux spécifications du constructeur.

3.3 LES CAPTEURS FONCTIONNANT UNIQUEMENT DANS LE FROID

Plusieurs de ces capteurs refroidis sont embarqués dans des missions spatiales, par exemple les bolomètres, les détecteurs à HgCdTe, les SQUIDS et les TES.

Parmi ceux-ci, on peut distinguer deux types de fonctionnement :

- Les récepteurs hétérodynes fonctionnant à partir de jonctions Josephson (ou parfois avec des diodes en HgCdTe), mais qui semblent de plus en plus laisser la place à des fonctionnements ne nécessitant pas d'oscillateur local.
- Les capteurs bolométriques utilisant directement l'énergie des photons. Selon l'objectif, en submillimétrique, la sensibilité des capteurs bolométriques n'est pas la même. Par exemple en photométrie, une sensibilité de l'ordre de $3 \cdot 10^{19} \text{ WHz}^{-1/2}$, que l'on peut atteindre, est suffisante. Par contre, pour la spectroscopie, la sensibilité doit être de l'ordre de $10^{20} \text{ WHz}^{-1/2}$

ce qui est beaucoup plus difficile à obtenir. Selon la gamme de fréquence, le fonctionnement peut être variable. Ainsi le rayonnement à détecter peut agir directement sur l'élément sensible, ou bien être capté indirectement par absorption dans un matériau, ce qui libère des particules chargées, lesquelles sont à leur tour détectées par les capteurs refroidis. C'est par exemple le cas pour les bolomètres prévus pour les missions GLAST [6], Submillimétron [7] et XEUS [8].

Les capteurs bolométriques sont employés, en ondes millimétriques, pour faire une analyse de l'anisotropie de la polarisation du rayonnement. Pour cela, on utilise des grilles qui agissent comme des polariseurs et l'analyse en longueur d'onde est effectuée grâce à l'empilement de plusieurs grilles. Ces analyseurs doivent être refroidis pour éviter le rayonnement parasite sur les éléments sensibles.

Une autre approche consiste à placer une antenne plane à la sortie de cornets 'corrugués'. Cette antenne est alors directement reliée aux bolomètres.

Deux capteurs particuliers ont été développés, et nécessitent quelques informations complémentaires, il s'agit des capteurs à électrons chauds et des capteurs supraconducteurs à transition de bord (TES).

- Les premiers sont constitués d'une couche métallique (cuivre) recouverte par un supraconducteur.

Le métal est directement couplé à une antenne destinée à recevoir les ondes électromagnétiques ; celles-ci viennent réchauffer le gaz d'électrons de la jonction, provoquant ainsi une variation sa résistance. Il en résulte une variation du courant I traversant ces jonctions, cette variation de courant est détectée par un SQUID. Les Figures 8 (a) et 8(b) illustrent respectivement le principe de fonctionnement et montrent une réalisation observée sous microscope électronique. Ce type de capteur est prévu pour la mission Submillimétron.

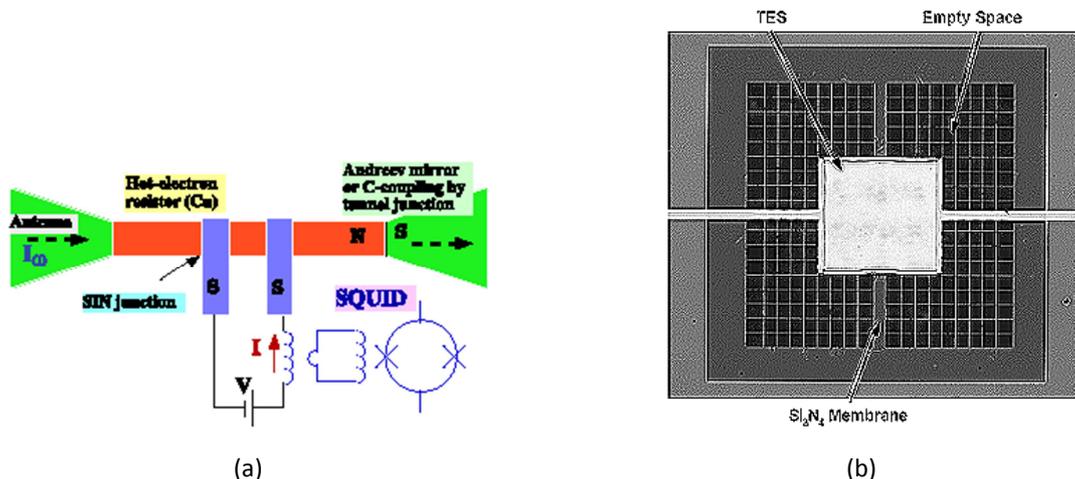


Fig. 8. (a) Schéma du bolomètre NHEB (normal hot electron bolometer) avec lecture à SQUID, (b) un Mo-Cu microcalorimètre TES avec une membrane en Si_3N_4 . Le TES a des dimensions de 400 nm x 400 nm.

- Les seconds sont les capteurs supraconducteur à transition de bord (TES).

Ce type de capteurs est surtout utilisé pour les microcalorimètres à rayons X, mais il est aussi envisagé pour des missions susceptibles de recevoir directement les particules spatiales. Comme dans le cas précédent, il s'agit d'une bicouche métallique, l'un des métaux étant supraconducteur. L'ensemble se comporte comme un supraconducteur unique, (par effet de proximité le supraconducteur induit une zone mince supraconductrice dans le métal normal). La Figure 9 montre un exemple de réalisation sur une membrane de nitrure de silicium, et construite selon les techniques des microsystèmes (MEMs). Il s'agit d'une bicouche Mo-Cu ayant une température de transition très étroite, à 93 mK. Ce type de détecteur est prévu pour équiper les missions de détection de rayons X comme ConstellationX [9].

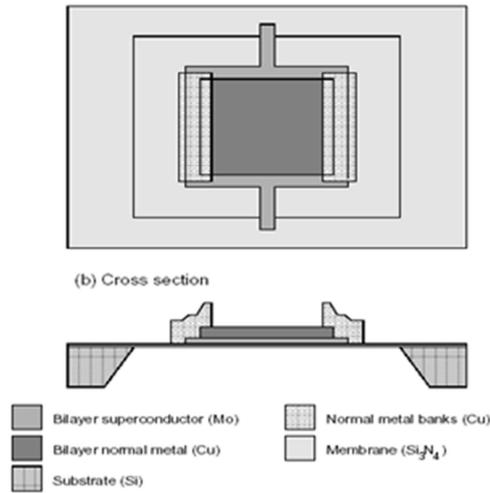


Fig. 9. Capteurs supraconducteur à transition de bord (TES) en technologie MEMS.

La Figure 10 montre les premiers étages du circuit de lecture, qui utilise des SQUIDS montés en amplificateurs.

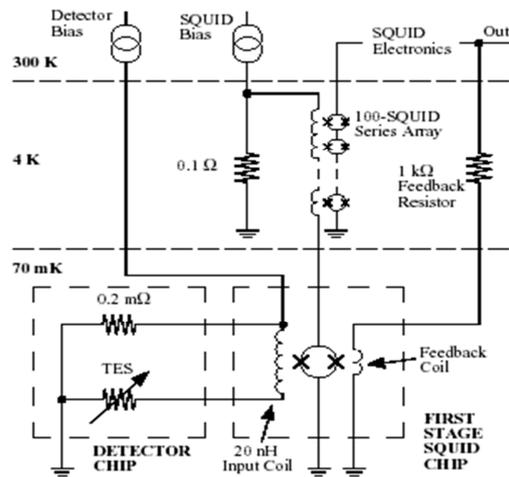


Fig. 10. Circuit de lecture d'un capteur TES avec des SQUIDS comme amplificateurs

4 INFLUENCE DE LA POSITION DES CAPTEURS SUR LES VAISSEAUX

On peut considérer deux classes de capteurs, selon qu'ils sont situés à bord du satellite ou largement déportés.

a) Cas des capteurs à bord du satellite.

Il s'agit principalement de capteurs qui reçoivent un rayonnement et qui ne sont pas perturbés par la présence des équipements embarqués. C'est le cas par exemple des capteurs de particules énergétiques, du rayonnement électromagnétique à fréquence élevée ou encore des satellites d'observation dans le domaine optique. Dans ce cas, le satellite n'a pratiquement pas d'influence sur l'observation. Les capteurs en question peuvent alors facilement bénéficier d'une infrastructure locale dans le satellite. Cette classe de capteurs se prête bien au refroidissement. On peut citer ainsi :

- Les CCD
- Les récepteurs bolométriques micro-ondes et infrarouge...etc.

b) Cas des capteurs déportés

On trouve ces capteurs lorsque l'on cherche à étudier le milieu ambiant du satellite ou lorsque que les capteurs sont sensibles à des signaux dont les bandes passantes sont situées dans les mêmes bandes que celles des signaux de bord; quand l'une de ces situations se présente, il faut assurer un blindage très efficace et s'éloigner du vaisseau pour éviter les interférences.

Les capteurs d'ondes (électriques ou magnétiques) dans les bandes : UBF, SBF, EBF, TBF, BF, MF et HF (soit entre quelques Hz et 30MHz) sont, en général, tous déportés. La mesure de particules ambiantes faiblement énergétiques (électrons ou protons par exemple) pose le même problème car la présence du satellite peut perturber leur densité.

Pour assurer des mesures valables, il faut éloigner les capteurs du corps du satellite, en les disposant sur des bras dont les longueurs sont variables en fonction de la sensibilité des capteurs et du blindage du satellite. Par exemple, une revue critique des paramètres pour la modélisation et la conception des sondes électriques placées sur satellites a été faite au LPC2E [10]. Chaque cas est un cas d'espèce en fonction des conditions expérimentales et de la nature de la mission. Pour illustrer l'importance de l'influence du satellite sur les mesures, on peut citer le cas de Déméter [11]. Ce microsatellite est équipé de capteurs électriques et magnétiques pour étudier les ondes en provenance du globe terrestre lors d'un événement sismique. Le capteur magnétique est un ensemble de trois search-coils destinés à mesurer les trois composantes magnétiques des ondes. Ce capteur est situé à l'extrémité d'un bras déployé dans l'espace. Toutefois l'éloignement au vaisseau est insuffisant et le blindage du satellite insuffisamment efficace, et il en résulte que les mesures à basse fréquence sont extrêmement perturbées par les équipements de bord, ce qui rend inexploitable toute une bande de fréquence des mesures magnétiques.

Dans ces conditions, est-il envisageable de placer des capteurs froids déportés ? Une réponse globale ne semble pas possible puisque chaque cas est particulier, toutefois certaines contraintes imposent des limitations, par exemple le poids total de l'équipement placé à l'extrémité d'un bras est un facteur essentiel. Des cas de Cryo générateurs, relevés dans la littérature [12][13][14], sont conçus pour être localisés sur la plateforme des satellites mais ils peuvent refroidir un capteur déporté en amenant le froid par des capillaires.

Une autre solution, radicalement différente, consiste en un Cryo générateur miniature fonctionnant sans parties mécaniques [15]. Le principe repose sur l'extraction d'électrons chauds dans une couche métallique, la figure 11 (a) en montre le principe et une réalisation est représentée sur la figure 11 (b). Le dispositif est constitué d'un empilement formé d'une couche métallique, d'un isolant très mince et d'un supraconducteur. Un courant tunnel traverse l'empilement et extrait des électrons du métal ce qui retire de l'énergie aux électrons et aux phonons. On a pu obtenir ainsi des températures de 225 mK. Naturellement, il faut un système de froid initial pour obtenir un supraconducteur, mais localement le froid peut être plus important que celui produit par une source localisée sur le satellite et reliée au capteur par un capillaire placé sur le bras. Cette technique, si elle se développe, pourrait être intéressante pour des capteurs nécessitant une température de 100mK comme les TES par exemple.

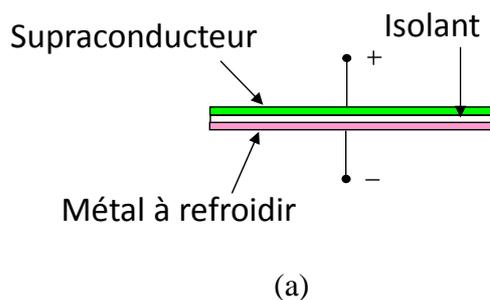


Fig. 11. (a) Principe de fonctionnement du cryo-générateur à base d'extraction d'électrons chauds. (b) Refroidissement d'un cube métallique (image par microscope à électron)

5 EXEMPLE DE FUTUR MISSION : LE JAMES WEBB SPACE TELESCOPE

Le projet JWST (*James Webb Space Telescope*) concerne le successeur du télescope spatial Hubble, et il pourrait devenir opérationnel en 2018. Il est prévu une orbite Lissajous L2 (soit à environ 1.5 millions de km de la terre). Initialement ce projet était désigné par NGST (Next Generation Space Telescope). La Figure 12 montre les différentes caractéristiques du projet JWST [16].

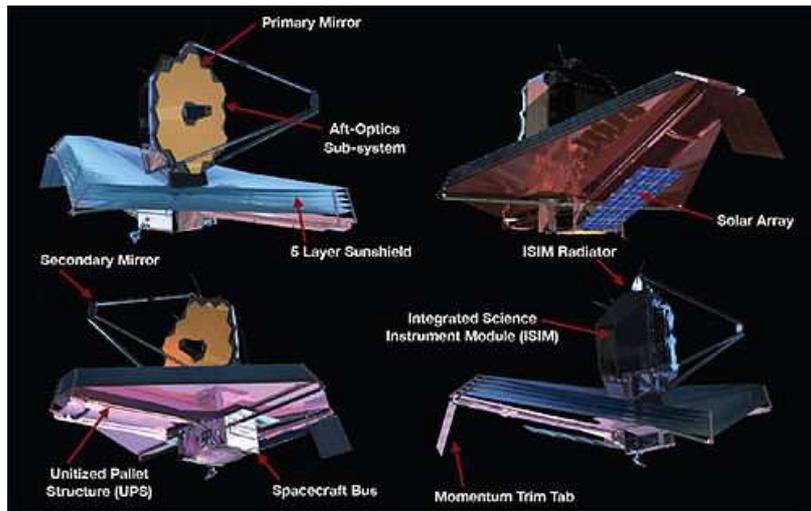


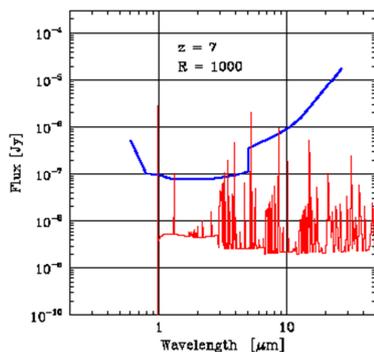
Fig. 12. Différentes vues montrant les caractéristiques du télescope JWST.

5.1 OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Ce télescope spatial sera conçu pour étudier les premières galaxies et quelques-unes des premières étoiles formées après le big-bang. Ces objets présentent le point commun d'avoir un déplacement spectral des raies rouges vers l'infrarouge, ce qui signifie que les meilleures observations se feront dans l'infrarouge, avec toutefois quelques observations dans le domaine visible. Les points clés de ce projet concernent:

- la compréhension et la découverte de la formation des premières étoiles et des galaxies
- l'évolution des galaxies
- le processus de formation des étoiles et des planètes.

Avec un temps d'observation suffisant, JWST doit être capable de faire une détection individuelle d'étoiles massives « zero-metallicity ou population III » dont la température prévue est de 100 000 K. A ces températures, l'hélium et l'hydrogène sont ionisés. Du point de vue des observations en général, on n'est pas capable d'effectuer des mesures, mais on peut définir une limite supérieure. La Figure 13 ci-dessous montre la sensibilité simulée de JWST par rapport à la distribution énergétique spectrale des objets à observer.



Synthetic spectrum of a $Z=10.3Z_{\odot}$ starburst object at $z=7$ containing $106 M_{\odot}$ in massive stars (thin line) compared to the spectroscopic limit of JWST at $R=1000$ (thick line). The JWST sensitivity refers to 4×10^5 exposures with $S/N=10$.

Fig. 13. Sensibilité simulée de JWST par rapport à la distribution énergétique spectrale des objets à observer

5.2 EQUIPEMENTS SCIENTIFIQUES

JWST comporte trois éléments majeurs :

- ISIM : un module d'instruments scientifiques intégrés
- OTE : les éléments du télescope optique
- SSM : le module de support spatial.

ISIM consiste en un système distribué d'instruments cryogéniques intégrés avec OTE. ISIM est constitué de 3 éléments modulaires d'instruments scientifiques : NIRCam, NIRSpec et MIRI. À cela s'ajoutent les capteurs de positionnement.

Les capteurs infrarouges couvrent la bande de 0.6 à 5 μm en deux sous bandes, l'une de 0.6 à 2.3 μm et l'autre de 2.3 à 5 μm .

- NIRCam est un coronographe
- NIRSpec est un spectromètre
- MIRI est un imageur et un spectromètre couvrant la gamme de 5 à 27 μm .
- Les détecteurs utilisés sont soit en HgCdTe, soit en InSb, les performances des deux systèmes étant actuellement à l'étude.

Le froid est apporté par un cryostat à hydrogène solide est construit par *Lockeed Advanced Technology*. Il comporte deux parties, l'une destinée à la partie optique et l'autre aux détecteurs.

5.3 AGENCES SPATIALES IMPLIQUÉES DANS LE PROJET

Trois agences spatiales sont concernées par ce projet, la NASA, l'ESA, et le CSA (*Canada Space Agency*). Le lancement est prévu pour octobre 2018.

6 CONCLUSION

On doit commencer par une première remarque importante en notant que l'introduction du froid, dans les missions spatiales, ne peut pas être considérée aujourd'hui, comme exceptionnelle. En dehors du projet JWST répertoriés ci-dessus, il existe des satellites qui ont été placés en orbite et qui comportent de la cryogénie c'est le cas, par exemple, du télescope SPITZER (anciennement SIRTFF), qui fut lancé en Août 2003, et qui a fait des observations aux longueurs d'ondes comprises entre 3 et 180 μm . Il contient un cryostat de 360 l destiné à produire le froid nécessaire à trois instruments et pour une durée de 5 ans. En février 2005, après 541 jours de vol, il avait été déjà effectué plus de 10 000 observations scientifiques.

La deuxième remarque concerne les nouveaux supraconducteurs à haute température critique. Bien que ces nouveaux matériaux ouvrent la voie à de nouvelles applications dans le domaine de l'énergie (stockage) ou bien pour le transport des forts courants, leurs application dans le domaine spatiale n'est pas à l'ordre du jour. En effet, ils nécessitent encore d'être refroidi au moins à la température de l'azote liquide ou bien nécessitent une forte pression pour effectuer la transition vers les supraconducteurs comme dans le cas du gaz H_2S où une pression de 1,5 mégabars était nécessaire. De plus, des progrès et des développements de jonctions Josephson ainsi que de nano-SQUIDS fonctionnant à une température critique supérieure à 70°k restent à faire.

En ce qui concerne les capteurs, la sensibilité n'est pas toujours améliorée dans le froid. Cependant, dans le cas d'un satellite disposant de cryogénie, on peut se poser la question de savoir si les capteurs qui ne présentent pas d'amélioration dans le froid ne peuvent pas être remplacés par d'autres ayant de meilleures performances en refroidissant. C'est le cas des search-coils et micro-fluxgates qui pourraient être remplacés par des SQUIDS. Le problème des capteurs déportés devra être résolu par l'utilisation de capillaires attachés aux bras de déploiement. Il faut noter que le remplacement des capteurs existants n'est pas toujours évident, le cas des boucles de Rogowski étant typique de ce point de vue.

REFERENCES

- [1] A. P. Drozdov, M. I. Erements, I. A. Troyan, V. Ksenofontov & S. I. Shylin, « Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system » Nature 525, 73–76, September 2015
- [2] Thomas Wolf, « Etude de nanojonctions Josephson à haute température critique en vue d'applications Térahertz », thèse de doctorat UPMC, 2011.
- [3] C. Granata et al, « Hysteretic NanoSQUID Sensors for Investigation of Iron Oxide Nanoparticles », IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 06/2013.
- [4] P Ripka, S Kawahito, SO Choi, A Tipek, M Ishida "Micro-fluxgate sensor with closed core » Sensors and Actuators A: Physical 91 (1), 65-69, 2001
- [5] M Behet, J Bekaert, J De Boeck, G Borghs "InAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}Sb quantum well Hall effect sensors » Sensors and Actuators A: Physical, 2001
- [6] <http://www.nasa.gov/content/fermi-gamma-ray-space-telescope>
- [7] <http://www.asc.rssi.ru/submillimetre/submill.htm>

- [8] http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/XEUS_overview
- [9] <http://constellation.gsfc.nasa.gov/science/>
- [10] Kolesnikova, E., and C. Béghin, "Instability problem of the electric field antennas on the POLAR spacecraft", *Radio Science*, 36, 2, 203-221, 2001
- [11] Parrot M., "The micro-satellite DEMETER", *Journal of Geodynamics*, 33, 535-541, 2002
- [12] Ross, R. G. et al. « NASA advanced cryocooler technology development program », *Proc. SPIE : IR space Telescopes and Instruments* Vol 4850 p1020-1028 (2002)
- [13] Linder, M. et al, "Cryogenics in Space, A review of the missions and technologies", *ESA Bulletin* n° 107 p92 (2001)
- [14] Nieczkoski, S. "Demonstration of an efficient cooling approach for SBIRS-Low", *Proc. of the Cryogenic Engineering Conf. : Advances in Cryogenic Engineering* Vol 613 p 1268-1275 (2002)
- [15] A. M. Clark et al. « Cooling of bulk material by electron-tunneling refrigerators », *Applied Physic*, 2005
- [16] <http://www.jwst.nasa.gov/>