

## Introduction

« Il déclare (Galilée) que dans tous ces phénomènes il faut mesurer tout ce qui est mesurable, et tâcher de rendre mesurable tout ce qui ne l'est pas directement. Il ne s'agit donc pas de poser des principes, les uns métaphysiques, les autres mathématiques, puis d'essayer d'en conclure *a priori* quelles doivent être les lois physiques ; mais il s'agit d'abord d'observer, d'expérimenter, de mesurer, de compter, et ensuite de demander aux mathématiques et au raisonnement la formule, l'analyse, la transformation et le développement des résultats obtenus. »<sup>1</sup> Cette analyse de Thomas-Henri Martin est tout à fait actuelle et représente les défis de l'expérimentateur. La mesure se trouve imbriquée dans son interprétation à son incertitude et à l'instrument, utilisé. En extraire l'essence requiert donc la connaissance de cet instrument, qu'il soit mathématique ou physique. Dans le cas de cet ouvrage, nous nous concentrerons sur un cas particulier qui est celui de la détection et de la mesure de la polarisation des photons du fond diffus cosmologique. Il s'agit d'un signal vieux de près de 14 milliards d'années et qui présente à lui seul l'un des défis majeurs de la cosmologie observationnelle contemporaine (Weinberg 2008). Cette détection ou mesure demande la mise en place de dispositifs expérimentaux exceptionnels, tant sur le plan de l'architecture que celui des composants<sup>2</sup>. Cet ouvrage s'intéressera en particulier aux composants. Définissons ces derniers comme l'ensemble des éléments qui conduisent les photons, en séparent les polarisations, en modulent la réponse, en filtrent la fréquence, pour enfin les voir s'anéantir dans un détecteur. Nous nous intéresserons à tout ce que le signal rencontre avant d'arriver au détecteur. Seront abordées également toutes les problématiques allant de la conception à l'intégration en passant par la fabrication. Pour essayer

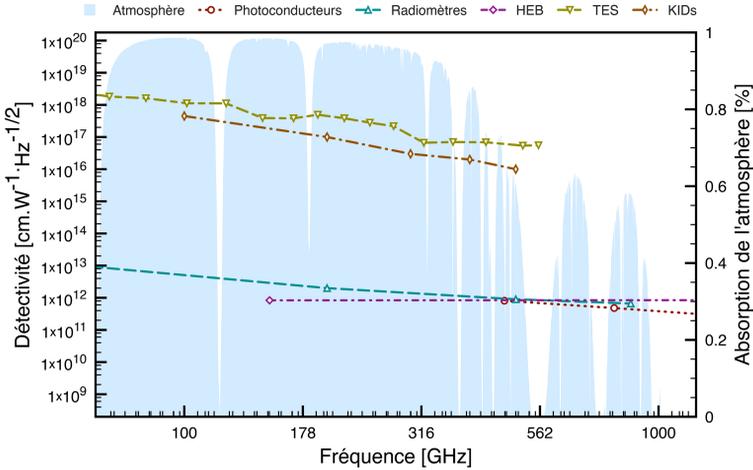
---

1. Th.-Henri Martin, *Galilée, les droits de la science et la méthode des sciences physiques* (1868).

2. Le lecteur pourra se référer à l'ouvrage *Une aventure dans la recherche des ondes gravitationnelles primordiales* (ISTE Group, 2023).

d'en comprendre les détails, commençons par introduire ces différentes technologies et les défis qu'elles représentent pour la cosmologie expérimentale.

## 1.1. Les détecteurs et leurs matrices



**Figure 1.1.** Comparaison des détectivités de plusieurs technologies de détecteurs dans le millimétrique et l'infrarouge. Cas des Transition Edge Sensor (TES) et des Kinetic Inductance Detectors (KID) calculés pour PRISM. Cas des radiomètres (4,2 K), des Hot Electron Bolometer (HEB) et des photoconducteurs à partir de (Rogalski 2017).

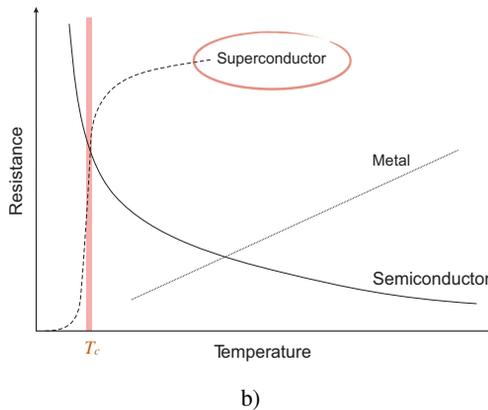
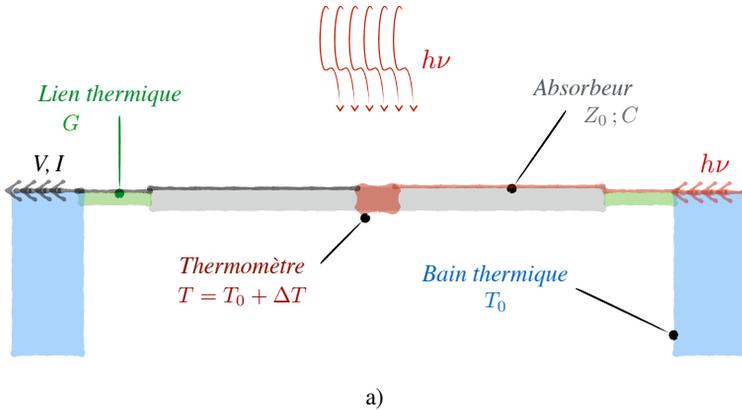
L'amplitude des modes B de polarisation du fond diffus cosmologique est tellement faible que leur détection nécessiterait des détecteurs ultrasensibles. Ces détecteurs devraient alors avoir cette sensibilité dans les longueurs d'onde millimétriques, car, étant donné la température de corps noir (Weinberg 2008) du fond diffus cosmologique, c'est là que le signal est maximal. Sur Terre, les observations devront se faire dans les bandes de transmission de l'atmosphère. La figure 1.1 en montre la distribution spectrale. Plusieurs technologies existent pour la détection millimétrique. Pour les comparer, définissons la détectivité :

$$D^* = \frac{\sqrt{A_{det}}}{NEP_{det}} \quad [I.1]$$

avec  $A_{det}$  l'aire du détecteur et  $NEP_{det}$ <sup>3</sup> le bruit équivalent en puissance du détecteur (voir équation I.3). La compilation des données de (Rogalski 2017) permet de

3. Noise Equivalent Power.

comparer les détectivités des radiomètres à 4,2 kelvin, des bolomètres à électrons chauds ou *Hot Electron Bolometer* (HEB) à 4 kelvin au cas des bolomètres supraconducteurs ou *Transition Edge Sensor* (TES) et des détecteurs à inductance cinétique ou *Kinetic Inductance Detectors* (KID) calculés pour PRISM. La figure I.1 montre la supériorité claire des KID et des TES par rapport aux autres technologies. On atteint ici une sensibilité limitée uniquement par le bruit de photons incidents.



**Figure I.2.** a) Principe de fonctionnement d'un bolomètre.  
b) Variation de la résistance en fonction de la température pour différents types de thermomètres

Pour mieux comprendre ce que cela signifie, prenons le cas d'un TES. La figure I.2 en montre le principe de fonctionnement. Un absorbeur subit un échauffement lorsqu'un rayonnement s'y dépose. Cet échauffement est ensuite mesuré par un thermomètre, dont la résistance varie en fonction de la température. Ce thermomètre peut

être supraconducteur, métallique ou semi-conducteur. Dans notre cas, il est supraconducteur. Si nous le maintenons à sa transition normal/supraconducteur, la résistance devient très sensible aux fluctuations de température. Si nous polarisons le bolomètre en tension fixe  $V_f$ , nous pouvons alors extraire la puissance thermique relative  $P_{var}$  en mesurant le courant aux bornes du thermomètre :

$$P_{var} = \frac{V_f^2}{R(T)} \quad [I.2]$$

Le lecteur pourra se référer à (Camus 1999) pour plus de détails. Il est toutefois utile de rappeler le bruit équivalent en puissance d'un bolomètre supraconducteur :

$$NEP_{bolo}^2 = NEP_{phonons}^2 + NEP_{johnson}^2 + NEP_{photons}^2 \quad [I.3]$$

avec :

– le bruit de phonon :

$$NEP_{phonons}^2 = 4k_B T^2 G \quad [I.4]$$

où  $k_B$  est la constante de Boltzman,  $T = T_0 + \Delta T$ ,  $T_0$  la température du bain et  $\Delta T$  la fluctuation de température.  $G$  est la conductance dynamique qui caractérise le lien entre le thermomètre et le bain thermique. Il s'agit d'un bruit principalement dû à la propagation de vibrations thermiques dans le réseau cristallin. La géométrie joue donc un rôle central ici. En fonction des géométries, des limites peuvent être atteintes par les processus de fabrication quant à la structuration des poutrelles et des membranes sur lesquelles sont suspendus les thermomètres ;

– le bruit de Johnson ou de Nyquist :

$$NEP_{johnson}^2 = \frac{4k_B T R \Delta\nu}{S^2} \quad [I.5]$$

où  $R$  est la résistivité,  $\Delta\nu$  la largeur de bande et  $S$  la réponse du bolomètre. Il s'agit là d'un bruit lié à l'agitation thermique des électrons. Il est souvent lié à la stabilité de l'environnement cryogénique et à l'électronique de lecture ;

– le bruit de photon :

$$NEP_{photons}^2 = 2h^2\nu_0^2 \langle n_0 \rangle \Delta\nu + 2 \frac{(h\nu_0 \langle n_0 \rangle \Delta\nu)^2}{\Delta\nu} \quad [I.6]$$

où  $h$  est la constante de Planck et  $\nu_0$  la fréquence centrale d'opération. Ce bruit est lié à la distribution statistique du nombre de photons arrivant sur le détecteur. Les

photons obéissant à la statistique de Bose Einstein, il y a une limitation intrinsèque du nombre de photons qui peuvent être reçus par unité de temps, par mode spatial et par fréquence (ou énergie), soit :

$$\langle n_0 \rangle = \left( e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1 \right)^{-1} \quad [I.7]$$

Il s'agit là de la véritable limitation de la détection bolométrique. Pour augmenter la sensibilité, il faut donc nécessairement augmenter le nombre de détecteurs. Nous parlons donc de matrices de détecteurs. La fabrication des matrices de bolomètres supraconducteurs pose des défis particuliers qui seront abordés pour le cas de PolarBear et de QUBIC. Les matrices intégrées posent également d'autres défis d'intégration, d'électronique de lecture et de couplage optique. Dans la suite sera abordée la problématique du couplage optique.

## I.2. Les technologies de détection, toujours en matrice

Tout ce qui se situe entre le ciel et le détecteur permet d'acheminer les photons du ciel vers le détecteur. Il s'agit, si l'on peut l'écrire ainsi, d'une succession d'adaptations d'impédances qui se veulent les plus parfaites possible. Deux grandes problématiques se posent ici : la première concerne l'assemblage intelligent des composants ; la seconde, que nous aborderons ici, se focalise sur les propriétés des composants individuels. La figure I.3 montre les différentes technologies et les différents composants habituellement utilisés dans les expériences de CMB.

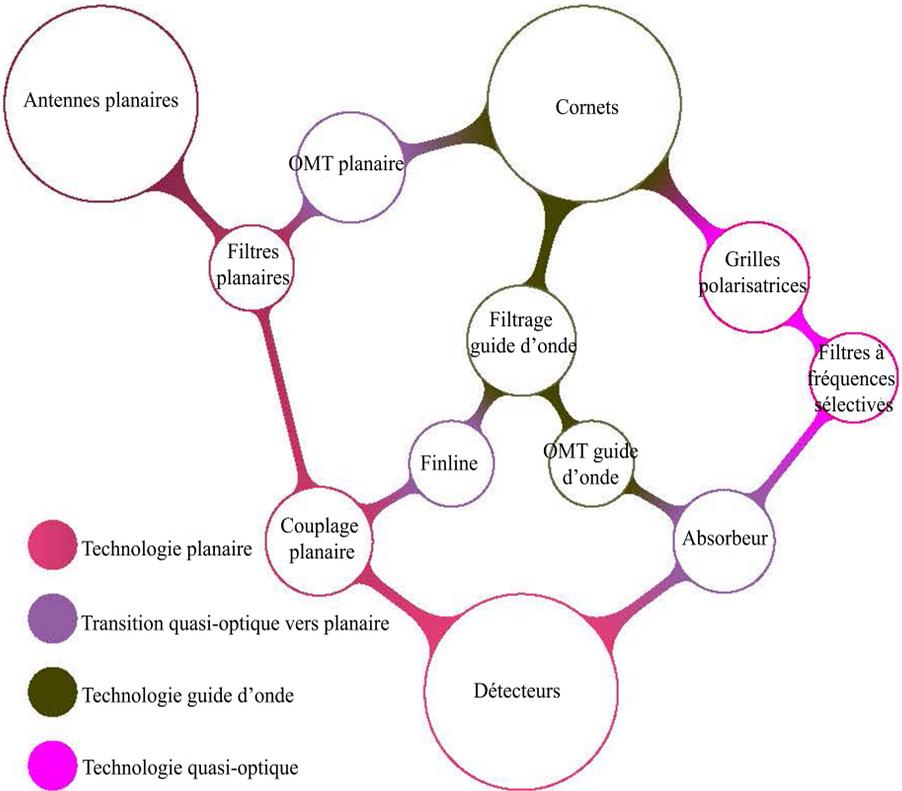
Historiquement, ce sont les cornets qui faisaient partie des premiers éléments optiques après le télescope et les éventuels modulateurs de polarisation. La raison est que ces composants quasi optiques permettent une définition très propre de la polarisation et des lobes d'antennes. Cette technologie a été utilisée pour l'instrument Planck HFI et est encore utilisée aujourd'hui pour les instruments ACTpol, SPTpol ou encore QUBIC. ACTpol et SPTpol extraient les deux polarisations linéaires par l'intermédiaire d'un diplexeur de polarisation planaire qui assure la transition d'un mode de propagation quasioptique à un mode de propagation quasi-TEM<sup>4</sup>.

Tous les éléments qui suivent (filtrage, dissipation thermique sur les thermomètres) sont également planaires. L'ensemble est donc microstructuré en matrices sur des substrats monolithiques. QUBIC a fait le choix différent d'utiliser les modes quasioptiques pour le filtrage et la séparation des polarisations (par grilles). Le couplage avec le thermomètre se fait par l'intermédiaire d'une grille d'absorption dont l'impédance est adaptée à celle du vide. Ce choix est le résultat de l'architecture choisie pour QUBIC. PolarBear a, quant à lui, fait un choix entièrement planaire. Les polarisations

---

4. Transverse électrique magnétique (TEM).

sont séparées directement par des antennes planaires couplées à des microlentilles. Le signal se propage ensuite entièrement en quasi-TEM sur une structure planaire.

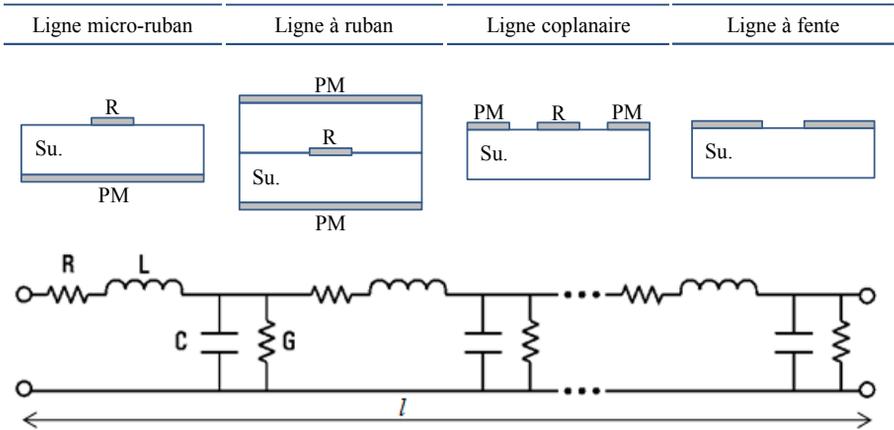


**Figure I.3.** Arborescence des technologies couramment utilisées dans les expériences de CMB pour acheminer le signal astrophysique du ciel aux détecteurs

Pour la suite, il est nécessaire d'avoir un aperçu des technologies des lignes de propagation planaires. La figure I.4 en résume les grandes lignes.

Pour PolarBear, c'est la technique microruban qui a été utilisée. Pour PolarBear 2, les épaisseurs réduites de substrats et la connaissance des propriétés des matériaux ont permis de passer outre cette limitation géométrique et d'utiliser des passages en coplanaire ou en fente au gré des capacités et des inductances localisées, dont il y avait besoin. Cette capacité de pouvoir jouer sur les propriétés d'une ligne planaire a permis d'explorer d'autres manière de faire, en ralentissant l'onde électromagnétique (étude du chargement inductif des antennes sinus log-périodiques dans le cadre du projet AO/1-7393/12/NL/MH de l'ESA) (voir section 5.5). Un autre exemple est l'utilisation

de métamatériaux main gauche qui permettent, en exploitant une invisibilité spectrale localisée, de réduire la taille des composants tout en augmentant leur largeur de bande (coupleur hybride conçu et fabriqué dans le cadre de la collaboration COSMOS) (voir section 5.4).



**Figure I.4.** Résumé des principales technologies de lignes de transmission planaires utilisées