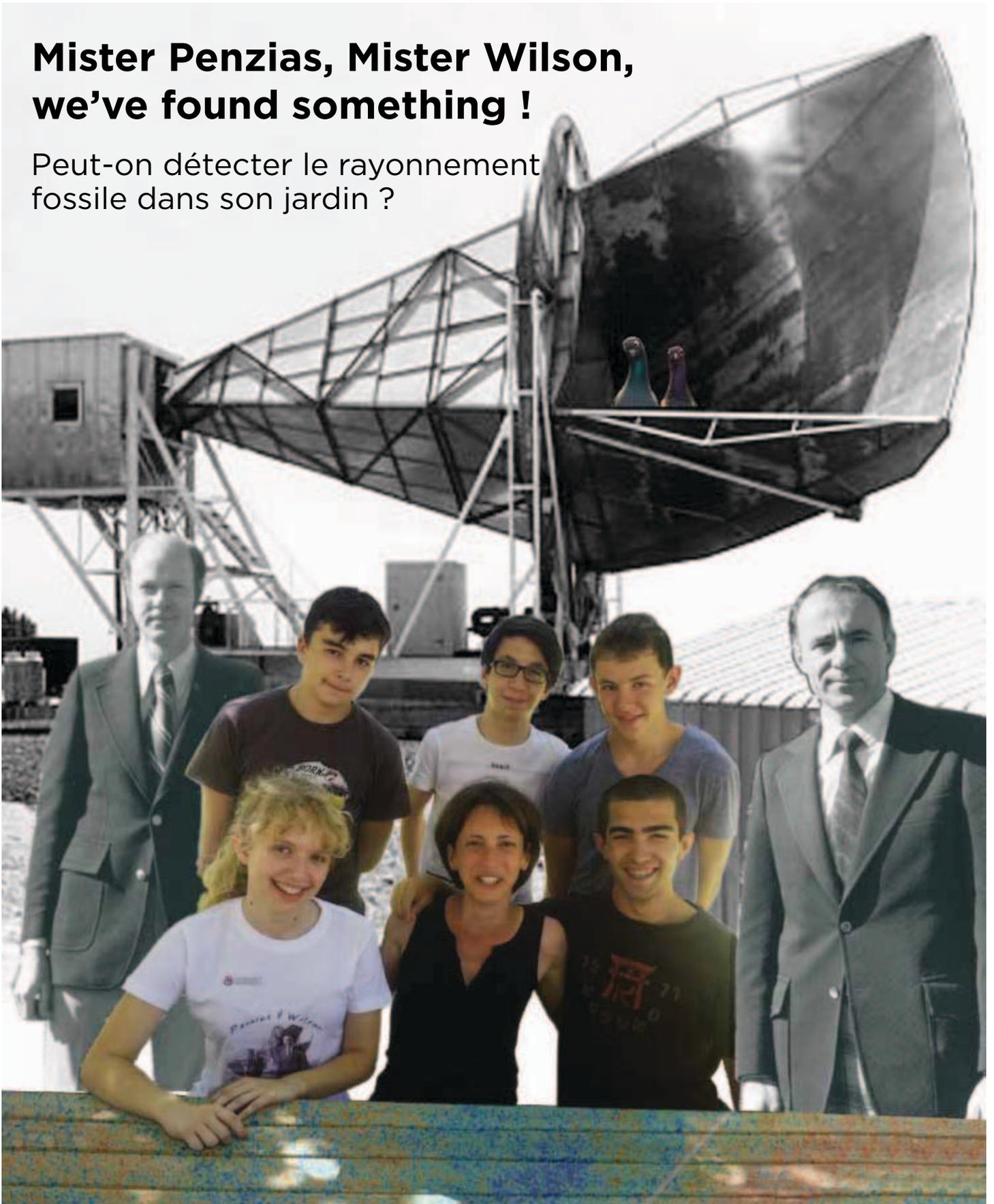


Mister Penzias, Mister Wilson, we've found something !

Peut-on détecter le rayonnement fossile dans son jardin ?



Élèves :

Morgane Toureille (Terminale S)
Jacky Gentile (Terminale S)
Thibaud Caillet (Première S)
Gaspard Petitclair (Première S)
Axel Pruvot (Première S)

Professeure référente (Lycée Marie Reynoard) :
Nadège Buriller

Ingénieure d'études référente (LPSC) :
Myriam Migliore

Table des matières

Résumé.....	2
Acronymes et sigles.....	3
Remerciements.....	4
I- Modèle cosmologique du Big Bang de $t = 0s$ à l'émission du rayonnement fossile.....	6
II- Réalisation d'une maquette pédagogique pour matérialiser le scénario du Big Bang de $t = 0s$ à l'émission du rayonnement fossile.....	8
1. Création d'une frise avec des notes de musique.....	8
2. L'électronique de la maquette.....	8
3. Réalisation du chenillard de la maquette avec des DEL.....	10
a) La réalisation du schéma et son fonctionnement.....	10
b) La révélation.....	11
c) Le perçage et le soudage des composants.....	11
III- Le rayonnement fossile.....	12
1. La découverte de Arno Penzias et Robert Wilson en 1965.....	12
2. Ses caractéristiques.....	12
a) Qu'est ce qu'un corps noir ?.....	12
b) Loi de Planck.....	13
c) Le spectre électromagnétique du rayonnement fossile.....	14
d) Modélisation du spectre électromagnétique du rayonnement fossile avec la loi de Rayleigh-Jeans.....	14
IV- Notre expérience dans les pas de Arno Penzias et Robert Wilson 50 ans plus tard : la chaîne expérimentale.....	15
1. Le dispositif de Penzias et Wilson.....	15
2. La chaîne instrumentale réalisée au laboratoire.....	16
a) Descriptif.....	16
b) Améliorations du dispositif.....	20
V- Réalisation des mesures expérimentales.....	21
1. Étalonnage de l'antenne.....	21
a) Mise en station.....	21
b) Position de l'antenne en azimut et élévation.....	22
c) Conversion de la puissance du signal reçu en température.....	23
d) La calibration de l'antenne.....	23
2. La cartographie du ciel.....	24
3. L'atmosphère terrestre.....	25
4. Exploitation des données.....	26
5 - Calcul des incertitudes.....	27
a) Incertitude de répétabilité pour V_{ciel} moyen notée $\sigma(V_{\text{ciel}} \text{ moyen})$	27
b) Pour une élévation donnée, incertitude type composée pour T_{ciel} notée $u(T_{\text{ciel}})$	28
c) Ajustement du modèle mathématique de la droite $T_{\text{ciel}}=f(\text{épaisseur d'air relative})$ avec le $k_{\text{hi}2}$	28
6 - Résultat expérimental final.....	29
VI - Conclusion.....	30
Album de photographies de l'équipe du LPSC avec les Olympiens :.....	31
Bibliographie.....	32

Résumé

L'Organisation Internationale des Nations Unies a proclamé « **2015 : Année Internationale de la Lumière et des Techniques utilisant la lumière** ».

En partenariat avec le Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble (LPSC), nous eûmes alors l'idée de réaliser, *50 ans après*, l'expérience historique de Arno Penzias et Robert Wilson de **détection de la lumière primordiale**, appelée **rayonnement fossile** ou CMB (*Cosmic Microwave Background*). Cette lumière primordiale, prédite par Georges Gamow en 1948, fut la troisième preuve majeure de la crédibilité du scénario du Big Bang.

A l'occasion d'une conférence, Michel Piat, enseignant chercheur à l'Université Paris/Diderot et au laboratoire d'AstroParticule et Cosmologie (APC), annonce que la détection du CMB peut se faire *dans son jardin* avec simplement une parabole satellite mais aussi (un peu moins simple) un peu d'azote liquide...

Faute de jardin approprié, nous avons installé sur les toits du LPSC, une antenne parabolique de réception TV satellitaire pour détecter les plus vieux photons du monde. En effet, cette lumière a été émise 380 000 ans après le Big Bang au moment où la température de l'Univers était suffisamment basse pour que les photons n'interagissent plus avec les électrons libres et puissent ainsi se propager.

Durant une année, nous nous sommes glissés dans la peau des 2 chercheurs, Robert Wilson et Arno Penzias.

Acronymes et sigles

AP	Aide Personnalisée
APC	AstroParticule et Cosmologie
BNC	Bayonet Neill-Concelman connector , connecteur pour câble coaxial
CAN	Convertisseur Analogique Numérique
CEM	Compatibilité ElectroMagnétique
CMB	Cosmic Microwave Background ou Rayonnement diffus micro-onde
FDC	Fond Diffus Cosmologique
GSM	Global System for Mobile Communications
IMEP-LAHC	Institut de Microlélectronique Electromagnétisme et Photonique et le Laboratoire d'Hyperfréquences et de Caractérisation
LNB	Low Noise Block (bloc bas bruit)
LPSC	Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie
MPS	Méthodes et Pratiques Scientifiques : enseignement d'exploration de la classe de seconde générale et technique
OEM	Onde Electro-Magnétique
RF	Radio-Fréquence

Remerciements

Nous tenons à remercier de nombreuses personnes pour leur soutien et leur aide tout au long de notre projet ; contributions précieuses sans lesquelles tout ce travail n'aurait pas pu se concrétiser.

L'équipe du Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble, LPSC, a joué un rôle essentiel. Un grand merci à :

- Monsieur Arnaud Lucotte, directeur du LPSC, qui nous a accueillis, a mis à notre disposition des locaux pour travailler et a assumé la responsabilité de notre sécurité.
- Madame Myriam Migliore, ingénieure d'études, qui a été à l'initiative de ce travail, qui a rédigé les dossiers de demande de financement auprès du Labex Enigmass et réalisé les achats de matériel, qui a coordonné le travail de l'équipe du LPSC, qui a assuré des enseignements théoriques et expérimentaux puis nous a soutenus pendant une année.
- Monsieur Marc Marton, assistant ingénieur, qui a construit le radiomètre et a apporté une aide pour la manipulation de l'azote liquide.
- Monsieur Jean Claude Malacour, assistant ingénieur, chaudronnier, qui a réalisé les coupes et soudures du contenant en aluminium pour la source à 77K.
- Monsieur Olivier Zimmermann, ingénieur d'études, et Monsieur Rémi Faure, assistant ingénieur, qui ont réalisé le développement du programme Labview de commande des moteurs et du logiciel d'acquisition des mesures.
- Monsieur Damien Tourres, ingénieur d'études, qui a conçu l'électronique de détection.
- Madame Cécile Renault, chercheuse astrophysicienne, qui a donné un cours sur le rayonnement fossile.
- Monsieur Patrick Stassi, ingénieur de recherche, qui a donné un cours sur les antennes.
- Madame Mariane Mangin-Brinet, chercheuse Physique Théorique, qui nous a apporté de l'aide sur le calcul des incertitudes et la méthode du Khi2.
- Mesdames Cécile Vannier et Anic Vey, assistantes de gestion, pour la gestion du budget Enigmass.

Nous remercions également :

- Monsieur Roberto Néri, chercheur et responsable du groupe Cosmologie de l'IRAM, qui nous a fait un exposé sur le Soleil et la couche atmosphérique terrestre.
- Monsieur Nicolas Corrao, responsable de la plate-forme Hyperfréquences Optomicroondes / CEM & Antennes à l'IMEP-LAHC, qui nous a permis de visiter une chambre anéchoïque sur le site de MINATEC.
- Monsieur Eric Bréelle, ingénieur techniques expérimentales au Laboratoire d'AstroPhysique et Cosmologie de Paris (APC) puis Monsieur Michel Piat, enseignant chercheur à l'APC et à l'université Paris Diderot pour les conseils et informations qui nous ont permis de finaliser ce projet.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à :

- Madame Sophie Pruvot, maman d'Axel, pour l'aide apportée à la réalisation de la couverture du mémoire.
- Monsieur Claude Richard pour les nombreuses heures passées avec son petit fils, Thibaud, pour la réalisation du chenillard de la maquette. Monsieur Patrice Petitclair, papa de Gaspard, pour tous les conseils donnés au niveau de l'électronique de la maquette.
- Les agents techniques du lycée Marie Reynoard pour les découpes de bois nécessaire à la réalisation de la maquette et l'aide lors des déplacements du matériel.
- Madame Nadège Buriller, professeure de Physique Chimie du Lycée Marie Reynoard, qui nous a soutenus, encadrés et aidés tout au long de la réalisation de ce projet.
- Madame Cécile Mandelbaum, professeure de Physique Chimie du Lycée Marie Reynoard, qui nous a encadrés lors de la présélection du concours à Lyon.
- Madame Evelyne Excoffon, inspectrice d'académie-inspectrice pédagogique régionale de Physique Chimie, référente du concours des Olympiades de Physique qui nous a soutenus pendant tout le projet.

Comment s'est formé notre groupe ?

Jacky et Morgane, deux élèves de première S qui ne se connaissaient pas, sont passionnés de Sciences en tout genre et particulièrement de Physique. Tous les deux voulaient pouvoir en faire encore plus. L'un apprit par son ancienne professeure de MPS, Cécile Mandelbaum, que l'une de ses collègues, Nadège Buriller, organise souvent des projets dans le cadre du concours des Olympiades de Physique. L'autre l'apprit par l'un de ses amis. Chacun partit de son côté demander à cette enseignante s'ils pouvaient monter un projet scientifique ensemble. Elle leur répondit : *«Revenez dans huit jours. Maintenant c'est un peu tôt, on est juste la première semaine de la rentrée, laissez-moi m'installer et réfléchir. Pendant ce temps, vous pouvez prendre contact avec un autre camarade qui m'a sollicitée pour la même idée, car si nous travaillons ensemble, cela sera sur le même projet»*. Le hasard faisant bien les choses, il s'avère qu'ils étaient tous les deux dans la même classe. Ils se rencontrèrent alors facilement. Pendant ce temps, Nadège Buriller, contacta Myriam Migliore, ingénieure d'études au LPSC pour lui soumettre cette demande. Myriam proposa, dans un premier temps, une mesure du diamètre apparent du Soleil à l'aide d'une antenne parabolique afin de se familiariser avec ce type de matériel, car une autre idée lui trottait dans la tête : *refaire l'expérience historique d'Arno Penzias et Robert Wilson avec laquelle, en 1965, ils détectèrent fortuitement le rayonnement fossile*.

Une aussi belle proposition ne pouvait pas rester sans suite.

Alors nous prîmes la décision de partir dans cette aventure.

Étant consciente du travail considérable que nécessiterait ce projet, Nadège Buriller souhaita agrandir le groupe, et proposa à trois élèves de sa classe de seconde de rejoindre l'équipe. Seuls deux acceptèrent, Gaspard et Thibaud.

Le temps s'écoula.

Trois semaines après la rentrée, le groupe était formé, le projet défini et le partenariat avec le laboratoire était acté. Restaient les démarches administratives à réaliser. Mais rien ne se passa comme prévu: en effet nous apprîmes que nous ne pouvions pas réaliser ce projet dans le cadre d'un volet d'approfondissement de l'aide personnalisée (AP). Le motif donné fut que Nadège Buriller aurait dû créer en juin un groupe d'approfondissement en classe de première S pour vingt élèves afin de présenter 4 ou 5 projets aux Olympiades de Physique : une pure utopie tellement ce travail est long et difficile pour l'enseignant encadrant. Cette décision administrative n'altéra pas notre motivation. Nous trouvâmes des créneaux de travail entre midi et deux, les mercredis après-midi, pendant les vacances au lycée les jours de permanence, et chez nous.

En janvier, Nadège Buriller se rendit compte qu'Axel, l'un de ses élèves de seconde, demandait souvent à ses camarades Gaspard et Thibaud l'évolution de leur projet. Alors, devant cet intérêt, elle lui proposa d'intégrer l'équipe.

Comme Arno Penzias et Robert Wilson, nous espérions détecter ce rayonnement fossile.

Ces deux radioastronomes obtinrent, pour cette découverte, le prix Nobel de Physique en 1978.

Comme eux, nous espérions que notre dur labeur serait récompensé...

I- Modèle cosmologique du Big Bang de $t = 0s$ à l'émission du rayonnement fossile

De nos jours, nous pouvons dater l'Univers à 13,7 milliards d'années. Il est alors logique de penser que s'il a un âge fini, il a eu un commencement. Il semblerait que notre Univers ait débuté au moment du **Big Bang** (mais il se peut qu'il n'ait jamais eu de début, ou qu'il y ait eu quelque chose antérieurement).

Le Big Bang est un modèle cosmologique qui décrit, grâce à la mathématique, tout ou une partie de l'histoire de l'Univers. C'est une gigantesque dilatation de l'espace à partir d'un « point » unique. Il ne s'agit pas d'une explosion comme le laisse supposer son nom. Cet événement appelé **singularité initiale définit l'instant $t=0s$** . C'est un état singulier où tout l'Univers était concentré dans un volume de petitesse quasi infinie, ayant une très forte densité d'énergie (toute l'énergie des futurs milliers de milliards de galaxies) et très chaud (10 billions de billions plus chaud que le centre du Soleil (15 millions °C)) dans lequel la matière n'existait pas. Seul, le temps et l'espace ont été créés à cet instant. L'Univers est composé de particules/antiparticules virtuelles qui apparaissent et disparaissent comme des bulles de savon.

Entre $t = 0s$ et $10^{-43}s$ après le Big Bang, c'est l'**ère de Planck**. Rien ne peut être expliqué. En effet, durant cet intervalle de temps incompressible appelé **temps de Planck**, la température et la densité d'énergie sont tellement grandes que les lois de la physique classique comme de la physique quantique trouvent leur limitation. Elles s'écrasent sur un mur nommé **mur de Planck**. A $t = 10^{-43}s$, l'Univers a une taille de $10^{-35}m$ soit 10 millions de milliards de milliards de fois plus petit qu'un atome d'hydrogène et a une température de $10^{32}K$.

À $10^{-35}s$, une expansion fulgurante appelée **inflation** a commencé. L'univers a grossi d'un facteur 10^{50} en $10^{-32}s$ (par comparaison, un noyau d'atome deviendrait aussi grand qu'une sphère centrée sur le Soleil englobant les étoiles les plus proches).

À $10^{-32}s$, l'Univers termine sa période d'inflation pour retrouver une période d'expansion. Il a la taille d'une orange et sa température chute à $10^{25}K$. Apparaissent alors les premières briques élémentaires de matière les **quarks** et **antiquarks**. A chaque rencontre, quark et antiquark s'annihilent en créant un photon.

À $10^{-12}s$, le diamètre de l'Univers fait 2 fois la distance Terre-Soleil. D'autres particules apparaissent : les électrons, les muons, les particules tau, les neutrinos correspondants et les antiparticules associées. Elles forment la famille des **leptons**.

À $10^{-6}s$, l'Univers englobe le système solaire, sa température est de $10^{12}K$ (un millier de fois plus chaud que le centre du Soleil). La température a baissé d'un facteur 10 millions de milliards, les quarks et antiquarks étant moins agités peuvent enfin s'associer pour former les protons et les neutrons. Ils constituent la famille des **hadrons**.

Au bout d'une seconde, le temps d'un clin d'œil, **la matière a dominé** pour une raison encore

inexpliquée. L'Univers est une soupe de protons, neutrons, électrons, neutrinos et photons. Cependant, les photons interagissant avec les particules, ne peuvent pas se propager: **l'Univers est opaque, depuis sa création, à la radiation.**

Trois minutes après la création de l'Univers, 98% de la matière actuelle (noyau hydrogène, noyau d'hélium, noyau de lithium, isotopes de l'hydrogène) se forme : on parle de **nucléosynthèse primordiale** (aucune autre théorie ne peut expliquer la formation des éléments **seconde preuve majeure de la crédibilité du scénario du Big Bang**). Les noyaux complexes seront formés dans les réactions thermonucléaires au cœur des futures étoiles à naître, soit un milliard d'années plus tard...

À cette époque, les **électrons** sont toujours libres car très énergétiques: ils ne se lient pas aux noyaux. L'Univers est un plasma composé de photons, de noyaux chargés positivement et d'électrons chargés négativement. Les photons sont continuellement diffusés par les électrons libres (c'est ce que les physiciens appellent **la diffusion Thomson**).

L'Univers est un immense brouillard opaque.

A $t = 380\,000$ ans, l'Univers a bien refroidi, sa température atteint **3000K**. L'énergie des photons n'est pas assez grande pour dissocier les électrons des noyaux. Les électrons libres se combinent alors aux noyaux légers **pour former des atomes**.

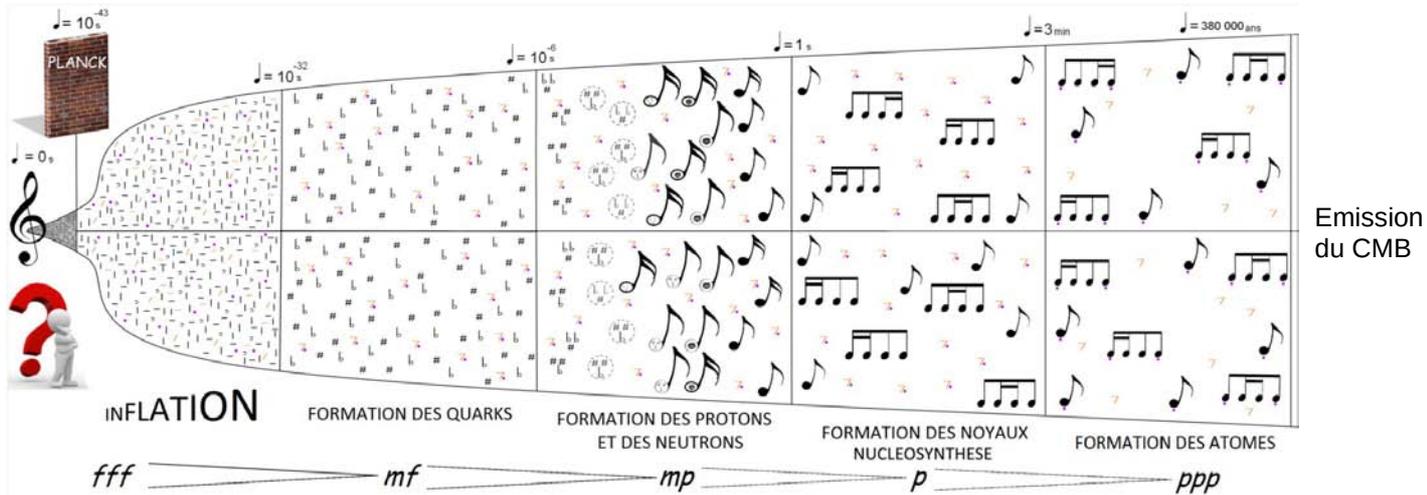
Les photons peuvent alors se propager. **L'Univers devient transparent au rayonnement**. Ce rayonnement est celui d'un corps noir à la même température que l'Univers ($T=3000K$, soit $\lambda=1\mu\text{m}$) .

Les derniers photons créés à cette époque se propagent librement et sont observés aujourd'hui sous la forme d'un rayonnement uniforme dans le domaine des micro-ondes $\lambda \approx 1\text{mm}$ à une température, $T = 2,73K$ provenant de toutes les régions du ciel. Ce rayonnement s'appelle **fond diffus cosmologique ou CMB**.

Ce changement de longueur d'onde des plus vieux photons du monde est dû à l'expansion de l'Univers. Il s'explique grâce à l'Effet Doppler-Fizeau : lorsque la source d'une onde lumineuse s'éloigne du récepteur, la longueur d'onde devient plus grande.

II- Réalisation d'une maquette pédagogique pour matérialiser le scénario du Big Bang de $t = 0s$ à l'émission du rayonnement fossile

1. Création d'une frise avec des notes de musique



Nous avons décidé de réaliser cette création avec des notes de musique car le groupe est composé de trois musiciens.

2. L'électronique de la maquette



Figure 1: Thibaud et Axel réalisent le câblage

Nous avons décidé d'apporter à la maquette différents effets lumineux et visuels dans le but de la rendre plus vivante et ludique. L'utilisateur peut ainsi, simplement en pressant des boutons, voir évoluer notre représentation du scénario du Big Bang avec les différents changements qui s'y opèrent.

Pour cela, nous avons au début défini ce que nous voulions de façon précise. Ainsi, nous en sommes arrivés à la conclusion finale que nous voulions 6 boutons, et que chaque bouton devait faire exécuter une tâche précise au reste de l'électronique.

Par exemple, nous avons écrit pour chaque interrupteur une phrase selon ce modèle:

“Lorsque le bouton 1 est pressé, alors le temps affiché doit être $t=0$, et la température infinie. Ainsi, le moteur du chronomètre doit déplacer l'aiguille de façon à ce qu'elle indique que le temps est $t=0$, les leds qui correspondent à ce temps doivent s'allumer et les leds qui indiquent la température infinie doivent s'éclairer.”

Ensuite, nous nous sommes chargés de traduire ces différents paramètres en langage informatique

selon les codes Arduino (qui est un type de code adapté à l'électronique utilisée). Le programme fait une centaine de lignes, et a été téléversé sur une carte Arduino Mega, qui est le cerveau de notre circuit électronique. C'est cette carte qui gère tout le circuit, et fait exécuter le code.

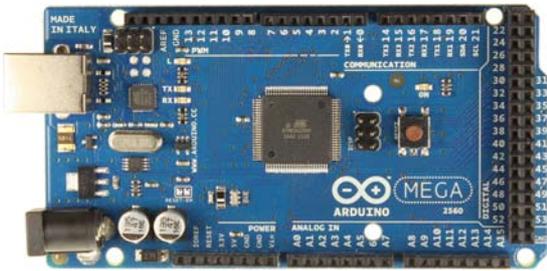
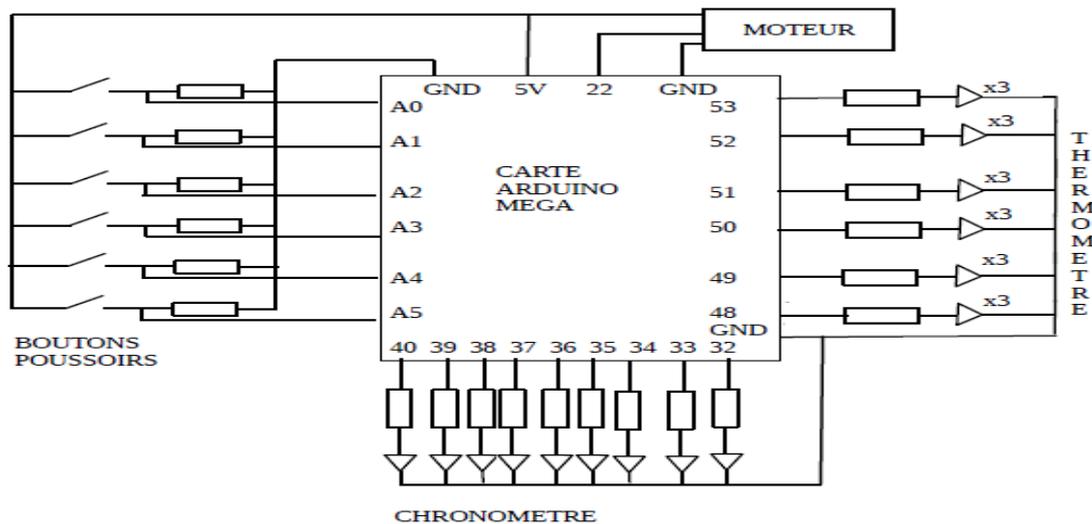


Figure 2: carte arduino mega

Cette carte est composée de différentes connectiques électroniques (les parties noires avec des trous en haut, à droite et en bas) de trois sortes :

- les connectiques appelées “power”: elles servent à fournir une tension, toujours la même, de façon continue. Les différentes tensions que l'on peut rencontrer sont 5V; 3,5V; GND. GND, dit “ground” correspond à 0V ou la borne négative d'une pile.
- les connectiques analogiques: ce sont des entrées (rôle semblable à celui des capteurs) analogiques. Elles vont permettre de lire une tension.
- les connectiques numériques: elles peuvent être utilisées comme entrées (capteurs) ou sorties (fournir du courant ou non). Elles n'ont que deux variations possibles, 0 ou 1. Autrement dit, soit elles fournissent un courant maximum, soit elles n'en fournissent pas.

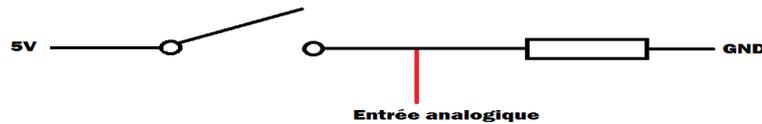
Nous avons ensuite connecté chaque composant de la maquette à cette carte selon le montage que nous avons défini, qui est le suivant :



Nous voyons que le circuit est composé de la carte électronique, de leds, d'interrupteurs, de résistances et d'un moteur.

Ainsi, nous avons installé ce montage électrique sur la maquette. Pour ce qui est de la partie visible, on peut voir les interrupteurs (sous forme de boutons poussoirs), les leds qui s'éclairent ou non en fonction du besoin, et le moteur fait tourner une aiguille qui est également visible.

Pour ce qui est du fonctionnement, les interrupteurs sont montés de la façon suivante :



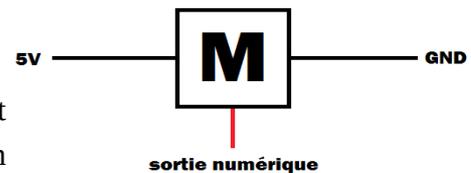
Ainsi, quand l'interrupteur est ouvert, le capteur lit 0V, et quand celui-ci est fermé, le capteur lit une tension supérieure à 0V. La carte traduit ces informations, les interprète et ainsi les leds s'éclairent en fonction de ce qui est défini par le programme, puis le moteur va s'orienter dans une position prédéfinie.

Les LEDs sont montées de la façon suivante :



Ainsi, quand la sortie fournit une tension, la LED s'éclaire.

Le moteur est connecté de cette façon :



Le moteur est appelé servomoteur. Ses caractéristiques sont qu'il a 3000 positions définies sur 180°. Il est alimenté en continu par une tension de 5V. La sortie numérique lui envoie lorsqu'il doit changer de position un code en binaire (composé de 0 et 1) qu'il va interpréter pour prendre une nouvelle position.

Ainsi, nous avons ajouté à notre maquette une partie électronique pour la rendre plus vivante, et nous avons pour cela utilisé une carte électronique, réalisé un montage électrique et mis au point un programme sur ordinateur.

3. Réalisation du chenillard de la maquette avec des DEL

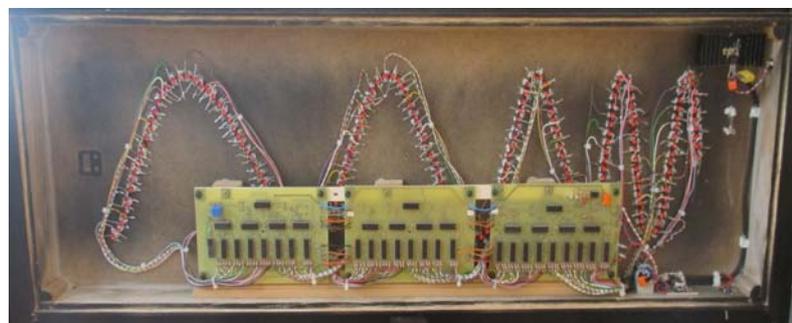


Figure 3: Thibaud et son grand-père réalisent le chenillard

Nous avons réalisé ce montage pour pouvoir montrer de façon claire le fait que la longueur d'onde du rayonnement fossile a augmenté avec le temps en raison de l'expansion de l'Univers. C'est pour cette raison que nous avons choisi de dessiner une sinusoïde de longueur d'onde de plus en plus importante.

a) La réalisation du schéma et son fonctionnement

La première étape de la réalisation d'un circuit électronique est la mise au point du schéma du circuit entier. Pour cela nous avons utilisé un logiciel appelé TCI. Ce dernier permet de créer des pistes et d'afficher les empreintes des composants avec le nombre de pattes qui correspond à chacun.

Le principe du fonctionnement du circuit est le suivant : le courant arrive tout d'abord vers un circuit intégré (4017) qui va distribuer le courant successivement aux leds. Cependant les 4017 n'envoient du courant que temporairement. C'est pour cela que l'on doit ajouter un autre circuit intégré (4043) entre les 4017 et chaque led afin de leur permettre de rester allumée. Ensuite lorsque 9 leds sont allumées, le premier 4017 envoie du courant à une « porte » (circuit intégré 4081) qui va elle-même alimenter le prochain 4017. Ainsi cela est répété jusqu'à ce que toutes les leds soient allumées.

b) La révélation

La révélation est un processus très important dans la réalisation d'un circuit électronique. En effet si elle est mal réalisée le courant ne pourra pas bien passer dans le circuit.

Il faut tout d'abord prendre une plaque de cuivre pré-sensibilisée. Cette plaque se compose d'une plaque d'époxy sur laquelle on trouve une couche de cuivre, au dessus du cuivre une couche de résine photosensible (sensible aux UV) et pour finir au dessus de cette résine un film protecteur qu'il faudra enlever avant la prochaine étape.

Cette étape s'appelle l'insolation. Elle consiste à placer le schéma, imprimé sur un film transparent (le typon) sur la plaque pré-sensibilisée. Ensuite il suffit de laisser le tout sous une lampe à ultraviolets quelques minutes. Lors de ce processus la résine au dehors des pistes imprimées est exposée aux UV. Une fois cette étape terminée, on enlève le typon de la plaque et on plonge cette dernière dans un bain de « révélateur » (perchlorure de fer). La résine exposée va ainsi se décomposer dans ce bain pour laisser apparaître le cuivre.

On plonge ensuite la plaque dans un bain d'acide chlorhydrique qui va dissoudre le cuivre qui n'est pas protégé par le vernis et laisser apparaître l'époxy. Ainsi il ne reste sur la plaque plus qu'une couche de cuivre et de résine de la forme des pistes du schéma et il ne reste plus qu'à passer un coup de chiffon imbibé d'acétone pour enlever la couche de résine.

Enfin, si on le souhaite, on peut étamer les pistes pour faciliter le passage du courant dans les pistes avec un fil d'étain et un fer à souder.

c) Le perçage et le soudage des composants

Il ne reste maintenant qu'à percer la plaque avec une perceuse aux endroits où les pattes des composants iront se loger et ensuite à souder les différents composants sur la plaque avec un fer à souder et un fil d'étain.

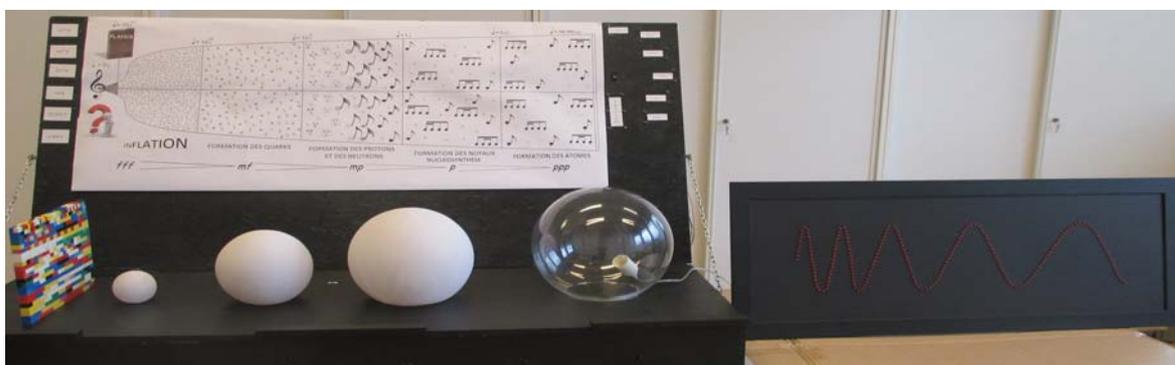


Figure 4: La maquette du scénario du Big Bang terminée.

III- Le rayonnement fossile

1. La découverte de Arno Penzias et Robert Wilson en 1965

En 1964, deux radioastronomes, **Arno Allan Penzias** et **Robert Woodrow Wilson** de l'entreprise de téléphonie Bell Telephone tentent de transformer une antenne qui servait à communiquer avec le satellite Echo et Telstar I, en un radiotélescope pour pouvoir mesurer la puissance d'émission de Cassiopée A (les restes d'une supernova) vers 4,0 GHz, et le halo d'émission de notre galaxie (la Voie Lactée) dans les 1,42 GHz.

Après avoir étalonné l'antenne, ils effectuèrent leurs premières mesures. Malgré leurs réglages, ils détectèrent un **bruit** supplémentaire d'origine **inconnue** provenant de **toutes les directions**. Ils supposèrent que le problème devait venir de leur antenne. En effet, ils découvrirent qu'un couple de pigeons nichait dans l'antenne. Penzias et Wilson nettoquèrent l'antenne de fond en comble pensant que le problème venait de là. Ils recommencèrent les mesures et le bruit était toujours présent. Ils ont été forcés de constater que le problème ne venait pas de leur antenne mais qu'ils captaient un signal radio provenant de l'Univers de longueur d'onde 7,35 cm (converti en température d'antenne: **3,5K**). Ce dernier ne variait pas au cours du temps et fluctuait de 10 % en fonction de l'orientation de l'antenne.

Un jour, Penzias rencontra le **radioastronome, Bernie Bucke**. Il lui parla de l'existence du bruit qu'il avait découvert avec Wilson. Le radioastronome lui apprit que **Ralf Alpher, George Gamow, et Robert Herman** prédisaient l'émission d'un rayonnement isotrope aux alentours de **5K** si la théorie du Big Bang était juste. Une équipe de chercheurs composée de **Robert Dicke, Peter Roll et David Wilkinson** étaient en train de construire une antenne pour le capter. Il se trouve que ce rayonnement correspondait à celui découvert fortuitement par Penzias et Wilson. Le **rayonnement fossile** venait d'être **découvert**. Penzias fit parvenir les résultats à Dicke. Ils les publièrent alors dans deux articles distincts. Penzias et Wilson décrivirent le rayonnement fossile et leur expérience, et Robert Dicke expliqua tout l'impact de cette découverte. Cette dernière, **preuve expérimentale supplémentaire qui accrédite le scénario du Big Bang, permit à Penzias et Wilson d'obtenir le prix nobel de Physique en 1978**.

2. Ses caractéristiques

À partir du découplage matière-rayonnement (380 000 ans après le Big Bang), l'Univers est constitué d'un bain de photons en équilibre thermique avec la matière. Ce rayonnement suit la loi de Planck d'un corps noir.

a) Qu'est ce qu'un corps noir ?

Un corps noir est un corps idéal qui absorbe intégralement tout rayonnement incident, quelle que soit sa longueur d'onde; il n'y a ni réflexion, ni diffusion, ni transmission.

Un corps noir réémet l'énergie qu'il a absorbée sous forme de rayonnements électromagnétiques. La quantité d'énergie réémise dépend de sa température. Ainsi, il existe une "loi de rayonnement du corps noir", appelée **loi de Planck**, qui donne la valeur de la distribution de la luminance énergétique spectrale du rayonnement thermique du corps noir en fonction de sa température.

b) Loi de Planck

La distribution spectrale d'énergie du corps noir est déterminée par la thermodynamique statistique, en considérant un gaz de photons dans une enceinte fermée à l'équilibre thermique T.

La luminance spectrale ou intensité spécifique ou brillance $B_\nu(T)$ d'un corps noir, qui correspond à l'intensité monochromatique du rayonnement en un point dans une direction, ne dépend que de la

température et est définie par la loi de Planck :

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

ν : fréquence des photons en Hz

h : constante de Planck = $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

k : constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

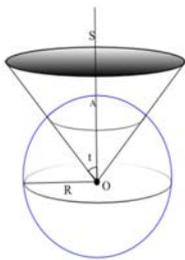
c : célérité de la lumière dans le vide $3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Cette loi donne la puissance rayonnée par un corps noir à la température T en fonction de la longueur d'onde λ du flux par unité d'angle solide (stéradian) entourant une direction donnée, par surface projetée et par unité de fréquence soit en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$.

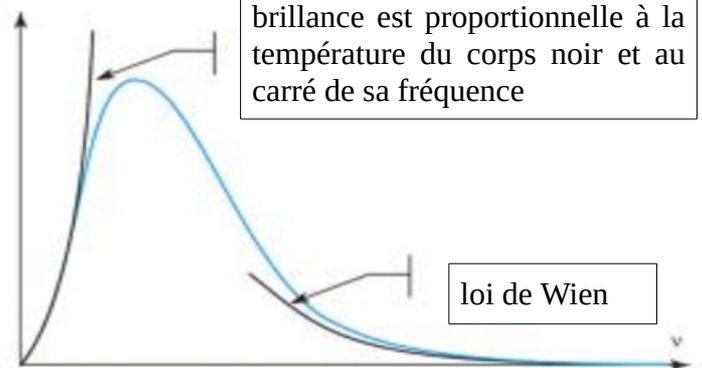
Le rayonnement d'une source ponctuelle se propage dans un cône ayant pour sommet elle-même.

L'angle solide Ω caractérise l'ouverture plus ou moins grande de ce cône.

$$\Omega = \frac{\text{aire de la surface interceptée}}{\text{rayon de la sphère}^2}$$



Brillance en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$



À basse fréquence (grande λ), la loi de Planck suit **la loi de Rayleigh-Jeans**, c'est à dire une dépendance linéaire de la brillance avec la température. Ce cas nous intéressera dans la suite de notre étude.

Si $h\nu \ll kT$ $e^{\frac{h\nu}{kT}} \approx 1 + \frac{h\nu}{kT}$ soit $B_\nu(T) \approx \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{kT}{h\nu} \approx \frac{2kT\nu^2}{c^2} \approx \frac{2kT}{\lambda^2}$

À haute fréquence en revanche, la loi de Planck suit la loi de Wien c'est-à-dire selon une exponentielle décroissante de la température.

Si $h\nu \gg kT$ $e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 = e^{\frac{h\nu}{kT}}$ soit $B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \approx \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot e^{-\frac{h\nu}{kT}}$

c) Le spectre électromagnétique du rayonnement fossile

Le rayonnement fossile est un rayonnement électromagnétique homogène et isotrope présent sur l'intégralité du ciel. Son spectre électromagnétique, figure 5, suit la loi de Planck d'un corps noir, c'est à dire que son intensité pour chaque longueur d'onde est uniquement déterminée par sa température.

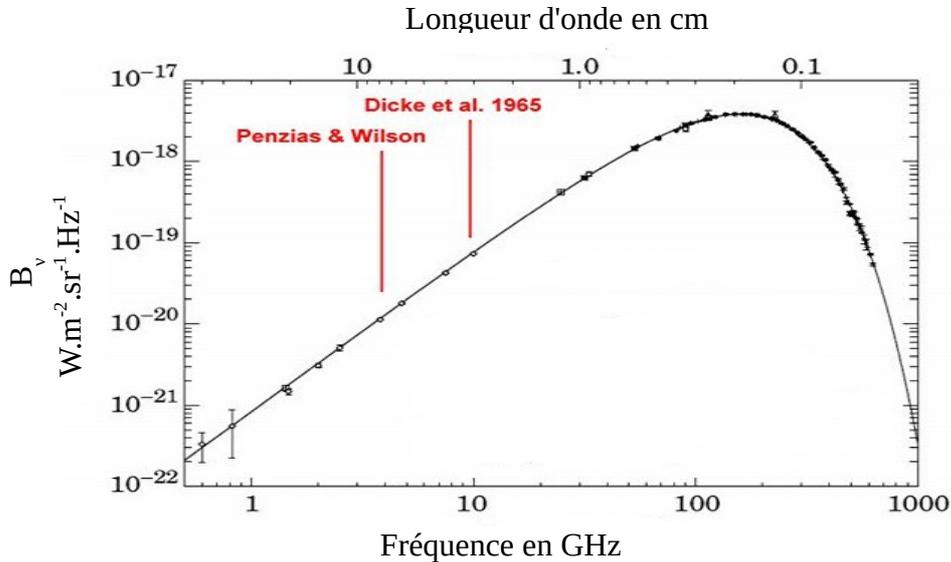


Figure 5: Spectre électromagnétique du rayonnement fossile

source: http://www.apc.univ-paris7.fr/APC_CS/content/le-fond-diffus-cosmologique-cmb

d) Modélisation du spectre électromagnétique du rayonnement fossile avec la loi de Rayleigh-Jeans

La bande de détection de l'antenne que nous utilisons est $[10,70 \text{ GHz} ; 12,75 \text{ GHz}]$. Calculons le domaine des longueurs d'onde du rayonnement reçu.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad \text{AN : } \lambda = \frac{3,00 \cdot 10^8}{10,70 \cdot 10^9} = 2,80 \text{ cm} \quad \lambda = \frac{3,00 \cdot 10^8}{12,75 \cdot 10^9} = 2,35 \text{ cm}$$

L'antenne peut recevoir des ondes électromagnétiques ayant une longueur d'onde comprise dans le domaine suivant $[2,35 \text{ cm} ; 2,80 \text{ cm}]$.

La température du rayonnement fossile est $T = 2,728 \text{ K}$. Calculons le rapport $\frac{hc}{kT}$.

$$\text{AN : } \frac{hc}{kT} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \times 3,00 \cdot 10^8}{1,38 \cdot 10^{-23} \times 2,728} = 0,528 \text{ cm}$$

Nous constatons que $\lambda \gg \frac{hc}{kT}$ soit $h\nu \ll kT$ alors la loi de Planck suit la loi de Rayleigh-Jeans. La puissance lumineuse émise par le rayonnement fossile sera modélisée par la relation $B_\nu(T) \approx \frac{2kT}{\lambda^2}$.

IV- Notre expérience dans les pas de Arno Penzias et Robert Wilson 50 ans plus tard : la chaîne expérimentale

1. Le dispositif de Penzias et Wilson

L'objectif de notre projet étant de refaire l'expérience de Penzias et Wilson, il nous a fallu comprendre, dans un premier temps, leur dispositif expérimental.

Penzias et Wilson travaillaient à l'époque sur l'adaptation d'une antenne de 3m d'ouverture conçue en 1961 pour recueillir les signaux des satellites « Echo et Telstar » lancés en 1959. Après modifications, ils souhaitaient capter d'éventuels signaux radios autour de 4 GHz provenant de la Voie Lactée et de Cassiopée A. Leur dispositif et ses caractéristiques sont synthétisés dans le tableau ci-dessous.

	<p>Synopsis : L'onde électromagnétique (OEM) incidente est collectée, transmise via un cornet et un guide d'onde jusqu'au MASER, un pré-amplificateur, ancêtre de ce qui deviendra le LNB. Le signal radiofréquence RF est ensuite mélangé via un coupleur à un oscillateur local (OL) pour abaisser la fréquence du signal.</p>
	<p>Antenne cornet offset ou « hors axe » à réflecteur parabolique</p>
<p>Ouverture antenne effective</p>	<p>3×3 m²</p>
<p>Fréquence/longueur d'onde d'observation</p>	<p>4.08 GHz, 7.35 cm</p>
<p>Gain</p>	<p>43 dBi</p>
<p>Angle d'ouverture</p>	<p>1.5° à 2.39 GHz</p>
<p>Système pointage</p>	<p>Motorisé en azimut et élévation</p>

L'angle d'ouverture de l'antenne est de 1.5°, ce qui nécessite une précision de pointage de l'ordre du degré. Les 2 radioastronomes appliquèrent la méthode de switch ou modulation de Dicke qui permet par modulation entre le signal provenant du ciel et le signal issu d'une source de référence (ici, de l'hélium liquide, 4.2K) de s'affranchir de la dérive en température du système instrumental.

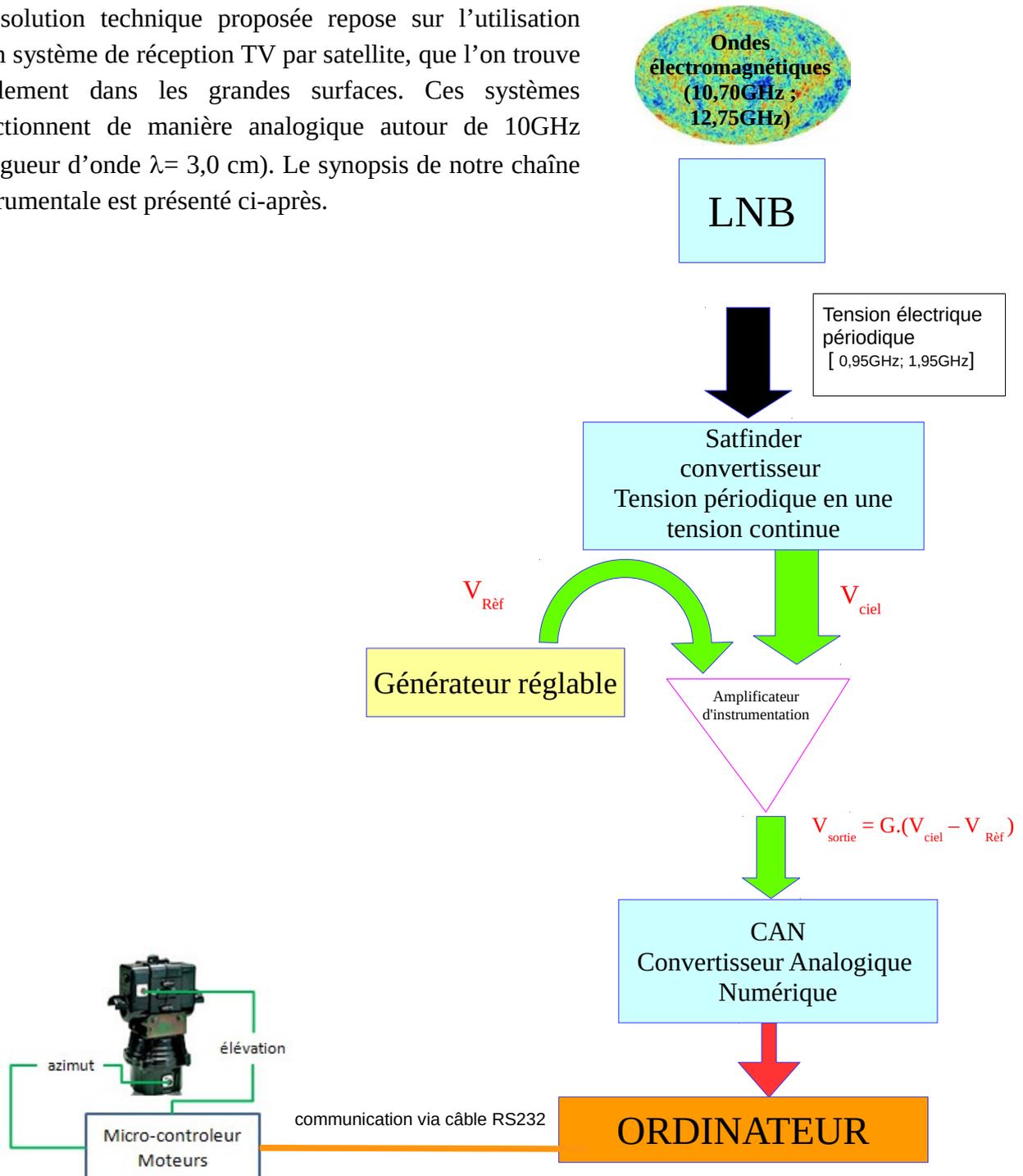
Ce dispositif leur permet d'obtenir des mesures radio du ciel pour différentes élévations et azimuts.

2. La chaîne instrumentale réalisée au laboratoire

a) Descriptif

Le rayonnement du FDC étant dominant dans une gamme de longueur d'onde allant d'environ 500µm à 22cm, la chaîne de détection doit être à large bande. Les radiomètres permettent de mesurer l'intensité du flux du rayonnement électromagnétique incident et le convertir en un signal électrique exploitable. Cette solution instrumentale présente des avantages incontestables en termes de simplicité, de transportabilité et de coût.

La solution technique proposée repose sur l'utilisation d'un système de réception TV par satellite, que l'on trouve facilement dans les grandes surfaces. Ces systèmes fonctionnent de manière analogique autour de 10GHz (longueur d'onde $\lambda = 3,0$ cm). Le synopsis de notre chaîne instrumentale est présenté ci-après.



En général, pour les observations astrophysiques, la chaîne instrumentale comprend :

- Une **parabole ou réflecteur** hors-axe dont la taille varie de 40cm à 120cm. et qui possède un nombre d'ouverture constant, environ 0.7. Elle est généralement réalisée par emboutissage d'une tôle d'acier ou d'aluminium. Celle que nous avons utilisée est une parabole de graphite noyé dans de la résine, ce qui lui confère une très bonne résistance et une grande légèreté. La qualité de la surface du réflecteur est mate et rugueuse, ce qui permet de diffuser et, par conséquent, minimiser la réflexion des ondes visible et IR sur la tête de réception (tête LNB).



Géométrie réflecteur	Paraboloïde à contour ellipsoïdal
Dimensions : largeur, hauteur, profondeur = W, H, d	W=61,0cm ; H=68,2cm ; d=65.3mm
Angle d'offset : $\theta = \arccos(W/H)$	26,6°
Angle d'ouverture à 10 GHz, $\theta = \lambda/D$	2.64°
Focale $F = \frac{w^3}{16 \times d \times H}$	31,5 cm
Rapport F/D	0.520
Rendement d'antenne k	61.4 %

Tableau 1: caractéristiques de notre réflecteur

- Un **cornet corrugué et les antennes** pour collecter, concentrer, adapter progressivement l'onde électromagnétique, la coupler aux antennes et la convertir en un signal électrique périodique.



Figure 6 : cornet corrugué ou graduel et les 2 antennes

- Le système d'amplification et de conversion à basse fréquence appelé **LNB** (Low Noise Block converter) - figure 6 - est un détecteur hétérodyne dédié à la bande Ku (réception des signaux entre 10.70-12.75 GHz). Les 2 antennes reçoivent 2 polarisations (perpendiculaires l'une de l'autre) des OEM incidentes. Le choix de la polarisation dépend de la tension d'alimentation (13V ou 18V). Le signal est par la suite amplifié, filtré puis mélangé à un oscillateur local (OL) dont la fréquence est de 9.75 GHz. Le 2nd OL (10.6 GHz) n'est pas utilisé pour notre expérience. L'oscillateur local à 9,75 GHz agit sur le domaine de fréquence (10,70 - 11,70 GHz), la fréquence du signal en sortie du mélangeur (MIX) est alors entre 10,70 - 9,75 = 0,95 GHz et 11,70 - 9,75 = 1,95 GHz. Il peut ainsi être transporté sans pertes (typiquement -2 dB/10m) par câble coaxial sur plusieurs mètres.

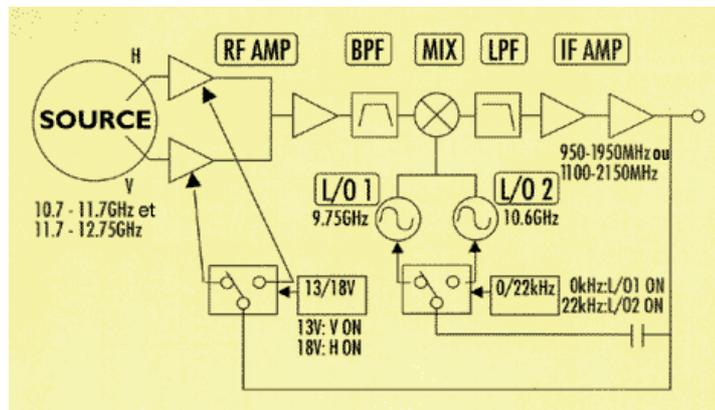


Figure 7: schéma de principe du LNB



Figure 8: tête LNB et son électronique associée (gauche) ; caractéristiques affichées par le constructeur du LNB

La figure de bruit (NF, Noise Figure) du LNB est de 0,2 dB. Ce qui signifie que ~95% du signal initial est conservé par le LNB. Les meilleures sont à NF=0,1 dB. En général, on en trouve avec NF =0,6dB et 0,8dB

- Le système de détection s'appuie sur un **Satfinder** (type Schwaizer FLS 517) qui se connecte directement au LNB et permet à l'utilisateur de vérifier le pointage de sa parabole TV vers un satellite. Il permet de convertir le signal périodique RF reçu en un signal continu par filtrage de la composante alternative et amplification de la composante continue.



Figure 9 : (gauche): LNB + convertisseur RF/DC reliés par câble RF ; (centre) : satfinder avec câble blanc RF pour alimentation 13V ou 18V ; (droite) : zoom sur câble noir LEMO qui transporte la tension analogique V_{ciel} (le signal qui nous intéresse !)



- Le **système de pointage** est un système de type Yaesu G-5500. Il est capable d'orienter l'antenne en azimut (course de 450°) et élévation (course de 180°) avec une précision de pointage de 1°. Les moteurs mis en place par le fabricant sont des moteurs continus, donc sans précision de pointage. Une des premières modifications a été de remplacer ces moteurs par des moteurs pas à pas, connus pour leur précision et leur répétabilité. La précision a été ainsi améliorée d'un facteur 1000. Un microcontrôleur ou boîtier d'interface, développé par le LPSC, permet de connecter un PC et de contrôler le pointage via une interface LabVIEW. Cette liaison est assurée par un connecteur RS232. La monture a été réalisée avec des tubes de $\Phi=40\text{mm}$ et des noix de serrage. L'alignement vertical et l'horizontalité du châssis ont été contrôlés au niveau à bulle.

- Le système d'acquisition utilise un CAN (Convertisseur Analogique Numérique), l'USB-6009 de National Instrument, qui numérise le signal analogique sur 13 bits, sur une plage de $\pm 10\text{V}$; la précision est donc de $\frac{20}{2^{13}} = 2,44\text{mV}$. Une petite électronique développée par le LPSC permet de commuter depuis le PC l'alimentation du LNB entre 13V et 18V, et donc alimenter l'une ou l'autre des polarisations.

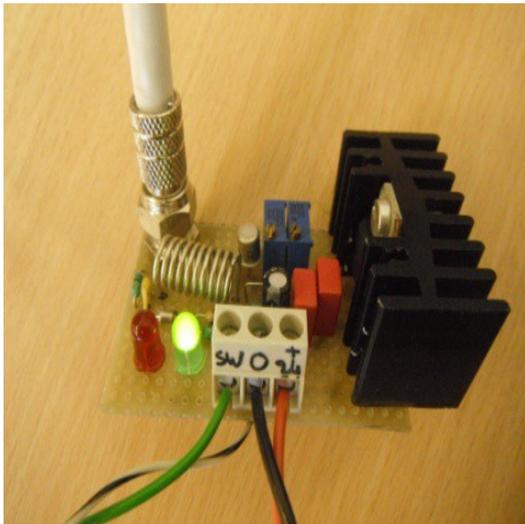


Figure 10 : switch pour l'alimentation en 13V ou 18V des antennes du LNB. L'électronique est alimentée en 24V.



Figure 11: CAN NI USB permettant de numériser le signal analogique provenant du ciel, de commander le switch depuis le PC.

Les données ainsi numérisées sont sauvegardées sous forme de fichier de type texte. Leur exploitation est facilement réalisable sous un tableur.

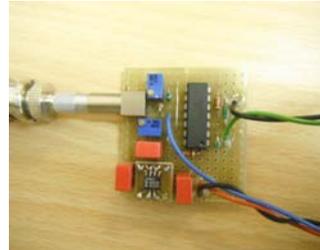
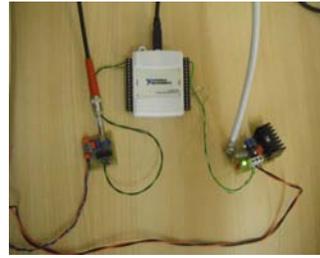


Figure 12 : (gauche) : expérience P&W sur le toit du LPS C; (haut-droite) : ensemble de l'électronique pour l'acquisition de V_{ciel} ; (bas-droite) : le connecteur BNC/LEMO de V_{ciel} avec la source de référence (la petite puce noire) V_{ref} entrant chacun dans l'ampli d'instrumentation pour la mesure différentielle. Les câbles vert et noir vont ensuite aux entrées analogiques du CAN. Les câbles rouge-bleu-vert sont les câbles d'alimentation en $\pm 15V$.

b) Améliorations du dispositif

Les premières mesures du CMB obtenues étaient noyées dans un signal à 300K. L'origine de ce signal parasite provenait probablement du rayonnement issu du sol qui, par un effet de diffraction des ondes sur le périmètre du réflecteur, pollueait notre signal du ciel. L'antenne est en effet constituée de plusieurs lobes de détection (ou d'émission) dont le lobe principal qui détermine la directivité de l'antenne, et les lobes latéraux et arrière. Bien que la sensibilité du lobe parasite arrière soit modeste, la puissance du signal du sol (généralement autour de 300K) est bien supérieure à celle du CMB à 3K. En outre, le LNB présente une ouverture plus large que le réflecteur (spillover ou surillumination du réflecteur par le LNB), ce qui l'expose aux OEM directes du sol. Pour pallier ces difficultés, nous avons placé une seconde parabole de $\phi=1m$ derrière la première avec, pour conséquence, le basculement du lobe parasite vers le ciel et un écrantage des OEM provenant directement du sol (pas de réflexion par le réflecteur).



Une autre amélioration majeure a consisté à isoler thermiquement le LNB par la réalisation d'une boîte en polystyrène extrudé et, à réaliser une série de blindage électromagnétique. L'électronique du Satfinder, par exemple, a été placée dans une boîte en aluminium pour constituer une cage de Faraday, et éviter ainsi les interférences par des ondes Radio environnantes (Wifi, GSM). Les câbles RF ainsi que le câble BNC qui transportent le signal V_{ciel} sont des câbles coaxiaux avec, pour certains un triple blindage.

V- Réalisation des mesures expérimentales

1. Étalonnage de l'antenne

Nous comptons avec tout ce matériel, détecter le fond diffus cosmologique. Nous rappelons que ce dernier vient de toutes les directions. De ce fait, nous pouvons le mesurer quasiment de partout. Nous allons voir comment procéder.

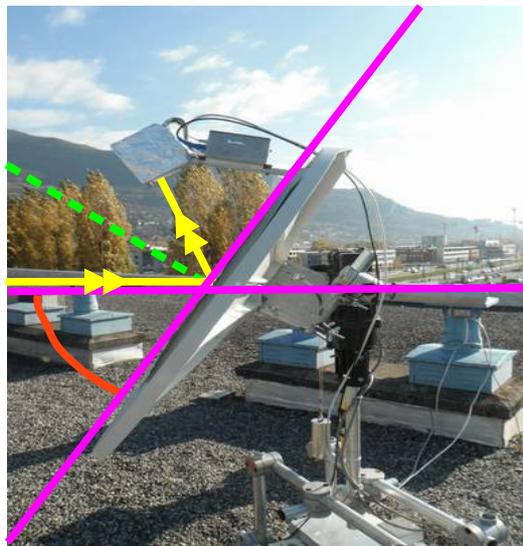
a) Mise en station

La mise en station de l'instrument se fait dans un premier temps en ajustant l'horizontalité du châssis et la verticalité du mât de l'antenne supporté par la monture à l'aide d'un simple niveau à bulle précis à $0,09^\circ$. Le système étant hors axe (offset), il faut déterminer l'angle de pointage de l'antenne (ou angle d'offset). Cette donnée est obtenue par géométrie analytique de la parabole. L'antenne pointe à l'horizon lorsqu'elle est inclinée en avant d'un angle d'environ 27° (aux erreurs d'incertitude près).

Élévation $\Theta=0^\circ$ plus angle d'offset $\sim 27^\circ$

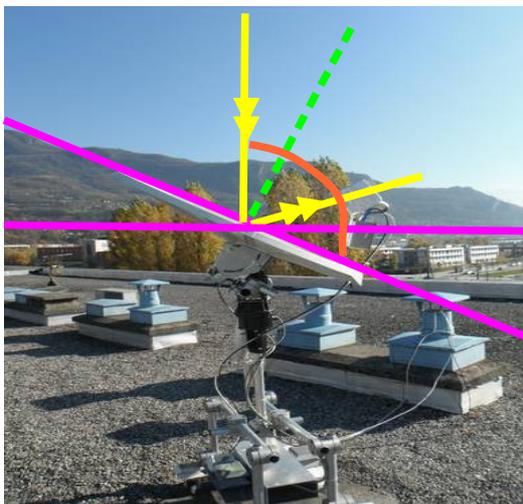
Normale au réflecteur

Rayon provenant de l'horizon.
Épaisseur de l'atmosphère maximale



Élévation: $\Theta = 90^\circ$ plus angle d'offset $\sim 27^\circ$

Rayon provenant du zénith.
Épaisseur de l'atmosphère minimale
d'où masse d'air relative égale à 1



b) Position de l'antenne en azimut et élévation

Lorsque nous mettons en marche l'alimentation des moteurs de l'antenne et que nous ouvrons le logiciel d'acquisition, les moteurs cherchent leurs butées mécaniques.

Le logiciel indique alors des valeurs d'élévation θ et d'azimut φ qui correspondent au repère utilisateur non au repère moteur.

Dans cette position "butée" des moteurs, avec une boussole, nous alignons grossièrement l'antenne en direction du Nord Magnétique. Le logiciel nous donne alors des positions de l'antenne ($\varphi = -29,33^\circ$ et $\theta = -95,83^\circ$) qui correspondent aux coordonnées de l'antenne dans le repère utilisateur. Or ces dernières ne correspondent pas à la position réelle de l'antenne dans le repère moteur.

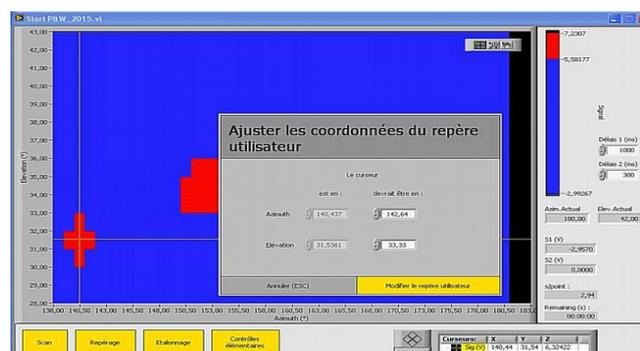


Figure 13 : Alignement avec le Nord magnétique

Nous ouvrons le fichier configuration afin de faire coïncider le repère moteur et le repère utilisateur, en entrant manuellement les valeurs azimut: $+29,33^\circ$ et élévation: $+95,83^\circ$. Ainsi l'élévation du réflecteur sera de 0° et l'azimut également de 0° . Cette opération définit l'offset entre le repère moteur et utilisateur.

Ce premier pointage étant très imprécis, nous effectuons un balayage du ciel pour repérer les satellites géostationnaires Astra ($154,55^\circ$ en azimut, $36,33^\circ$ en élévation), Eutelsat Hotbird 13 (163° en azimut et $30,74^\circ$ en élévation) et Eutelsat 28A ($142,64^\circ$ en azimut et $33,33^\circ$ en élévation).

En effet, ces derniers sont fixes par rapport à un référentiel terrestre comme l'antenne utilisée. Une fois cette cartographie faite, nous pointons le satellite Eutelsat 28A et nous ajustons ses coordonnées dans le logiciel d'acquisition, soit $\varphi = 142,64^\circ$ et $\theta = 33,33^\circ$. Puis nous contrôlons, l'exactitude des coordonnées des deux autres satellites.



Nous vérifions ensuite dans le logiciel de configuration, l'amélioration de la coïncidence des repères moteur et utilisateur car nous lisons $\varphi_{\text{offset}} = 26,6^\circ$ et $\theta_{\text{offset}} = 83,4^\circ$.

Ces réglages faits, l'antenne est correctement orientée dans l'espace.

c) Conversion de la puissance du signal reçu en température

Lorsque nous recevons une onde électromagnétique avec une antenne, cette dernière est convertie en une tension électrique.

Grâce à cette tension mesurée, nous allons devoir déterminer la température du rayonnement reçu afin de pouvoir l'identifier.

La puissance reçue par l'antenne (détectée par le LNB), provenant d'un corps noir à une température T , est donnée par la relation: $P_{détectée} = B_{\nu}(T) \cdot S_{détecteur} \cdot \Omega_{source} \cdot \Delta \nu$

$S_{détecteur}$: surface du détecteur en m^2

Ω_{source} : angle solide depuis la source (ciel, CMB) vers le détecteur en stéradian (sr)

$\Delta \nu$: bande de fréquence de détection du LNB en Hz

Sachant que la condition $h\nu \ll kT$ est vérifiée, la loi de Planck suit la loi de Rayleigh-Jeans

soit $B_{\nu} \approx \frac{2kT}{\lambda^2}$.

De plus, comme nous détectons le signal sur une seule antenne du LNB, une seule polarisation est détectée. Alors, la puissance du signal reçu est divisée par deux:

$$P_{détectée} = \frac{1}{2} \cdot B_{\nu}(T) \cdot S_{détecteur} \cdot \Omega_{source} \cdot \Delta \nu = \frac{1}{2} \cdot \frac{2kT}{\lambda^2} \cdot S_{détecteur} \cdot \Omega_{source} \cdot \Delta \nu$$

Sachant que la limite de diffraction est: $S_{détecteur} \cdot \Omega_{source} = \lambda^2$

Nous obtenons $P_{détectée} = kT \cdot \Delta \nu$

Cependant, si nous nous plaçons à 0K, la puissance détectée ne sera pas nulle. En effet, nous devons ajouter une température de bruit inhérente à l'expérience.

Alors la puissance totale détectée sera: $P_{totale} = P_{détectée} + P_{bruit} = k(T_{ciel} + T_{bruit}) \cdot \Delta \nu$

La tension mesurée est proportionnelle à la puissance totale reçue soit $V_{mesurée} = a \cdot P_{totale} = ak(T_{ciel} + T_{bruit}) \cdot \Delta \nu = R \cdot (T_{ciel} + T_{bruit})$ avec $R = a \cdot k \cdot \Delta \nu$

L'expression précédente contient deux constantes R et T_{bruit} que l'on doit déterminer avec deux corps noirs à deux températures différentes: par exemple un corps noir à température ambiante et un corps noir à 77K (azote liquide). Cette étape est la calibration de l'antenne.

d) La calibration de l'antenne

Nous sommes amenés à déterminer deux inconnues avec deux équations:

- l'une pour un corps noir à 300K (température ambiante qui sera lue avec un thermocouple type J) soit le couple de valeurs (T_{300}, V_{300})

- l'autre pour un corps noir à 77K (azote liquide) soit le couple de valeurs (T_{77}, V_{77})



Figure 14 : Mesure avec un corps noir à 300K



Figure 15 : (à gauche) Mesure avec un corps noir à 77K (azote liquide) (à droite) Corps noir à 77K



Nous avons le système suivant à résoudre:

$$V_{300} = R \cdot (T_{300} + T_{bruit}) \quad \text{et} \quad V_{77} = R \cdot (T_{77} + T_{bruit})$$

La résolution donne $R = \frac{V_{300} - V_{77}}{T_{300} - T_{77}}$ et $T_{bruit} = \frac{V_{300} \cdot T_{77} - V_{77} \cdot T_{300}}{V_{77} - V_{300}}$

Maintenant, nous pouvons calculer la température du rayonnement reçu avec la relation suivante :

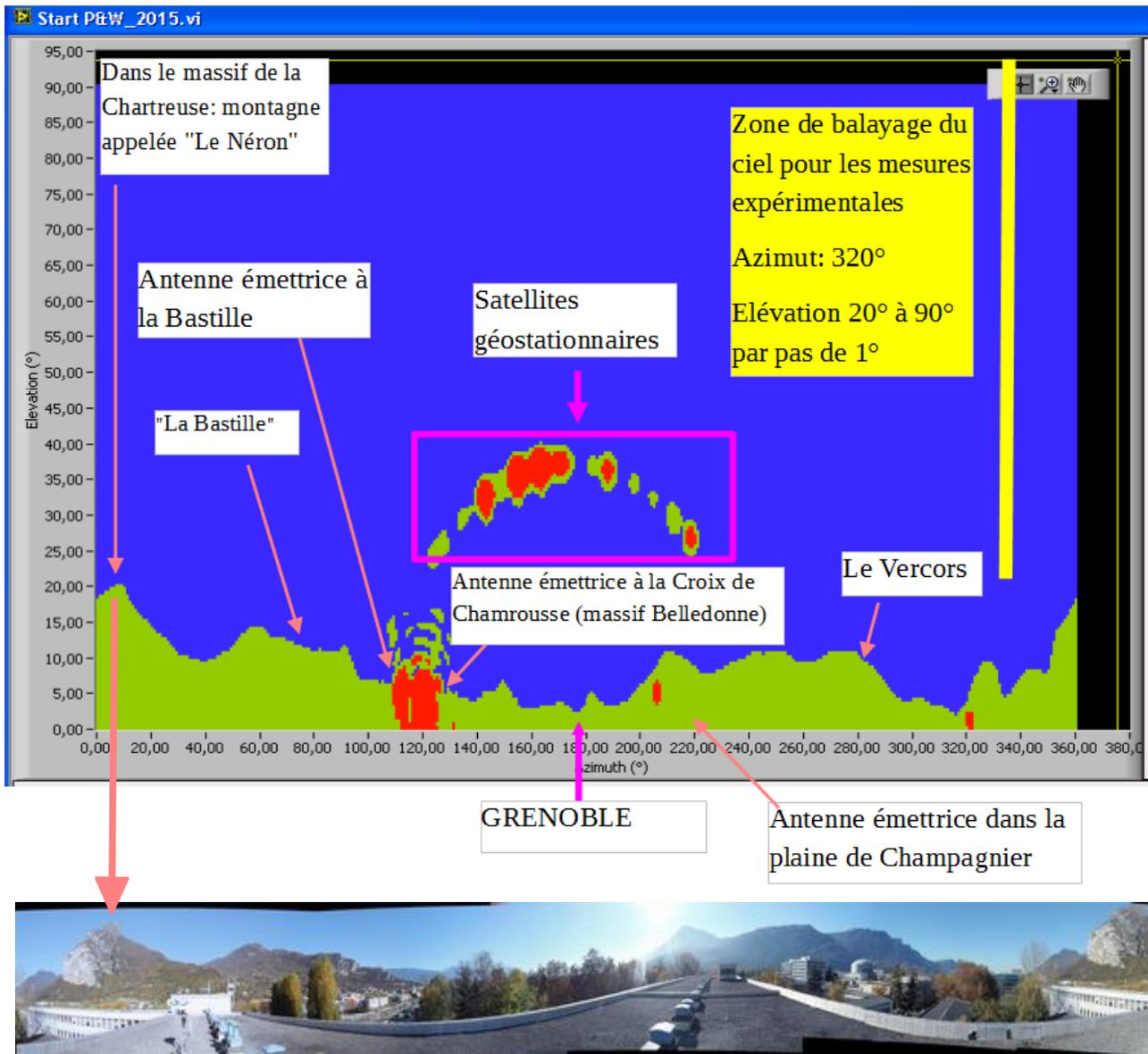
$$T_{ciel} = \frac{V_{ciel}}{R} - T_{bruit}$$

Pour réaliser un corps noir à 300K (température ambiante) ou 77K, nous avons utilisé un corps noir de type mousse Eccosorb, absorbant électromagnétique. La réflectivité de cette mousse est meilleure, -40dB au dessus de 10GHz, ce qui en fait un corps d'émissivité égale à 1 à 10^{-4} près.

2. La cartographie du ciel

Afin de réaliser une mesure du rayonnement provenant de l'Univers, nous avons cartographié le ciel pour localiser des différentes sources d'ondes radio aux alentours de 10 GHz qui pourraient gêner notre acquisition.

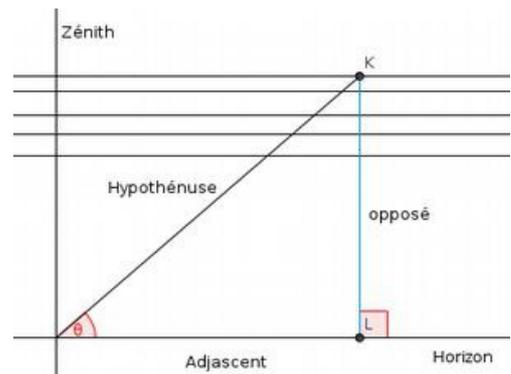
Cette carte nous a permis de voir que nous pouvions regarder le ciel en direction de l'Univers pour l'azimut $\varphi = 320^\circ$ et une élévation $20^\circ < \theta < 90^\circ$.



3. L'atmosphère terrestre

Quand nous mesurons la puissance rayonnée par le CMB, nous mesurons aussi la puissance rayonnée par l'atmosphère terrestre. Nous allons chercher à calculer l'épaisseur d'air en fonction de l'angle d'élévation.

Quand le détecteur est au zénith (élévation $\theta=90^\circ$), le rayonnement traverse le moins d'atmosphère : ceci définit une épaisseur d'air relative de 1.



Quand le détecteur se trouve à 30° au dessus de l'horizon, le rayonnement traverse deux fois plus d'atmosphère pour atteindre le détecteur au sol, et dans cette situation l'épaisseur d'air relative est alors de 2.

Ainsi, nous voyons que l'épaisseur d'air relative est une fonction de l'angle d'élévation. Plus précisément, nous avons la relation suivante : $Epaisseur\ d'\ air\ relative = \frac{1}{\sin(\theta)}$.

De plus, les constituants atmosphériques ($H_2O; O_2$) n'absorbent pas dans le domaines des ondes radiofréquences. Puis l'atmosphère émet uniquement dans l'infrarouge.

4. Exploitation des données

Nous avons fait des mesures pour différentes élévations par pas de 1° , de 20° à 90° , pour un azimut donné de 320° .

Dans cette direction, l'antenne tourne le dos à un fort signal électromagnétique qui provient d'une antenne émettrice dans la station de ski de Chamrousse et aucun satellite géostationnaire n'est présent.

La mesure expérimentale doit être la puissance rayonnée par un signal qui provient de l'Univers. Sachant que la puissance rayonnée est proportionnelle à la tension du signal reçu, nous mesurons alors une tension électrique notée V_{ciel} .

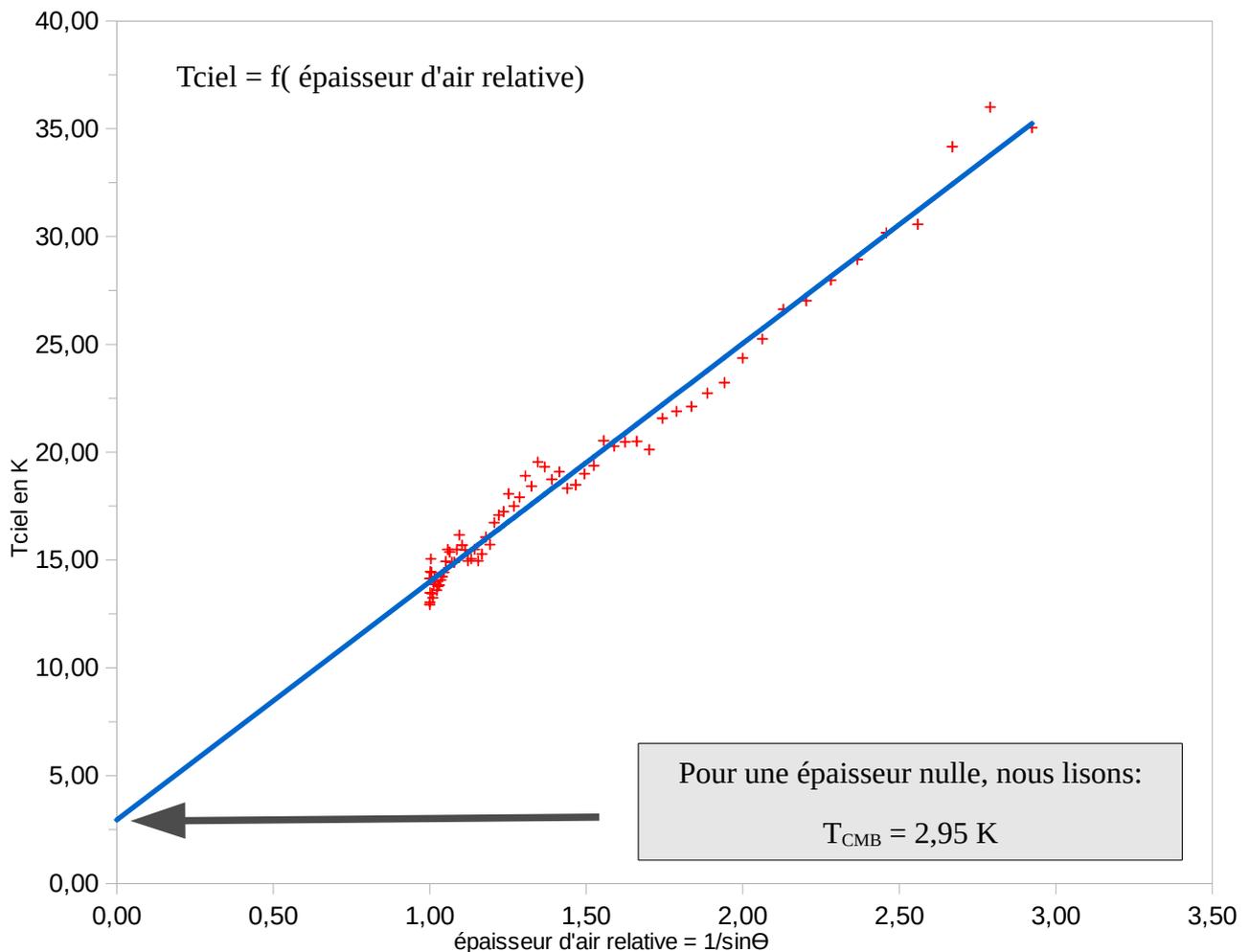
Cependant, l'électronique utilisée via les amplificateurs fournit $\log V_{ciel}$. Pour avoir accès à V_{ciel} , nous avons calculé $V_{ciel} = 10^{\text{valeur}/10}$. Enfin, nous avons calculé T_{ciel} avec la relation

$$T_{ciel} = \frac{V_{ciel}}{R} - T_{bruit} . \text{ Le détail des calculs se trouve en annexe page 1.}$$

Afin d'obtenir la température du rayonnement fossile, nous avons tracé le graphique qui représente la moyenne de la température du signal reçu noté T_{ciel} en fonction de l'épaisseur d'air relative.

En effet, la température du signal détecté correspondra à celle du rayonnement fossile lorsque le signal proviendra uniquement de l'Univers c'est-à-dire sans atmosphère.

Nous avons alors extrapolé la courbe $T_{ciel} = f\left(\frac{1}{\sin\theta}\right)$ et lu la valeur T_{ciel} pour une épaisseur d'air nulle.



5 - Calcul des incertitudes

Dans le tableau de mesures, en annexe page 1, chaque mesure expérimentale de $\log V_{ciel lue}$ donc de $V_{ciel réel}$ est la moyenne de 16 mesures indépendantes pour une élévation donnée.

Pour chaque élévation, la valeur de $V_{ciel moyen}$ est la moyenne sur 5 mesures de $V_{ciel réel}$.

a) Incertitude de répétabilité pour $V_{ciel moyen}$ notée $\sigma(V_{ciel moyen})$

L'incertitude type (écart type sur la moyenne) $\sigma(V_{ciel moyen})$ de l'estimation de $V_{ciel moyen}$ est

$$\sigma(V_{ciel moyen}) = \frac{\sigma_{n-1}(V_{ciel réel})}{\sqrt{n}} \text{ avec}$$

$\sigma_{n-1}(V_{ciel réel})$: écart type expérimental d'une mesure (écart type de répétabilité)

n = nombre de mesures de la valeur moyenne = 5

b) Pour une élévation donnée, incertitude type composée pour T_{ciel} notée $u(T_{ciel})$.

Afin que les calculs soient faisables par des lycéens, nous faisons l'hypothèse que les grandeurs x_i dans notre cas V_{ciel} , V_{300} , V_{77} , T_{300} , T_{77} , T_{bruit} et R sont indépendantes alors l'incertitude type composée de T_{ciel} est donnée par la relation:

$$u^2(T_{ciel}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial T_{ciel}}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \text{ soit}$$

$$u^2(T_{ciel}) = \left(\frac{\partial T_{ciel}}{\partial V_{ciel}} \right)^2 \cdot u^2(V_{ciel}) + \left(\frac{\partial T_{ciel}}{\partial R} \right)^2 \cdot u^2(R) + \left(\frac{\partial T_{ciel}}{\partial T_{bruit}} \right)^2 \cdot u^2(T_{bruit})$$

$$\text{d'où } u^2(T_{ciel}) = \frac{u^2(V_{ciel})}{R^2} + \frac{V_{ciel}^2}{R^4} \cdot u^2(R) + u^2(T_{bruit})$$

Le calcul des incertitudes-types composées de T_{ciel} , T_{bruit} et R notées $u(T_{ciel})$, $u(T_{bruit})$ et $u(R)$ sont développées en annexe page 2 et 3.

c) Ajustement du modèle mathématique de la droite $T_{ciel} = f(\text{épaisseur d'air relative})$ avec le khi2

Le calcul du χ^2 correspond à une statistique qui caractérise la dispersion des valeurs mesurées $T_{(ciel\ exp)i}$ par rapport aux valeurs données par le modèle $T_{(ciel\ théo)i}$.

Si les mesures sont en parfait accord avec les valeurs du modèle alors le χ^2 est nul.

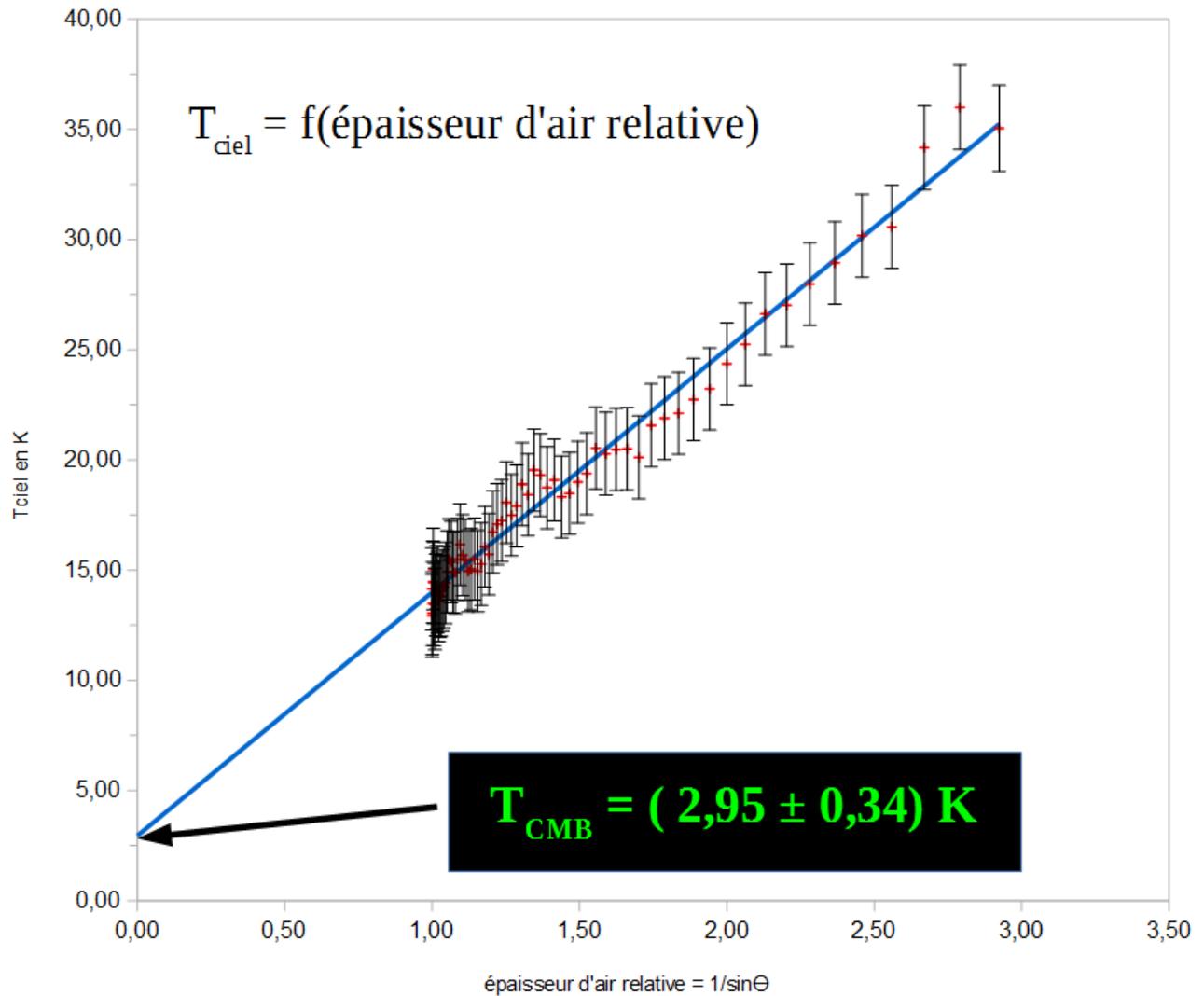
$$\text{Expression du } \chi^2 : \chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_{(ciel\ théo)i} - T_{(ciel\ exp)i}}{u(T_{(ciel)i})} \right)^2$$

$u(T_{ciel})$ aussi notée $\sigma(T_{ciel})$ est l'incertitude type pour T_{ciel} .

On utilise $\chi_{réduit}^2 = \frac{1}{n-p} \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_{(ciel\ théo)i} - T_{(ciel\ exp)i}}{u(T_{(ciel)i})} \right)^2$ avec n = nombre de mesures expérimentales et p nombre de paramètres à ajuster. Le modèle choisi sera en bonne adéquation lorsque $\chi_{réduit}^2$ sera proche de 1.

Nous avons admis que l'incertitude sur l'ordonnée à l'origine avec la méthode du khi2 est donnée par la relation suivante avec α niveau de confiance (dans notre cas 0,68):

$$\Delta b = \sqrt{-2 \cdot \frac{\ln(1-\alpha)}{\sum \frac{1}{u(T_{ciel})^2}}}$$



6 - Résultat expérimental final

Nous avons détecté un rayonnement provenant de l'Univers, appelé rayonnement fossile à la température indiquée ci dessous:

$$T_{\text{CMB}} = (2,95 \pm 0,34) \text{ K}$$

Avec un niveau de confiance de 68 %

Nous avons 68% de chance pour que la température du rayonnement détecté soit compris dans l'intervalle [2,61 K; 3,29 K].

VI - Conclusion

Ce travail laborieux d'une année a été riche d'enseignements, tant au niveau personnel qu'au niveau des connaissances scientifiques. Nous avons connu des moments difficiles où l'inquiétude était omniprésente car l'idée d'un abandon s'installait un peu plus tous les jours. Mais notre ténacité, notre envie de réussir, nous ont permis de vivre une émotion d'une grande intensité lorsque nous avons "vu" le rayonnement fossile.

Pour mener à terme ce projet, nous avons suivi la démarche scientifique suivante:

- compréhension du dispositif de Arno Penzias et Robert Wilson
- recherche de solutions techniques peu onéreuses, transportables et simples pour la mise en œuvre du radiomètre.
- réalisation de mesures, dans un premier temps non conformes au résultat attendu car le signal à 3K était noyé dans un signal à 300K. De nombreuses tentatives sont restées infructueuses mais fin août 2015, la lecture d'un article du magazine du Palais de la Découverte à Paris et des échanges avec Messieurs Eric Bréelle et Michel Piat, du Laboratoire d'AstroParticule et de Cosmologie de Paris, nous ont permis d'apporter des solutions.

Enfin, une rencontre au LPSC début octobre 2015 avec Michel Piat, nous a permis de sortir définitivement **du brouillard opaque dans lequel nous étions**, car le dépouillement des mesures du vendredi 16 octobre nous a permis de "voir" le rayonnement fossile. Nous avons profité de cette rencontre pour dire à Michel Piat que *la détection du rayonnement fossile, dans son jardin, n'est pas simple !*

L'expérience doit encore être améliorée afin de rendre plus compacte l'électronique. Puis ce radiomètre aura une seconde vie car des travaux pratiques seront élaborés pour les étudiants de Master 2 en Physique Subatomique et Astrophysique, en collaboration avec le laboratoire CPP (Centre de Physique des Particules) de Marseille.

Malgré le temps colossal pris sur notre temps libre pour réaliser ce projet, nous sommes très heureux d'avoir vécu une aussi belle expérience humaine :

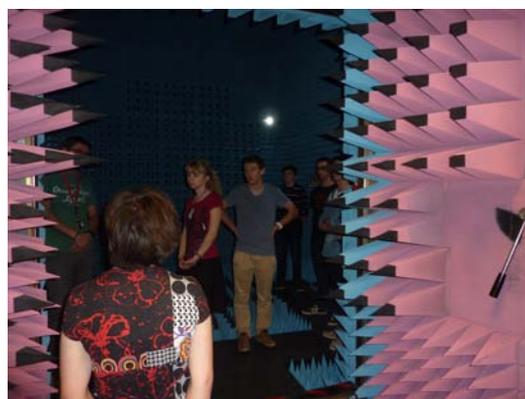
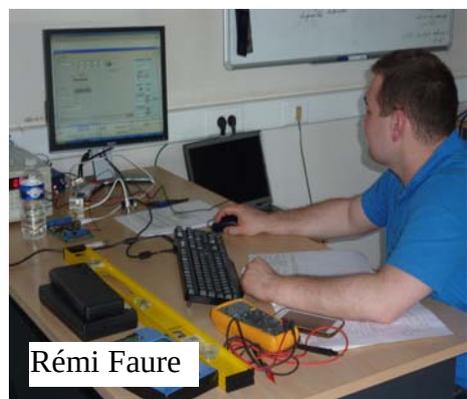
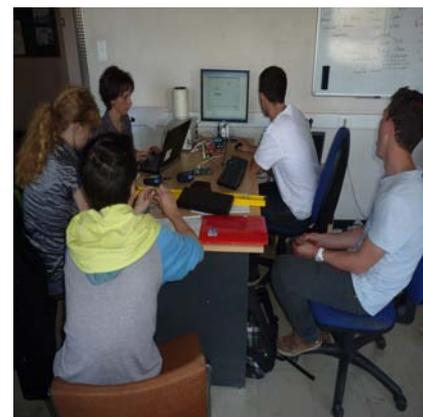
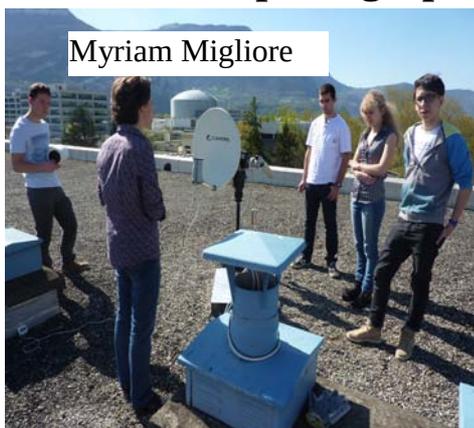
- nous avons rencontré des personnes passionnantes et passionnées qui n'ont jamais compté les heures passées avec nous (enseignements théoriques et expérimentaux, visite d'une salle anéchoïde, etc ...)

- nous avons appris à être plus rigoureux, plus organisés, à travailler nous même en équipe en prenant comme exemple le travail collaboratif de l'équipe du LPSC.

- Nous avons eu la chance d'avoir été initiés à un travail de recherche, *d'être entrés dans la peau de Messieurs Penzias et Wilson* puis d'échanger des courriels avec Monsieur Wilson.



Album de photographies de l'équipe du LPSC avec les Olympiens :



Visite de la salle anéchoïde sur le site de Minatec avec Nicolas Corrao.



Bibliographie

Périodique:

- Article du magazine du Palais de la Découverte à Paris: Découverte n°379 - Mars/Avril 2012.

Rapport:

- Rapport de stage de DUT, 2^{ième} année de l'IUT de Mesures Physiques, Université Paris Sud 11, centre d'Orsay - Détection du Fond Diffus Cosmologique avec un radiomètre à 10 GHz - Auteur: Florian Houel.

Livre:

- Petite histoire de l'UNIVERS *Du Big Bang à la fin du monde*, écrit par Stephen HAWKING, traduit par Carole Benton.

Conférence:

Etienne Klein à Grenoble, le 12 juin 2015: L'univers a-t-il connu l'instant zéro ?

Webographie:

http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/decouv/xchrono/origine/niv1_1.htm

<http://www.astronomes.com/le-big-bang/>

<https://www.polytechnique.edu/fr/theorie-physique-ultime-de-l-univers>

<http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dossiers/d/physique-boson-higgs-cle-fondamentale-univers-532/page/6/>

http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/decouv/xchrono/inflat/niv1_1.html

<http://molaire1.perso.sfr.fr/bigbang.html>

23^e ● OLYMPIADES DE PHYSIQUE ● FRANCE

Épreuves nationales **vendredi 29 et samedi 30 janvier 2016**
à l'Université Paris Diderot, Paris, équipes de 2 à 6 lycéens
Épreuves régionales **mercredi 9 décembre 2015**



Avec le soutien de



**Lycée Marie Reynoard de Villard-Bonnot (38)
2015 - 2016**