

LES CAHIER CLAIRAUT

N° 171 - Septembre 2020 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 171 - automne 2020

Thème de ce numéro, les rayons cosmiques

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (Écoles d'Été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

Présidents d'honneur :

Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel

Bureau du CLEA pour 2020

Président : Frédéric Pitout
Trésorière : Sylvie Thiault
Trésorière adjointe : Chantal Lecoutre
Secrétaire : Grégory Silva
Secrétaire adjoint : Vincent Bouneb

Responsables des groupes

Vie associative : Jean-Michel Vienney
Cahiers Clairaut : Christian Larcher
Productions Pédagogiques : Pierre Causeret
École d'Été d'Astronomie : Danièle Imbault
Responsables du site : Jean-Michel Vienney



Merci à celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

David Alberto, Peter von Ballmoos, Cyrille Baudouin, Pierre Causeret, Christine Daloubeix, Damien Dornic, Michel Dumont, Olivier Espagnet, Catherine Fauroux, Olivier Gayrard, Véronique Hauguel, François Hurter, Éric Jouguelet, Christian Larcher, Pierre Le Fur, Anne-Marie Louis, Alexandre Monon, Matthieu Renaud, Jean Ripert, Béatrice Sandré, Sylvie Thiault, Christine Tran, Jean-Michel Vienney.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 171 afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Représentation des particules générées par les rayons cosmiques de haute énergie qui frappent l'atmosphère terrestre au-dessus de l'observatoire Pierre Auger en Argentine. Cet observatoire est destiné à étudier les rayons cosmiques de très haute énergie dont on ne connaît pas l'origine. Il est constitué en particulier de 1 600 détecteurs Tcherenkov (des réservoirs remplis de 12 000 litres d'eau purifiée), ainsi que de 24 télescopes à fluorescence.

(Crédit image : A. Chantelauze/S. Staffi/L. Bret)

Les Cahiers Clairaut

Automne 2020

Editorial

La recherche sur la nature et l'origine des « rayons cosmiques » date de plus d'un siècle. Il fut laborieux d'établir s'il s'agissait de particules ou d'un rayonnement de haute énergie. La controverse opposa principalement Millikan, persuadé qu'il s'agissait de photons γ , et Arthur Compton et d'autres qui finalement démontrèrent qu'il s'agissait de particules chargées.

Bizarrement cependant la désignation de « rayons cosmiques » subsista. Il fut ensuite beaucoup plus difficile de déterminer la provenance de ces particules très énergétiques. Des recherches se poursuivent encore de nos jours. Dans ce numéro vous trouverez différents dispositifs destinés à l'étude de ces rayons cosmiques avec des élèves : le cosmodétecteur de « Sciences à l'École », la malette Cosmix du Centre d'étude nucléaire de Bordeaux Gradignan, le laboratoire virtuel e-PERON permettant de travailler à distance sur des valeurs réelles enregistrées au Pic du Midi.

Durant ces vacances d'été chacun a pu observer à l'œil nu le passage de la comète C/2020 F3, une occasion exceptionnelle d'exercer les élèves à estimer la longueur de sa queue de plasma. Une autre manipulation a pour objet de déterminer la distance de la Terre à des satellites passant près du zénith. Une dernière enfin permet de se familiariser avec l'étude des étoiles variables. Ce sont de bonnes occasions de rester connecté avec le temps des vacances.

Les philatélistes retrouveront la suite des articles sur l'astronomie dans les timbres. Enfin les amateurs d'instruments anciens découvriront le « quadrant des sinus » permettant de lire directement des valeurs approchées du cosinus et du sinus d'un angle mais aussi la déclinaison du Soleil à une date déterminée.

Christian Larcher pour l'équipe

Sommaire

Avec nos élèves	
Estimation de la longueur de la queue de plasma de C/2020 F3	
Olivier Gayrard	p 2
Avec nos élèves	
Du centre-ville à la banlieue extragalactique ou voyage avec « Aladin »	
Pierre Le Fur	p 4
Thème : Les rayons cosmiques	p 9
Mots croisés	
Pierre Causeret	p 9
Article de fond	
Histoire du rayonnement cosmique	
Matthieu Renaud	p 10
Article de fond	
La détection des rayons cosmiques	
Peter von Ballmoos	p 16
Avec nos élèves	
Étude du flux de muons selon la nature des matériaux d'un établissement scolaire	
Catherine Fauroux, Christine Tran	p 19
Avec nos élèves	
e-PÉRON : un laboratoire virtuel	
C. Baudouin, D. Dornic, O. Espagnet	p 25
Avec nos élèves	
Comment bénéficier du prêt d'un détecteur/compteur de muons ?	
Jean-Michel Vienney	p 31
Observation	
Le ciel de l'automne 2020	
Pierre Causeret	p 33
Instrument	
Quadrant des sinus et déclinaison du Soleil	
Auteur David Alberto	p 34
Avec nos élèves	
Les étoiles variables	
Michel Dumont	p 37
Curiosité	
L'astronomie dans les timbres (4)	
Anne-Marie Louis	p 40
Avec nos élèves	
Distance d'un satellite à la Terre	
Olivier Gayrard	p 45
Vie associative	
HS 13, RCE et Solutions des mots croisés	
	p 48

Estimation de la longueur de la queue de plasma de C/2020 F3

Olivier Gayrard

Comment utiliser avec des élèves un phénomène d'actualité pour répondre à une question précise tout en utilisant des notions de géométrie élémentaire.

Découverte au début du printemps 2020 par le télescope spatial NEOWISE (Near Earth Object, Widefield Infrared Survey Explorer), la comète C/2020 F3 est passée au plus près de la Terre le 23 juillet 2020.

Elle était facilement observable dans le ciel de l'hémisphère nord. Le cliché ci-dessous pris le 19 juillet 2020 à 23 h 20 (heure locale) montre la queue de plasma. Nous proposons ici une méthode pour estimer la longueur de cette queue.



Fig.1. La comète C/2020 F3 le 19 juillet 2020 à 23 h 20.
Objectif de 100 mm.

Soit la Terre T, le Soleil S et C la comète C/2020 F3. La figure 2 représente la Terre, le Soleil et la comète dans le plan TSC. La queue de plasma ionisée, rectiligne et bleutée est rejetée à grande vitesse (de l'ordre de 500 km/s). Elle est dans la direction opposée au Soleil car produite par le vent solaire¹.

Cette queue est donc dans le prolongement du segment SC. Notons ℓ sa longueur. On a $\ell = CQ$, c'est la longueur que nous recherchons.

α est la distance angulaire comète-Soleil vue depuis la Terre : $\alpha = \widehat{STC}$.

Posons : $\beta = \widehat{TSC}$.

1 https://fr.wikipedia.org/wiki/Com%C3%A8te#Les_queues

L'angle sous lequel est vue la queue ionique depuis la Terre est : $\gamma = \widehat{CTQ}$.

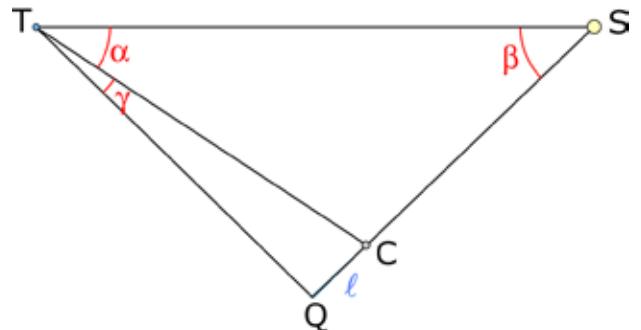


Fig.2. La Terre, le Soleil et la comète C/2020 F3.

Sur le cliché de la figure 1, la distance mesurée sur la photo correspond à l'angle γ de la figure 2.

Avec le logiciel Astrométrie.net, (figure 3) on mesure $\gamma = \widehat{CTQ} = 10^\circ$.

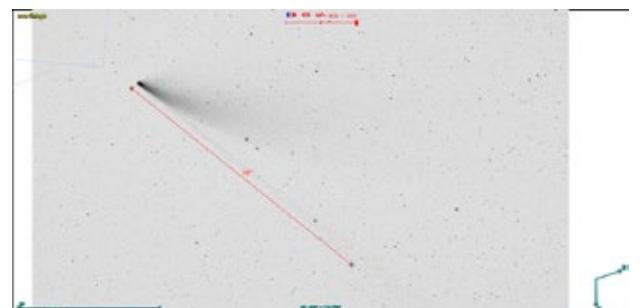


Fig.3. Cliché de la figure 1 en couleurs inversées après astrométrie réalisée avec Astrométrie.net² et téléchargée dans Aladin³ pour la mesure de l'angle γ , distance angulaire sous laquelle est estimée la longueur de la queue de plasma.

En utilisant le théorème des sinus il vient que :

$$\frac{SC}{\sin \alpha} = \frac{TC}{\sin \beta} \text{ d'où } \sin \beta = \frac{TC}{SC} \sin \alpha$$

2 <http://nova.astrometry.net/upload>

3 <https://aladin.u-strasbg.fr/>

À l'aide de Stellarium (figure 4) nous pouvons estimer la distance angulaire comète-Soleil vue depuis la Terre : $\alpha = 32^\circ$.



Fig.4. Mesure à partir du logiciel Stellarium de la distance angulaire Soleil-C2020/F3 vu depuis la Terre le 19-07-2020 : $\alpha = 32^\circ$.

Sur le site internet du JPL (figure 5), on récupère les distances SC et TC :

$$SC = 0,567 \text{ ua} \text{ et } TC = 0,706 \text{ ua.}$$

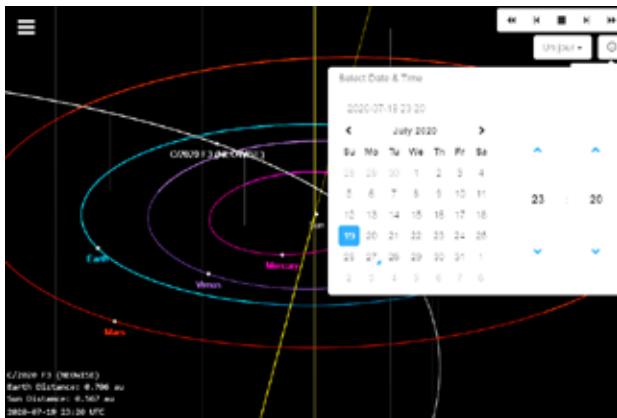


Fig.5. Simulateur mis à disposition par le JPL.
Les distances de la comète au Soleil et à la Terre sont respectivement de 0,567 ua et 0,706 ua.



L'application numérique de la formule

$$\sin \beta = \frac{TC}{SC} \sin \alpha \text{ donne : } \beta = 41^\circ$$

On en déduit : $\widehat{TCS} = 107^\circ$ ($180^\circ - \alpha - \beta$).

puis $\widehat{TCQ} = 73^\circ$ ($180^\circ - 107^\circ$ ou $\alpha + \beta$).

et $\widehat{TQC} = 97^\circ$ ($180^\circ - 10^\circ - 73^\circ$)

Dans le triangle TCQ , on connaît les 3 angles et TC, on peut à nouveau utiliser le théorème des sinus pour trouver CQ :

$$\frac{CQ}{\sin \gamma} = \frac{TC}{\sin TQC} \text{ d'où } CQ = \frac{0,706 \times \sin 10^\circ}{\sin 97^\circ}$$

Nous obtenons : $\ell \approx 0,124 \text{ ua}$ soit $\ell \approx 18.10^6 \text{ km}$.

Nous avons donc pu estimer la longueur de la queue de plasma d'une comète en ne faisant usage que d'outils mathématiques qui sont aux programmes des classes d'enseignement scientifique de première : somme des angles dans un triangle, relation de trigonométrie et théorème des sinus, ce qui est satisfaisant.

(4) <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=C%2F2020%20F3;old=0;orb=1;cov=0;log=0;cad=0#orb>

AVEC NOS ÉLÈVES

Du centre-ville à la banlieue extragalactique ou voyage avec « Aladin »

Pierre Le Fur, Toulon

Que peut-on faire quand le « bruit » de la pollution lumineuse du centre-ville atteint presque le signal lumineux d'une galaxie ? La solution viendra en voyageant avec « Aladin ».

Les soirées de printemps voient le ciel se dépeupler d'étoiles très lumineuses : finies les brillantes constellations de la Voie lactée comme Orion ou le Taureau. Les discrets astérismes « Chiens de chasse » ou « Chevelure de Bérénice » trônent alors vers le méridien lorsque 23 h sonnent sous le ciel de mai. Notre regard plonge ainsi vers la direction du pôle nord galactique qui est perpendiculaire au plan moyen de notre Voie lactée. Notre champ de vision traverse donc des zones pauvres en étoiles comme en poussières, laissant une fenêtre ouverte sur l'espace intergalactique proche et les richesses de cette banlieue de notre Galaxie. Le pôle nord galactique est situé dans la Chevelure de Bérénice (de coordonnées équatoriales célestes : ascension droite $\alpha = 12\text{ h }49\text{ min}$ et déclinaison $\delta = 27,4^\circ$).

Pour l'observateur citadin cette période ne permet pas d'observations visuelles intéressantes pour les nébuleuses du ciel profond : les faibles étoiles et autres galaxies sont quasi indétectables. Le « bruit » de la pollution lumineuse du centre-ville atteint des niveaux presqu'aussi élevés que le « signal » de lumière d'une galaxie. L'œil rivé au télescope permet à peine de distinguer le noyau des plus lumineuses.

Faut-il pour autant abandonner l'idée d'explorer cette banlieue extragalactique ?

Observations photographiques et logiciel « IRIS »

Bien que ces douces nuits toulonnaises de mai soient gâchées entre autres par un réverbère flamboyant neuf éclairant plus le jardin – site d'observation – que la rue, j'ai décidé malgré tout d'essayer de fixer les photons extragalactiques sur le capteur CCD de mon appareil photo numérique (APN) Nikon D330. Je place ce dernier au foyer d'un télescope Schmidt Cassegrain Meade (SCM) de 300 mm de diamètre placé sur une monture équatoriale mobile Célestron CGX.

Je choisis de réaliser des séries de plusieurs dizaines de poses courtes, entre 15 et 30 secondes chacune, avec un triple objectif : ne pas saturer le capteur par la pollution lumineuse intense, ne pas subir les défauts d'alignement polaire de la monture (réalisé à 20' près) et ne pas avoir à effectuer un autoguidage, ne disposant pas du matériel adéquat. Au final, un traitement par empilement des images devrait permettre d'augmenter le rapport signal/bruit de l'image résultante et faire ressortir ainsi la galaxie visée. Pour cela je dispose du logiciel « IRIS » [1].

Le logiciel « diGiCam Control » [2] pilotant l'APN renvoie chaque image brute (mode RAW) sur l'ordinateur et à leur affichage sur l'écran, je doute du résultat final. Chaque vue est catastrophique car le fond jaune orangé du ciel de ville cache presque entièrement la galaxie qu'on distingue à peine sous la forme d'une pâle tache bleutée (figure 1). Cela reflète parfaitement l'impression initiale de l'observation visuelle préalable.



Fig.1. Image brute de M51 au SCM 300 mm pour une pose de 30 secondes à 1600 ISO. Réducteur de focale $F/D \approx 5$. Ici, les contrastes initiaux ont été augmentés deux fois afin de distinguer la galaxie. Le champ du télescope et le vignettage sont bien visibles. La pollution lumineuse pour trente secondes de pose est déjà intense. En visuel, seuls les deux noyaux de galaxies sont visibles. Le champ fait environ 30' de diamètre (~pleine Lune). La granulation est importante car 1600 ISO est un choix d'amplification APN un peu trop fort.

Le lendemain, je m'attèle au traitement numérique de la série d'images obtenues, en apprenant à effectuer la procédure classique décrite dans de nombreux ouvrages [3], [4] : création de dark, offset, flat puis prétraitement, registration et enfin empilement des images pour obtenir l'image finale. Il faudra la corriger par choix de balance de couleurs, rehaussement dynamique, ajustement de contraste.

La puissance de ce type de calculs se révèle alors. À ma grande surprise, elle permet d'éliminer quasi-totalement cette pollution lumineuse et révèle la galaxie visée malgré le temps de pose réduit (figure 2). Le logiciel gratuit IRIS, de Christian BUIL, tient toutes ses promesses, il est accompagné d'un tutoriel très complet.

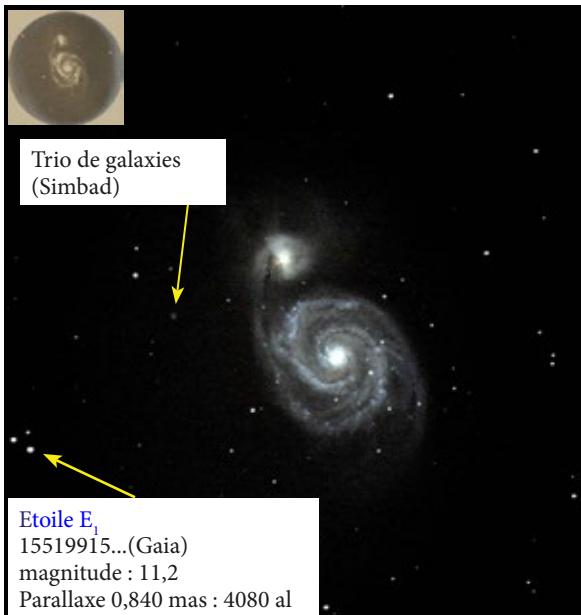


Fig.2. Image composée de M51 au SCM 300 mm $F/D=5$, pour 40 poses de 30 secondes (20 min) à 1600 ISO. Traitée par IRIS avec rehaussement dynamique et ajustement de contraste. Magnitude limite environ 18,2.

Les régions HII (hydrogène ionisé par les étoiles géantes bleues) sont repérables comme des taches lumineuses bleutées dans les bras spiraux. Les poussières absorbantes des bras sont très visibles.

La galaxie mineure NGC 5195 aurait interagi gravitationnellement depuis plusieurs millions d'années. Diamètre 100 000 années-lumière.

En arrière-plan lointain 3 galaxies sont signalées par Aladin, catalogue Simbad.

En médaillon, photographie de I. Roberts en 1889, il y a plus de 130 ans !

Distance 24,3 Mal, longitude galactique $l = 104,9^\circ$, latitude galactique $b = 68,6^\circ$.

Interprétation des résultats et logiciel « ALADIN »

On pourrait se contenter de regarder cette photographie de la galaxie du tourbillon M51 en

pensant à Lord Rosse et son télescope, le Léviathan de Parsonstown, de 1,80 m de diamètre avec lequel il parvint dès 1845 à distinguer les bras spiraux de cet « univers île » lointain. Comparer ce « cliché » avec celui déjà réalisé par I. Roberts en 1889 (avec un télescope de 50 cm à miroir d'argent installé près de Liverpool et une pose de 4 h) montre que le résultat obtenu n'a rien de nouveau. Mais la possibilité d'explorer la banlieue extragalactique à partir du centre-ville malgré le ciel diffusant la lumière d'une agglomération moyenne est ainsi clairement illustrée.

Il reste à quantifier la « performance » de cette réalisation, c'est-à-dire quelle magnitude limite peut-on atteindre dans ces conditions de prises de vue (temps de pose, pollution...) ?

Pour cela nous allons utiliser le site de l'université de Strasbourg [5] et la version téléchargeable du logiciel « ALADIN », [6], véritable fenêtre quantitative sur l'Univers, riche des données astronomiques professionnelles les plus récentes.

Une bonne liaison internet est nécessaire pour son utilisation afin de télécharger les catalogues de données

« Aladin » et les magnitudes

Dans le bandeau supérieur apparaît « command » sur la page d'entrée du logiciel. On y inscrit M51 (voir étape 1- figure 3). Une image apparaît provenant du « Digital Sky Survey », collaboration internationale. Pour comparaison, on affiche en parallèle l'image réalisée avec « Photos » de Windows ® par exemple.

On sélectionne une étoile la plus faible possible de l'image télescopique et on la repère sur la page DSS d'Aladin (voir étape 4- figure 3). On relève la magnitude sur l'écran « Aladin ». En réalité, 3 types de magnitudes sont mesurées par le satellite Gaia.

On ne retient que les seules correspondant à la bande passante de l'APN, peu sensible, dans le rouge dans le cas usuel où le filtre de série n'est pas enlevé.

On prend donc les magnitudes photométriques dans le vert et le bleu (15^e et 18^e colonnes ; ne pas confondre avec les flux photométriques). On peut calculer la moyenne, indicateur de la magnitude atteinte avec la « photo » (Voir étape 5- figure 3)

Magnitude photographique estimée :

$$\approx [\text{phot_g_m} + \text{phot_b_m}] / 2.$$

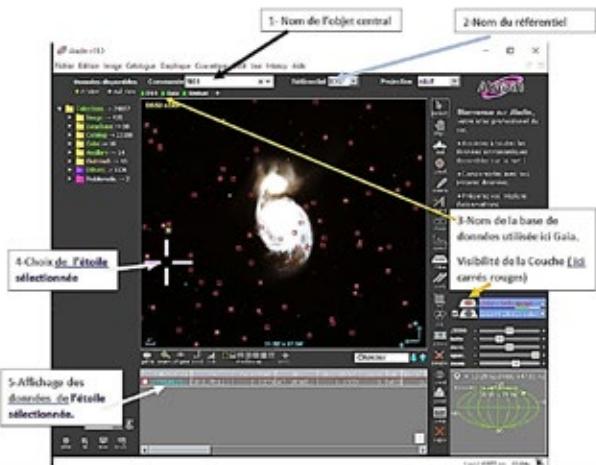


Fig.3. Sélection d'une étoile du champ photographié autour de M51 avec « Aladin ».

1. Dans commande on indique le nom de l'objet central, ici M51. L'image s'affiche par défaut issue du catalogue Digital Sloan Survey (DSS).
2. On choisit le référentiel, par exemple J2000 donne les coordonnées célestes équatoriales de M51 ; « galactique » donne l et b .
3. On choisit un catalogue d'étoiles du champ : ici celui du satellite européen Gaia 2^e version d'avril 2018. S'affichent alors les carrés rouges sur chaque étoile du champ mesurée par Gaia.
4. On sélectionne une étoile du champ.
5. Une fenêtre s'ouvre alors indiquant les caractéristiques de l'étoile mesurées par Gaia, satellite astrométrique successeur d'Hipparcos : 1^e colonne le nom, 2^e et 4^e déclinaison, ascension droite ; 6^e colonne la parallaxe de l'étoile en milliseconde d'arc (indicateur de distance) ; 15^e colonne : la magnitude photométrique moyenne dans le vert (phot_green_mean_mag) ; 18^e colonne : la magnitude photométrique moyenne dans le bleu (phot_blue_mean_mag).
6. En double cliquant sur le nom on accède à la base de données « Simbad » et les valeurs complètes relatives à l'étoile s'affichent (pour la base Gaia release 2, avril 2018).

Pour l'image de la figure 2 obtenue par compositage de 40 poses de 30 s (équivalent à 20 minutes de pose continue), on obtient une magnitude limite d'environ 18,2. D'autres images montrent des étoiles très faibles qui correspondent à une limite à 18,5 pour 20 minutes de pose 1600 ISO et pour un fond de ciel lumineux, mais bien dégagé de toutes brumes ou nuages élevés, sous l'effet du mistral. La formule de Pogson reliant éclairement et magnitude permet de calculer le rapport des éclairements de la plus faible étoile visible ce soir-là à l'œil nu (mag = 4, éclat Ecl_1) et celle en limite de détection sur l'image (mag = 18, éclat Ecl_2) :

$$\Delta mag = -2,5 \log_{10} \frac{Ecl_2}{Ecl_1}$$

$$\frac{Ecl_2}{Ecl_1} = 10^{\frac{18-4}{2,5}} \approx \frac{1}{400\,000} !$$

« Aladin » et les distances

En utilisant « Aladin », on détermine également la parallaxe de cette étoile numérotée 15519915... sur le catalogue Gaia (étoile E₁ de la figure 2). La lecture de la 6^e colonne donne : $P = 0,840$ milli arc seconde (mas)... (voir étape 5- figure 3). Mais, il faut laisser le temps de la lecture de la base par le biais du réseau.

La distance au Système solaire (en années-lumière) est donnée par la formule :

$$D = \frac{3,26 \cdot 10^3}{P(\text{milli arc seconde})} \text{ a.l.}$$

Soit $D = 3\,880$ al pour cette étoile E₁.

Sélectionnons de nouveau M51 dans « commande », puis avec l'outil « zoom » d'Aladin (en bas à droite), agrandissons fortement de manière à ne plus voir que la croix centrée sur M51. On clique : il apparaît une étiquette de la bibliothèque « SIMBAD ».

En double cliquant sur M51 de cette étiquette, on est renvoyé sur le site de l'université de Strasbourg. Là, sur « Simbad » (voir A - figure 4) toutes les données techniques sur M51 sont disponibles.

Fig.4 A. Pages de données sur M51 par Simbad.

Collections of Measurements

distance : 7 velocities : 14 flux : 1
 display selected measurements display all measurements clear

Observing logs

Fig.4 B. Choix des mesures de distance.

Sur cette page on choisit « measurements » (voir B - figure 4), sur la nouvelle page qui surgit, on peut lire les résultats des mesures de distance. (voir C - figure 4). On remarque une incertitude importante.

La moyenne $D = 24,3$ Mal, pour M51.

Collections of Measurements

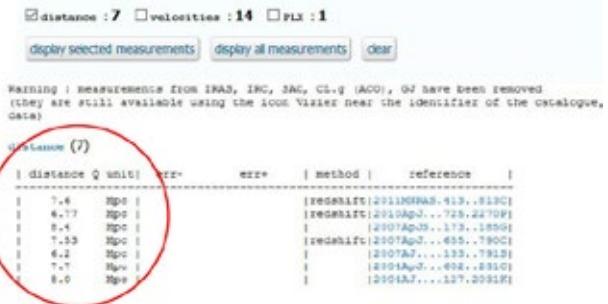


Fig.4 C. Résultats des mesures de distance en mégaparsec (1 Mpc = 3,26 millions d'années lumière) - suivant la méthode employée -.

Cela reflète un choix par défaut : favoriser une valeur plutôt qu'une autre relève de connaissances astrophysiques spécialisées sur les qualités comparées des différentes méthodes de mesures.

« Aladin » et les coordonnées galactiques

On peut repérer la direction de l'astre observé en choisissant « galactique » dans le nom du référentiel choisi (voir 2- figure 3). S'affichent alors la longitude galactique l et la latitude galactique b de l'objet. La base de ce repérage est le plan de notre Galaxie, la Voie lactée. Dans ce plan on mesure la longitude galactique l (voir figures 5 et 6) puis la latitude galactique b .

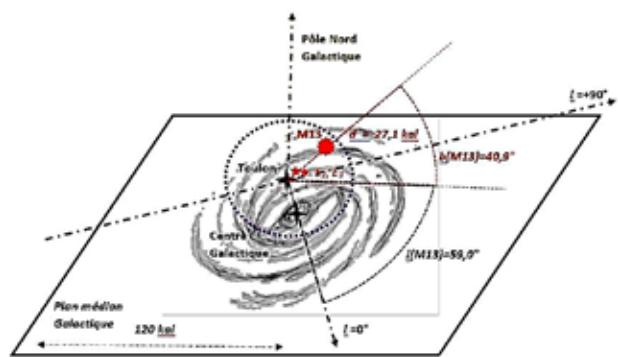


Fig.5. Positionnement de l'amas d'Hercule M13 et E_2 par rapport à la Voie lactée.

Pour rappel la distance Terre /centre galactique est de 27 kpc. Cette direction est la référence des longitudes galactiques l . Le cercle en pointillés violet représente le domaine exploré par le satellite astrométrique Gaia correspondant à une précision de mieux que 10 % sur les distances, pour des étoiles de luminosité suffisante.

Pour les galaxies, Gaia ne peut donc déterminer avec précision que les directions (au mieux 20 μ as).

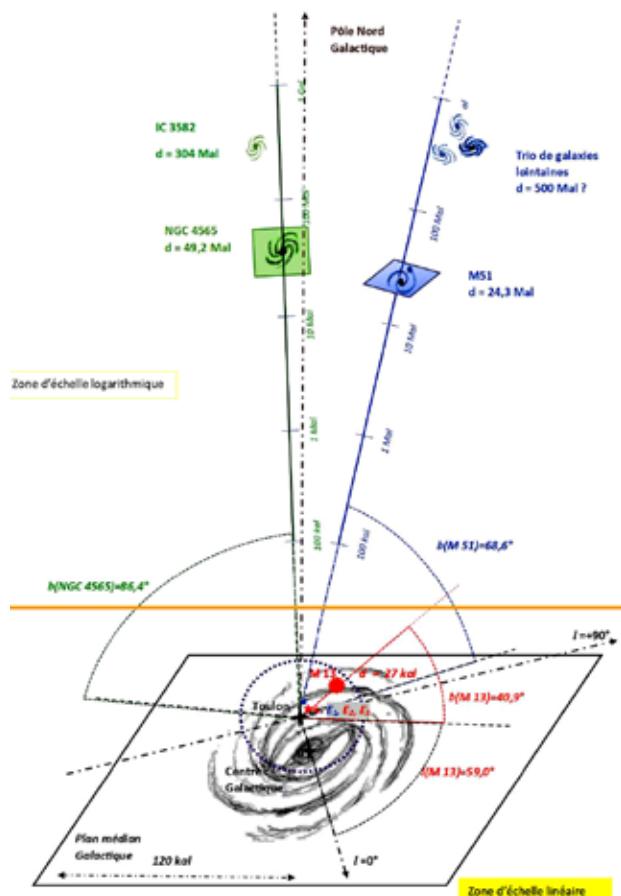


Fig.6. Vue récapitulative, en perspective.

La partie supérieure est en échelle logarithmique.

En réalité les diamètres des galaxies sont du même ordre de grandeur, y compris la Voie Lactée.

Pour M51, son plan galactique est perpendiculaire à la direction d'observation.

Pour NGC 4565, la plan de la galaxie contient l'axe de visée.

Reconstitution partielle en trois dimensions de la banlieue extragalactique

Rajoutons à nos observations deux objets célestes typiques : l'amas globulaire M13 situé dans Hercule (voir figure 7) et la galaxie de « l'aiguille » NGC 4565, visible au télescope dans la constellation de la Chevelure de Bérénice (voir figure 8). La dernière ligne de chaque figure indique le résultat des recherches sur « Aladin » des coordonnées et distances. Ainsi pour NGC 4565, la valeur de $b=86,4^\circ$ indique qu'elle est presque dans la direction du pôle nord galactique ($b=90^\circ$).

Si NGC 4565 est l'objet le plus lointain des trois avec 49,2 Mpc (millions d'années-lumière), « Aladin » et la couche du catalogue « Simbad » permettent d'identifier des objets extragalactiques quasi ponctuels qui sont en arrière-plan.

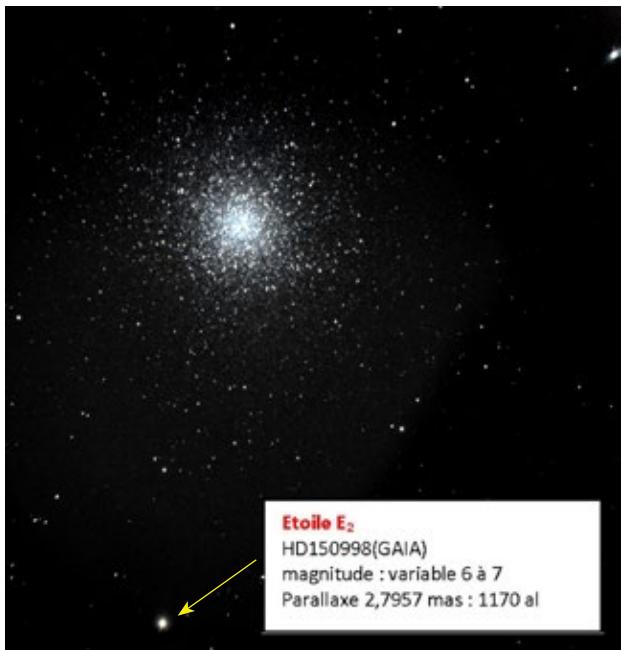


Fig.7. Image composée de M13 au SCM 300 mm F/D=5 pour 37 poses de 15 secondes (9 min 15 s) à 1 600 ISO. Magnitude limite environ 18.

Un des 160 amas globulaires autour de notre Galaxie.

Deux étoiles de magnitudes 6 à 7 encadrent M13 (notées E₂ et E₃).

Distance 27 kal, longitude galactique $l = 59,0^\circ$, latitude galactique $b = 40,9^\circ$

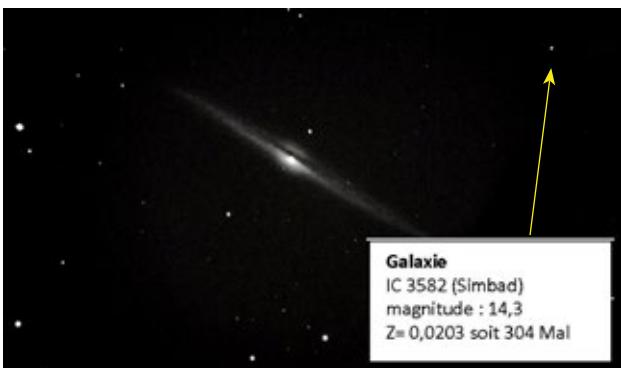


Fig.8. Image composée de NGC 4565 au SCM 300 mm F/D=5 pour 19 poses de 30 secondes (9 min 30 s) à 1 600 ISO. Magnitude limite environ 18,7.

Une galaxie vue par la tranche où une bande de poussières se découpe sur le fond des centaines de milliards d'étoiles (galaxie « aiguille »). De nombreux points lumineux sont des galaxies lointaines. Proche de cette région du ciel, on trouve l'amas de galaxies Coma à 320 Mpc.

Distance 49,2 Mpc, longitude galactique $l = 230,8^\circ$, latitude galactique $b = 86,4^\circ$.

Leur distance peut être estimée si un des catalogues donne la valeur du paramètre z du décalage vers le rouge (« redshift ») ou par une approche géométrique très approximative ; le rapport des tailles étant supposé de l'ordre de grandeur du rapport inverse des distances.

Dans le premier cas on rappelle la relation entre z et la distance, la constante de Hubble H étant supposée de l'ordre de 75 km/s/mégaparsec, pour un z petit on a :

$$z = H \frac{D}{c} \approx \frac{V_{radiale}}{c}$$

Soit : $D \approx 13,0 \times 10^3 z$ (en Mpc)

En bilan, on regroupe nos résultats sur les [figures 5](#) et [6](#) afin d'obtenir une image en 3D de la banlieue de la Voie lactée, notre Galaxie. Remarquons que M51 et NGC 4565 ont à peu près le même diamètre que notre univers-île.

Le très large intervalle des valeurs de distance nous oblige à utiliser une échelle de type logarithmique pour les distances supérieures à 100 kal.

Nous constatons la relative proximité de l'amas globulaire M13, car il est un satellite de notre galaxie. Un rapide calcul par la formule de Pogson et l'évolution de l'éclat en $1/D^2$ montre que les amas globulaires des autres galaxies sont inobservables dans les conditions de prise de vue, car leur magnitude dépasserait 20. Même pour un amas aussi important que M13.

En ces belles soirées de printemps, notre « regard » photographique s'est perdu jusqu'à près d'un demi-milliard d'années-lumière vers le pôle nord galactique, malgré des conditions d'observation très défavorables. C'est un beau voyage immobile, dans l'espace et dans le temps, pour un habitant du centre-ville.

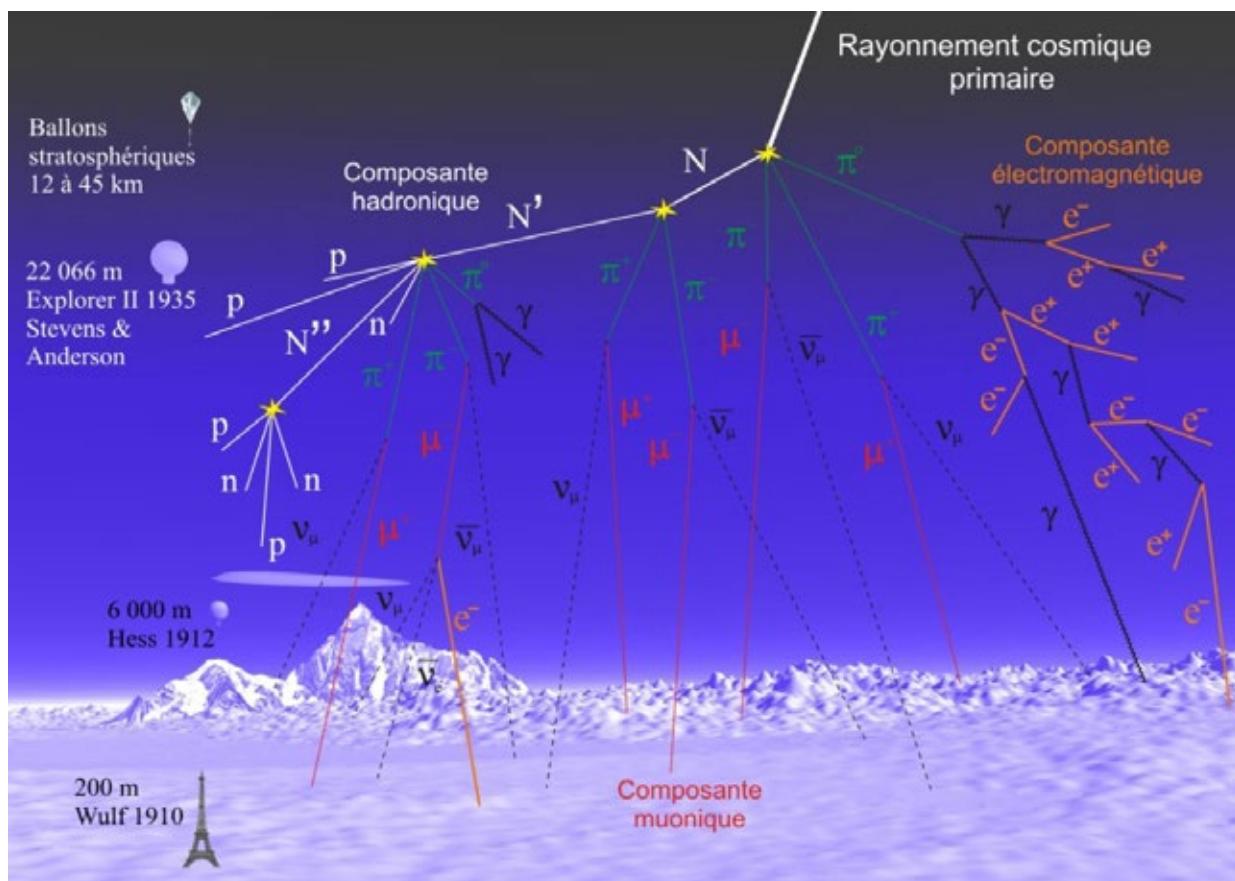
Cependant, il nous faut constater que Toulon n'est pas le centre de l'Univers... ■

Remerciements à l'équipe de développement d'« Aladin » du Centre de Données astronomiques de Strasbourg. <http://cdsweb.u-strasbg.fr/>

Netto/biblio graphies

1. IRIS version à télécharger (<http://www.astrosurf.com/buil/iris-software.html>).
2. Digicam control à télécharger (<http://digicamcontrol.com/>)
3. Article complet Ciel et Espace/Thierry Legault à télécharger (<https://www.cieletespace.fr/actualites/traitez-vos-images-du-ciel-profound-avec-iris>).
4. «Photographier le ciel en numérique», Patrick Lécureuil, Vuibert p213.
5. Centre de données astronomique de Strasbourg (<https://cdsweb.u-strasbg.fr/>).
6. Aladin version en ligne ou à télécharger (<https://aladin.u-strasbg.fr/aladin.gml>).
7. Aladin version Desktop à télécharger (<https://aladin.u-strasbg.fr/java/nph-aladin.pl?frame=downloading>

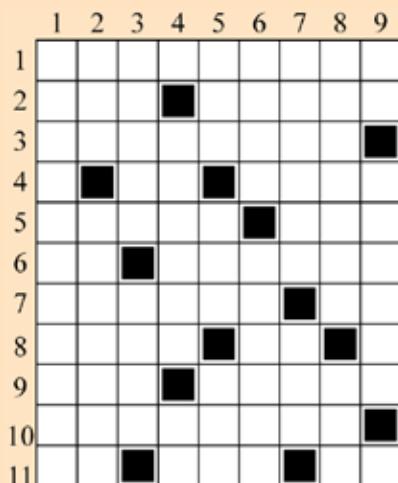
THÈME: LES RAYONS COSMIQUES



Formation de gerbe de particules par interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère (crédit C. Lagoute). Extrait du dossier pédagogique de Cosmos à l'école.

www.sciencesalecole.org/plan-cosmos-a-lecole-ressources-pedagogiques-ressources-scientifique

Mots croisés « rayons cosmiques »



Horizontalement

1. Ce peut être un rayon cosmique.
2. Ré en est une. X.
3. Ce peut être un rayon cosmique.
4. Saint normand. Satellite d'observation de la Terre.
5. L'un a travaillé sur les rayons cosmiques, l'autre a chanté son île. On les trouve aussi bien dans la lithosphère qu'au zénith.
6. Tête d'épingle. Shakespeare l'a apprivoisée.
7. Se positionne à droite ou à gauche mais rarement au centre. Film de Spielberg.
8. Système d'exploitation. Système d'exploitation.
9. Unité des rayons cosmiques de basse ou moyenne énergie. Sous-produit des rayons cosmiques.
10. Le rayonnement cosmique peut en créer de nouveaux.
11. C'est la fin des détecteurs. Il a été remplacé par des clés. Plusieurs millions pour de nombreuses sources de rayons cosmiques.

Verticalement

1. Observatoire de rayons cosmiques (deux mots).
2. Tous anglais. Lames.
3. Dans la vraie vie. Direct.
4. Détecteur de rayons cosmiques. La moitié de MMM.
5. Il forme des techniciens. Voyelles. Unité des rayons cosmiques de basse énergie.
6. Né le 19 octobre 1939, il étudie aussi les rayons cosmiques. Sol anglais.
7. Rêve. Bête.
8. Jardinier de Louis XIV. Agence américaine.
9. Un million de km³. Astéroïde n° 17, à ne pas confondre avec le satellite III de Saturne.

(solution page 48)

ARTICLE DE FOND

Histoire du rayonnement cosmique

Matthieu Renaud,

astrophysicien au CNRS/IN2P3, LUPM, Montpellier, matthieu.renaud@umontpellier.fr

Les rayons cosmiques ont été officiellement découverts en 1912. Leur histoire débute cependant dès le XVIII^e siècle, et se poursuit activement aujourd’hui avec des communautés internationales composées d’astronomes, d’astrophysiciens et de physiciens des particules traquant les sources à l’origine du rayonnement cosmique. Dans la lignée de leurs illustres prédécesseurs, cosmiciens et aventuriers, ils exploitent de nos jours un large panel d’instruments de toute sorte, installés sous et sur terre, depuis les glaces polaires et les fonds marins jusqu’aux montagnes, déserts et autres plateaux d’altitude, ou embarqués à bord de ballons et de satellites dans l’espace. Il est ici conté, dans ses grandes lignes, la riche histoire de ces particules cosmiques mêlant infiniment grand et infiniment petit, recherches fondamentales et développements technologiques intimement liés aux grandes avancées scientifiques du XX^e siècle.

De l’électricité aux rayonnements ionisants

Plus d’un siècle après l’introduction du terme « électricité¹ » par le savant anglais William Gilbert, Charles François de Cisternay du Fay, chimiste français, émit l’hypothèse en 1733 de l’existence de deux sortes d’électricité, l’une *vitreuse* et l’autre *résineuse*, suite à une série d’expériences portant sur l’attraction et la répulsion de différents corps électrisés. Quelques décennies plus tard, en plein siècle des Lumières, Jean Antoine Nollet, homme d’Église et de science, conçut les premiers électroscopes, à boules de sureau puis à feuilles d’or (figure 1a), permettant de « peser les fluides électriques ».



Fig.1a. À gauche, schéma des premiers électroscopes à feuilles d’or, suspendues à une tige conductrice qui, une fois chargée par induction ou par contact, amène les feuilles à se repousser mutuellement.

Fig.1b. À droite, électromètre de type Wulf dans lequel les feuilles d’or sont remplacées par de fines lamelles de verre silicaté, dont l’écartement est mesuré précisément par un microscope.

¹ Mot issu du grec ἡλεκτρον, elektron, désignant l’ambre jaune, connue des Grecs anciens tels Thalès de Milet, pour attirer les objets légers, une fois la surface frottée.

À cette époque, il avait été constaté que l’écartement des feuilles d’or, après la mise en contact de l’électroscope avec un corps électrisé, diminuait avec le temps, et ce en l’absence de toute action extérieure.

À la fin du XVIII^e siècle, Charles-Augustin de Coulomb fut le premier à étudier la décharge au cours du temps d’une sphère initialement électrisée et conclut en 1785 que « la quantité d’électricité qu’un corps isolé perd dans un temps donné » peut s’expliquer « soit par le contact de l’air plus ou moins humide, soit le long des soutiens plus ou moins idio-électriques² ». Au cours du siècle suivant, Michael Faraday (1835) confirma les observations de Coulomb avec un appareillage de meilleure facture, et William Crookes montra, en 1879, que le taux de décharge variait avec la pression de l’air. Les scientifiques soupçonnèrent alors l’existence d’un phénomène³ dans l’air contenu dans les instruments qui apporte des charges propres à neutraliser les feuilles d’or, mais l’origine de ce processus restait une énigme.

Au cours d’une série d’expériences menées en 1887 et 1888, les physiciens allemands Heinrich Hertz et Wilhelm Hallwachs démontrèrent que la lumière ultraviolette est à même d’arracher des charges électriques à la matière. La dernière décennie du XIX^e siècle vit alors se succéder les découvertes de rayonnements tous plus ionisants les uns que les autres. En 1895, Jean Perrin, par le biais d’études menées avec des tubes à décharge dits de Crookes,

² Susceptible d’acquérir les propriétés électriques par le frottement.

³ Que l’on nomme aujourd’hui l’ionisation, c’est-à-dire le processus par lequel un électron est extrait d’un atome, laissant ce dernier à l’état d’ion, donc porteur d’une charge électrique.

révéla la nature corpusculaire des rayons cathodiques (des électrons, mis en évidence deux ans plus tard par Joseph John Thomson). La même année, Wilhelm Röntgen, en étudiant ces mêmes rayons cathodiques, découvrit un rayonnement hautement plus pénétrant et inconnu jusqu'alors, qu'il nomma à juste « titre » rayons X (figure 2a).

En 1896, Henri Becquerel, spécialiste des phénomènes de phosphorescence, mena une série d'expériences sur les sels d'uranium, et put attester de l'existence d'un rayonnement propre qu'il nomma rayons uraniques (figure 2b) et dont les propriétés ionisantes furent par la suite étudiées par Marie Curie. Avec son mari Pierre Curie, ils découvrirent de nouvelles substances, le polonium et le radium, également capables d'émettre de tels rayonnements (et dénommés α et β par Ernest Rutherford et γ par Paul Villard pour distinguer leur différence de nature) et baptisèrent ce phénomène naturel, la radioactivité.



Origine terrestre ou cosmique ?

Il restait cependant à expliquer le phénomène de décharge des électroscopes, même en prenant soin de les protéger contre tous ces rayonnements ionisants (aujourd'hui connus comme étant de type électromagnétique, UV, X, γ , ou corpusculaire, α , β). Isolés consciencieusement au sein de blindages métalliques de différentes natures et épaisseurs, par les physiciens allemands Julius Elster et Hans Geitel et plus tard par le scientifique néo-zélandais Ernest Rutherford, ou même installés au sein d'un ancien

tunnel ferroviaire par le physicien écossais Charles Wilson, les électroscopes continuaient à se décharger. Les résultats obtenus par Wilson l'amènèrent en 1901 à émettre l'hypothèse que « la cause de la production d'ions dans l'air pur pourrait résider dans un rayonnement émis par des sources situées hors de l'atmosphère [...] et doué d'un pouvoir de pénétration considérable », tout en concluant qu'une telle idée était peu vraisemblable. Et pour cause, l'opinion générale penchait plutôt pour une origine tellurique, les électroscopes devant baigner dans un rayonnement issu de la radioactivité des roches terrestres, mise en évidence quelques années auparavant par les Becquerel et Curie. Plusieurs scientifiques du début du xx^e siècle menèrent alors des campagnes de mesures systématiques du taux de décharge des électroscopes dans différentes conditions de température, de pression et d'environnement. Franz Linke en 1902, Karl Bergwitz et Albert Gockel⁴ en 1909, décidèrent d'emporter des électroscopes lors d'ascensions en ballon, jusqu'à près de 5 500 m d'altitude. Ils observèrent qu'au-delà d'une certaine altitude, le taux de décharge était à la hausse, ce qui ne pouvait s'expliquer par une origine purement terrestre. Mais les résultats obtenus étaient entachés de soucis instrumentaux et ne permettaient pas de tirer des conclusions définitives.

À cette époque, la précision des mesures était modeste et les électroscopes difficilement transportables. De nouvelles idées de mesure couplées à des avancées technologiques étaient alors nécessaires pour répondre à la question de l'origine de ce rayonnement ionisant cosmopolite. En 1909, le jésuite et scientifique allemand Théodore Wulf mit au point un nouveau type d'électroscope, d'une sensibilité inégalée (figure 1b). Il mena une première série de mesures dans des galeries souterraines et constata avec étonnement que le taux de décharge de son électromètre sous terre était inférieur à celui mesuré à la surface. Il décida alors d'emmener son appareil le plus haut possible, loin du sol. Grâce au soutien de Paul Langevin, il obtint les autorisations nécessaires pour installer ses instruments, en 1910, sur l'édifice le plus haut du monde à l'époque... au troisième étage de la tour Eiffel ! Et là encore, les résultats obtenus le laissèrent perplexe : à près de 300 m au-dessus du Champ-de-Mars, le taux de décharge avait effectivement diminué par rapport aux valeurs mesurées au pied de la tour, mais seulement de « pas même une moitié », alors qu'il s'attendait à un taux bien plus faible dans l'hypothèse d'une

⁴ Il fut le premier, après une série de mesures obtenues avec Wulf dans les montagnes alpines en 1908, à proposer le terme de « kosmische Strahlung » ou « radiation cosmique ».

origine tellurique. Entre 1907 et 1911, un physicien italien, Domenico Pacini, mena des campagnes de mesure du taux d'ionisation à différentes altitudes, en montagne, sur des lacs et en mer, ce qui lui permit d'avancer, dès 1910, que le sol ne pouvait être l'unique cause de ce rayonnement ionisant. En juin 1911, il eut l'idée d'immerger un électroscopie de type Wulf, soigneusement installé dans une caisse en cuivre, à 3 m sous le niveau de la mer, dans le golf de Gênes au large de Livourne, et mesura à plusieurs reprises une réduction significative du taux de décharge (de 20 %) par rapport à celui mesuré à la surface. Dans un article publié en 1912, il en conclut alors « [...] qu'une source importante de l'ionisation existe dans l'atmosphère, provenant d'un rayonnement pénétrant, indépendamment de l'action directe de la radioactivité des sols ».

Bien que toutes ces campagnes de mesures semblaient pointer vers une cause principalement autre que terrestre, la plupart des physiciens étaient encore réticents à l'idée d'abandonner l'hypothèse d'une origine tellurique, plus « naturellement » compréhensible. En 1910, un jeune physicien autrichien, Victor Hess développa des méthodes d'étalonnage précis des électroscopes à l'aide de sources radioactives au sein du nouvel Institut du radium à Vienne. Convaincu par les résultats obtenus par Wulf, et grâce à une bourse de l'Académie impériale des sciences, il entreprit dix ascensions en ballon : trois en 1911 et sept en 1912. Dans le but de mettre en évidence une éventuelle contribution du Soleil, Hess effectua cinq de ses vols de nuit, tandis qu'un autre coïncida même avec une occultation solaire quasi totale le 12 avril 1912. Mais le vol le plus mémorable fut celui du 7 août 1912, à bord de l'aérostat Böhmen ; avec deux électromètres modèle Wulf modifiés par ses soins pour résister aux basses pressions et températures régnant à haute altitude, Hess nota l'évolution des taux de décharge mesurés au cours de l'ascension qui l'emmena à 5 350 m au-dessus du sol. En dessous de 1 000 m, les mesures obtenues étaient en accord avec les précédentes, et au-delà de 1 500 m d'altitude le taux était à nouveau en nette augmentation, jusqu'à atteindre une valeur nettement supérieure à la référence sol (figure 3) ! Et à Hess de conclure : « La seule manière d'interpréter mes résultats expérimentaux fut d'admettre l'existence d'un rayonnement très pénétrant, d'une nature encore inconnue, venant principalement d'en haut, et très probablement d'origine extraterrestre », et qu'il nomma « Höhenstrahlung » (rayonnement venant d'en haut). L'article publié en 1912 attira l'attention du physicien allemand Werner Kolhörster.

Celui-ci parvint, au cours de plusieurs vols en ballon entre 1913 et 1914, à emporter des instruments de mesure jusqu'à 9 300 m d'altitude, où il y mesura un taux quasiment dix fois supérieur à la valeur au sol (figure 3). Tout en confirmant les mesures de Hess, il estima également que le coefficient d'absorption dans l'air de ce rayonnement était nettement inférieur à celui du rayonnement γ , pourtant hautement pénétrant.

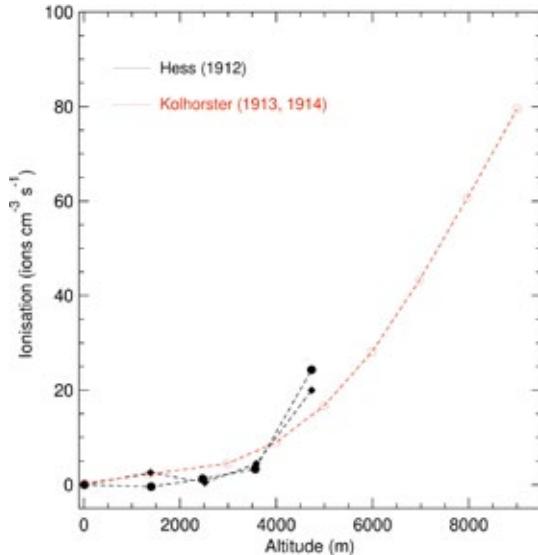


Fig.3. Courbes expérimentales du taux d'ionisation (soustrait de la mesure de référence au sol) en fonction de l'altitude obtenues par Hess en 1912 (en noir) et par Kolhörster en 1913 et 1914 (en rouge).

Particules ou rayons ?

À l'issue de la Grande Guerre, le début des années 1920 fut une époque de floraison exceptionnelle à la fois sociale, culturelle, artistique et scientifique. La question de la nature de ce rayonnement cosmique retint alors l'attention des meilleurs scientifiques de la planète, et notamment aux États-Unis. Au sein du tout nouveau laboratoire Caltech à Pasadena en Californie, le physicien américain Robert Andrews Millikan, quelque peu sceptique à l'égard des conclusions de Hess et consorts, entreprit dès 1922 de mener ses propres mesures, par le biais d'électromètres compacts, automatisés et embarqués à bord de ballons-sondes à très haute altitude. En 1924, il affirmait que « l'entièreté de ce rayonnement pénétrant est d'origine locale ». Mais dès l'année suivante, de nouvelles mesures de haute précision effectuées avec son collègue Harvey Cameron sous différentes épaisseurs d'eau dans deux lacs de montagne d'altitudes différentes, l'amenèrent finalement à considérer que « ces rayons très pénétrants sont d'origine cosmique entrant dans l'atmosphère de manière uniforme dans toutes les directions ». Il les nomma alors « rayons cosmiques », persuadé,

de par une vision métaphysique du cosmos, qu'il s'agissait de photons γ de haute énergie, messagers de la création continue de nouveaux atomes dans l'espace interstellaire et intergalactique d'un Univers stationnaire.

Dans ce contexte, deux instruments allaient jouer un rôle central dans l'étude du rayonnement cosmique : la chambre à brouillard et les compteurs Geiger-Müller. Le premier, inventé par Wilson en 1911, permettait de visualiser le passage de particules ionisantes sous la forme de traînées de condensation au sein d'une enceinte remplie d'un gaz saturé de vapeur. En y appliquant un intense champ magnétique à l'aide d'électroaimants, il était alors possible de trier les particules en fonction du signe de leur charge électrique, et le rayon de courbure permettait d'estimer leur énergie cinétique, comme le fit le physicien russe Dimitri Skobeltsyn en 1927. Il fut ainsi le premier à proposer que les particules chargées relativistes qu'il avait observées étaient la manifestation des rayons cosmiques au cours de leur traversée dans l'atmosphère. En 1928, les physiciens allemands Hans Geiger et Walther Müller mirent au point un nouvel instrument, basé sur le principe de fonctionnement des chambres d'ionisation constituées d'une enceinte remplie de gaz à l'intérieur de laquelle se trouve un fil métallique relié à un générateur électrique et d'un électromètre permettant de mesurer le courant généré par le passage d'une particule ionisante. Ces fameux compteurs Geiger, simples d'utilisation et à réponse rapide, d'usage courant encore aujourd'hui, furent employés par paire la même année par Walther Bothe, qui mit alors en évidence la détection par coïncidence. Dès 1929, suite à une expérience restée célèbre, menée avec Werner Kolhörster (celui-là même qui monta en ballon à plus de 9 km d'altitude quinze ans auparavant) et mettant en scène deux compteurs Geiger disposés de part et d'autre d'un empilement de plaques d'or, de plomb et d'acier, ils démontrèrent que le gros des rayons cosmiques mesurés sur Terre était constitué de particules de matière, chargées électriquement, et d'énergie très élevée.

Il restait maintenant à révéler la nature de ces rayons cosmiques à leur entrée dans l'atmosphère. Un jeune physicien américain, Arthur Compton, mit sur pied au début des années 1930 huit expéditions vers soixante-neuf stations de mesure dispersées à la surface de la Terre (entre 78° N et 46° S de latitude, 175° E et 173° O de longitude et jusqu'à 6 000 m d'altitude), impliquant plus de soixante scientifiques ! À chaque station, se trouvait un dispositif expérimental identique, sous la forme d'une chambre d'ionisation

remplie d'argon et connectée à un électromètre, le tout étalonné avec une même source radioactive de référence. Dès 1932, il démontrait que l'intensité du rayonnement cosmique était plus grande aux hautes latitudes qu'à l'équateur, quelle que soit l'altitude, et que la variation mesurée s'ajustait mieux avec la latitude géomagnétique que géographique⁵. Cet effet en latitude fut confirmé par d'autres campagnes de mesures, dont celle menée en 1933 par Pierre Auger et Louis Leprince-Ringuet lors d'un voyage de deux mois à bord du Kerguelen entre Le Havre et Buenos Aires. Le rayonnement cosmique, à son arrivée dans la haute atmosphère, était donc fait de corpuscules électrisés, sensibles au champ magnétique terrestre, ce qui contredisait la théorie de Millikan et de ses rayons γ , électriquement neutres⁶. Fin décembre 1932, Compton et Millikan s'affrontèrent verbalement lors d'une réunion, et cette virulente controverse à propos de la nature des rayons cosmiques fit même la une du grand quotidien américain *The New York Times*.

Quelles particules pour ces « rayons » ?

À l'exception de Millikan, les physiciens du début des années 1930 s'accordaient sur la nature corpusculaire des rayons cosmiques dits « primaires », à leur entrée dans l'atmosphère. Restait à savoir le signe des charges électriques (positives ou négatives ?) emportées par ces particules cosmiques. Tout comme pour la variation en latitude expliquée par l'effet du champ magnétique terrestre sur les trajectoires des particules chargées, il devait également exister un effet « est-ouest ». D'après les travaux de Carl Störmer, Georges Lemaître & Manuel Vallatra, le flux de charges positives (négatives) devait être plus intense en direction de l'ouest (de l'est), et ce particulièrement dans les régions équatoriales. Quelques mois après les mesures de Bothe et Kolhörster, un jeune physicien italien, Bruno Rossi, améliora la méthode de détection par coïncidence en développant un circuit électronique capable de détecter de multiples coïncidences avec une excellente résolution temporelle et ainsi, de remonter à la trajectoire de la particule ionisante suivant la configuration géométrique de l'expérience, tout en

⁵ Notons que le physicien néerlandais Jacob Clay avait déjà mesuré une baisse d'intensité proche de l'équateur lors de deux voyages entre l'Europe et Java, en 1927 et 1929, mais ses résultats ne purent être confirmés par d'autres expéditions scientifiques menées à la même époque.

⁶ Le terme de « rayons cosmiques », quelque peu trompeur mais imposé par un scientifique influent en son temps du haut de son statut de prix Nobel, a parcouru l'histoire jusqu'à aujourd'hui...

réduisant considérablement le taux de coïncidences fortuites. Entre 1931 et 1933, plusieurs groupes de physiciens mirent alors en œuvre ces « télescopes » à compteurs Geiger et menèrent des campagnes de mesure de par le monde. Luis Alvarez et Arthur Compton, Thomas Johnson au Mexique, et Bruno Rossi en Erythrée, démontrèrent que la grande majorité des rayons cosmiques primaires étaient des particules chargées positivement. La communauté scientifique en conclut alors qu'il s'agissait de protons, noyaux d'hydrogène, l'élément le plus abondant dans l'Univers.

À la même époque, Rossi constata que trois compteurs Geiger, disposés de façon à ce qu'une seule particule ionisante ne pouvait les traverser tous les trois, étaient déclenchés en coïncidence à un taux supérieur à celui attendu. Il qualifia alors ces groupes de particules de « vastes essaims » (*estesi sciamei*), ce que Patrick Blackett et Giuseppe Occhialini venaient de découvrir sous la forme d'une « pluie » de traces au sein de leur chambre à brouillard encadrée par des compteurs Geiger, et qu'ils dénommèrent « douches » (*showers*) de particules secondaires « se produisant quand la radiation ionisante traverse la matière » (figure 4a).

Alors que Homi Bhabha et Walter Heitler venaient de développer la théorie des cascades électromagnétiques pour expliquer ces observations, Pierre Auger développa en 1938 à l'IBPC à Paris un dispositif expérimental similaire à celui de Rossi mais dont le circuit électronique avait été amélioré par Roland Maze afin d'atteindre un pouvoir de résolution temporelle de l'ordre de quelques microsecondes. Au travers de mesures systématiques avec différents arrangements de compteurs, depuis la montagne Sainte-Geneviève à Paris jusqu'au Pic du Midi et au laboratoire installé au Jungfraujoch en Suisse, il mit alors en évidence l'existence des « grandes gerbes cosmiques atmosphériques contenant des corpuscules ultra-pénétrantes », couvrant une superficie allant jusqu'à 1 km² ! En comprenant que celles-ci étaient issues de l'interaction à haute altitude d'une seule particule extrêmement énergétique avec les noyaux des atomes de l'air, il en conclut que les rayons cosmiques primaires pouvaient transporter une énergie colossale de l'ordre du petaélectronvolt (1 PeV = 10¹⁵ eV), soit un milliard de fois plus grande que celles typiquement mises en jeu dans les processus de radioactivité naturelle ! Les découvertes des années 1930, et notamment celle des grandes gerbes atmosphériques (figure 4b) constituées d'une foultitude de particules aux propriétés encore inconnues, permirent alors

l'émergence d'un nouveau pan de la physique connu de nos jours sous le nom de physique des particules.

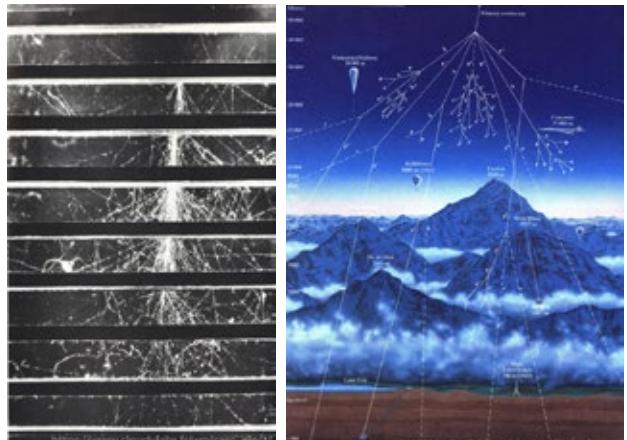


Fig.4a. À gauche : photographie d'une cascade électromagnétique initiée par un photon d'environ 4 GeV au sein d'une chambre à brouillard contenant 8 plaques de plomb de 1,3 cm d'épaisseur.

Fig.4b. À droite : schéma du développement d'une grande gerbe atmosphérique issue de l'interaction d'un rayon cosmique dit « primaire » (dont l'énergie dépasse les 10²⁰ eV, soit environ 20 J, pour les plus énergétiques d'entre eux !) avec les noyaux des atomes de l'air. La cascade des quelques dizaines de milliards de particules secondaires ainsi générées comporte trois composantes dites hadronique (pions, neutrons, protons), électromagnétique (photons, électrons et positrons), et muonique (muons et neutrinos).

Port-folio de nouvelles particules...

En 1932, le physicien américain Carl Anderson, au sein du laboratoire Caltech dirigé alors par Millikan, remarqua, sur un de ses clichés photographiques (figure 5a), une trace en tout point identique à celle laissée par un électron, mais dont la charge était... positive ! La découverte de l'anti-électron, baptisé « positron » (ou positon en français)⁷, initia l'étude du rayonnement cosmique dans le domaine naissant de la physique des particules. Cette découverte fut confirmée au cours de la même année par Blackett et Occhialini qui mettaient en évidence le processus de création de paires électron-positron, et confirmaient ainsi la théorie des antiparticules élaborée en 1928 par Paul Dirac. Par la suite, Anderson et son doctorant Seth Neddermeyer décidèrent d'emmener leur dispositif expérimental à 4 300 m d'altitude, au sommet du Pikes Peak dans le Colorado, afin d'obtenir plus de données sur les rayons cosmiques. En 1936, ils identifièrent alors sur les clichés des traces laissées par des particules des deux signes mais dont la masse se situait entre celle de l'électron et celle du proton, et baptisèrent ces particules de masse intermédiaire des « mésotrons », dénommées

⁷ et qui vaudra à Anderson le prix de Nobel de physique en 1936 conjointement avec Hess.

plus tard « mésons ». Ils ouvraient ainsi la voie à une fructueuse série de découvertes portant sur ces particules de masse intermédiaire. L'existence d'un méson très pénétrant, dénommé méson μ (puis « muon » puisqu'il s'agit d'un lepton, environ deux cent fois plus lourd que l'électron), fut confirmée dès 1937 par Jabez Street et Edward Stevenson. Suite au second conflit mondial, les physiciens mirent en œuvre une nouvelle technique de détection basée sur des plaques photographiques d'émulsions nucléaires adaptées à la détection des particules, dont les traces pouvaient s'examiner en détail au microscope. Au sein du laboratoire de physique de l'Université de Bristol, Cecil Powell, Giuseppe Occhialini et leurs collègues découvrirent, en 1947, par une série de mesures au Pic du Midi et dans les Andes boliviennes, des événements constitués d'une première particule de type méson dont la trace s'arrêtait net dans l'émulsion et d'où repartait une deuxième trace due à un autre méson. Ils postulèrent alors l'existence d'une nouvelle particule de masse intermédiaire, dénommée méson π ou « pion », qui s'était alors désintégré en un muon, et comprirent qu'il s'agissait de ces particules prédictes en 1935 par Hideki Yukawa au sein de sa théorie des forces nucléaires. La même année, Clifford Butler et George Rochester annoncèrent la découverte d'une nouvelle particule de masse intermédiaire neutre, la première des particules dites « étranges », le méson K ou « kaon », qui décroissait en deux pions chargés (figure 5b).

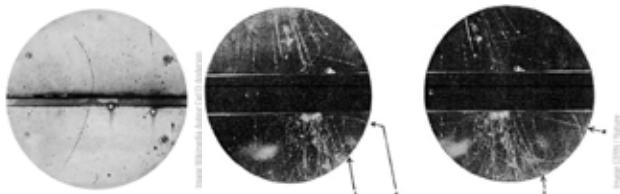


Fig.5. Photographies dans des chambres à brouillard révélant le positron (à gauche-a) et le kaon (au milieu et à droite-b). Le positron, arrivé dans la chambre par en bas avec une énergie de 63 MeV, présente une courbure (sous l'effet d'un champ magnétique perpendiculaire au plan de l'image), plus marquée après avoir traversé la plaque de plomb intercalée au milieu (énergie en sortie de 23 MeV). La longueur de parcours après traversée est environ dix fois plus grande que celle attendue par un proton de même énergie. Le kaon est mis en évidence par les traces « fourchues » (en forme de « V ») notées a et b qui correspondent aux particules plus légères (notamment des pions) issues de sa décroissance.

Et en 1948, ces mêmes émulsions photographiques, embarquées à bord de vols stratosphériques à près de 30 km d'altitude, permirent à Helmut Bradt et Bernard Peters d'identifier au sein des rayons cosmiques primaires, outre les abondants protons formant les noyaux d'hydrogène, des noyaux

d'éléments plus lourds tels que l'hélium, le carbone, l'azote et l'oxygène, hautement énergétiques.

Les découvertes de ces nouvelles particules, à l'instar de « l'hypéron » révélé au Pic du Midi de Bigorre et baptisé par Louis Leprince-Ringuet en 1953⁸, étaient les dernières à mettre au crédit du rayonnement cosmique, seul moyen d'étudier ce « bestiaire » jusqu'à l'avènement des premiers grands accélérateurs de particules au début des années 1950. Déjà en 1948, le cyclotron de Berkeley permettait de produire les premiers pions en laboratoire, et les machines suivantes s'engagèrent dans une course à la production de particules toujours plus énergétiques dont les collisions permirent d'en découvrir de nouvelles, élémentaires (quarks et neutrinos) ou composites, au sein de centres de recherche internationaux nouvellement créés, tels que le Cern⁹ en 1954. Une scission venait ainsi de s'opérer entre les cosmiciens : d'un côté, ceux qui s'orientèrent vers des expériences installées auprès des grands accélérateurs afin de percer les mystères du monde subatomique, et de l'autre, ceux qui s'élancèrent dans la conquête spatiale naissante pour traquer les rayons cosmiques au-delà de l'atmosphère afin d'en découvrir l'origine.

Aujourd'hui, la scission s'est faite fusion, le domaine dit des « astroparticules », à l'intersection entre physique des particules, astrophysique et cosmologie, regroupe des chercheurs de tout bord, héritiers de cette riche histoire du rayonnement cosmique, et travaillant sur des instruments de plus en plus complexes, au sein de vastes collaborations internationales et dont les noms (Fermi, Hess, Auger) traduisent la filiation avec les cosmiciens du siècle passé. De nouvelles fenêtres astronomiques, photons gamma de haute et très haute énergie, neutrinos, ondes gravitationnelles et rayons cosmiques d'ultra-haute énergie, ont vu le jour ces dernières décennies. Ces messagers nous renseignent sur les phénomènes célestes les plus violents connus dans l'Univers, tous candidats au titre de sources de rayons cosmiques : sursauts gamma, noyaux actifs de galaxies, explosions stellaires (supernovae) et leurs vestiges, pulsars et autres magnétars, mais cela est une autre histoire... toujours en cours de rédaction !

⁸ Lors de la 3e édition de l'ICRC, conférence internationale sur le rayonnement cosmique, à Bagnères-de-Bigorre.

⁹ Aujourd'hui dénommé Organisation européenne pour la recherche nucléaire.

ARTICLE DE FOND

La détection des rayons cosmiques

Peter von Ballmoos, Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Toulouse

L'article décrit différentes méthodes scientifiques pour détecter ces rayons totalement invisibles mais qui possèdent une énergie colossale : « autant que dans toute la lumière des étoiles ».

La Terre est constamment bombardée par des particules à haute énergie. Chaque centimètre carré de notre atmosphère est criblé, chaque seconde, par un ou plusieurs rayons cosmiques. Intégré sur la surface de la planète, ce déluge de particules peut paraître impressionnant. Toutefois, la masse cumulée des particules du rayonnement cosmique interceptées par la Terre au cours d'une année correspond à 500 grammes seulement – ridiculement peu comparé aux 30 000 tonnes de matériel météoritique accrétié chaque année. Les rayons cosmiques sont néanmoins des messagers astrophysiques de toute première importance. Ils constituent l'un des rares échantillons de matière provenant de l'extérieur de notre Système solaire, véhiculant des énergies cinétiques vertigineuses. Le fait qu'il y ait autant d'énergie dans les rayons cosmiques que dans toute la lumière des étoiles parle de lui-même ; le flux énergétique des rayons cosmiques intercepté par la Terre (environ 10^9 W) est presque un ordre de magnitude plus important que le flux énergétique des météorites¹.

Les rayons cosmiques primaires (ceux qui bombardent l'atmosphère terrestre depuis l'espace), sont composés de protons (89 %), de noyaux d'hélium (9 %) et de noyaux plus lourds (1 %), jusqu'à l'uranium ; la fraction des électrons n'est que de 1 % de celle des noyaux. Une très petite fraction est constituée de particules d'antimatière, telles que les positrons ou les antiprotons. L'interaction de ces rayons cosmiques primaires avec les atomes des hautes couches de l'atmosphère crée des gerbes cosmiques contenant des myriades de particules secondaires. Une partie de ces particules traversent notre atmosphère et arrivent jusqu'au niveau du sol dans une pluie continue (voir en particulier l'article de M. Renaud dans ce numéro). Des dizaines de particules secondaires (essentiellement des muons) passent ainsi au travers de notre corps chaque seconde sans que nous nous en apercevions.

Mais alors, comment se rendre compte de ce phénomène omniprésent ? N'y a-t-il réellement aucun moyen d'observer des rayons cosmiques avec nos yeux ? Pour nous, Terriens, voir directement des rayons cosmiques est effectivement impossible... Heureusement ! Par contre, en dehors de la magnétosphère de notre planète, certains astronautes (par exemple lors du programme lunaire Apollo) ont raconté avoir perçu des « flashes lumineux », et ce, même les yeux fermés ! Il s'agit vraisemblablement de particules de rayons cosmiques qui ont traversé leur œil, produisant des flashes de lumière visible à travers « l'effet Cherenkov » – nous décrirons ce phénomène plus bas, dans le paragraphe sur les instruments d'observation des rayons cosmiques. Mise à part cette expérience extrêmement rare, le phénomène des aurores boréales, magnifiques lumières célestes observables à certains endroits de la Terre, illustre bien l'effet produit par l'interaction des rayons cosmiques avec la matière. Les aurores boréales sont produites lorsque les particules chargées du vent solaire (moins énergétiques mais beaucoup plus abondantes que les rayons cosmiques) arrivent à atteindre l'atmosphère en suivant les lignes du champ magnétique de la Terre qui les canalisent vers les régions polaires. Les particules heurtent alors les composants de la haute atmosphère – on dit que les particules du vent solaire ionisent ou excitent les atomes et molécules. Quand ces atomes et molécules retrouvent leur état d'origine (les physiciens disent qu'ils se recombinent et se désexcitent), ils émettent de la lumière aux teintes vertes, violettes ou roses. L'atmosphère agit ici comme un énorme scintillateur – un type de détecteur très répandu dont on parlera également ci-dessous – tandis que nos yeux jouent le rôle de photodétecteurs.

Dans un autre registre, afin de prendre conscience de la présence imperceptible des rayons cosmiques, l'artiste Céleste Boursier-Mougenot a imaginé et conçu une installation appelée *Averses*, qui a été exposée au musée d'art contemporain des Abattoirs de Toulouse en 2014 (figure 1). *Averses* est une

¹ 30 000 tonnes de météorites par an donnent, avec l'hypothèse de $V_{\text{impact}} \approx 20$ km/s, une puissance de $P_{\text{météorites}} \approx 2 \times 10^8$ W.

batterie de musique « frappée par les rayons cosmiques » : l'installation est composée d'un détecteur qui, au passage d'une gerbe cosmique, déclenche une pluie brève et intense qui survient depuis le toit du musée. Quelque vingt-cinq mètres en dessous, cette averse fait sonner peaux et cymbales de la batterie... réveillant la curiosité du visiteur qui déambule dans l'exposition sans savoir qu'à tout moment, son corps est lui-même potentiellement traversé par des particules extra-terrestres.



Fig.1. Exposée au Musée des Abattoirs de Toulouse en 2014, l'installation artistique «Averses» de Céleste Boursier-Mougenot matérialise la présence invisible des rayons cosmiques. Lorsque le télescope à muons (en arrière-plan à gauche de la batterie) détecte le passage d'une gerbe cosmique, une électrovanne d'une arrivée d'eau est actionnée. Située au plafond à environ 25 m au-dessus de l'instrument, celle-ci libère une courte mais intense averse d'eau. Les gouttes de cette douche font sonner les tambours et les cymbales, à des intervalles d'environ deux minutes en moyenne.

Par quels moyens d'observation les rayons cosmiques sont-ils étudiés aujourd'hui ?

Bien que les systèmes de détecteurs varient considérablement en taille et en complexité, le nombre de processus physiques sur lesquels reposent la plupart des détecteurs est limité. Dans le paragraphe sur la perception humaine des rayons cosmiques, nous avons déjà fait la connaissance de plusieurs effets couramment utilisés : « l'effet Cherenkov », la courbure des trajectoires et l'ionisation d'un milieu. Ici on mesure l'ouverture angulaire du cône Cherenkov, la déviation de la trajectoire et la perte d'énergie dans le milieu. Les observables recherchées sont avant tout l'identification de la particule (proton, antiproton, électron, positron, noyau d'hélium, noyau d'élément lourd comme par exemple le fer) – elle passe par la mesure de la masse et de la charge de la particule ; l'énergie cinétique

qui est souvent très élevée (1 GeV à 100 EeV²) vu que la vitesse des particules est proche de celle de la lumière. Pour identifier une particule, on a en général besoin de deux ou plusieurs mesures, avec chacune dépendant différemment de la masse, de la charge, et de la vitesse. La direction d'arrivée de la particule n'est généralement pas significative pour sa provenance cosmique – les champs magnétiques (de la Terre, du Soleil, de la Voie lactée et s'il faut du milieu intergalactique) ayant brouillé les pistes en enroulant les trajectoires tels que les spaghetti dans un plat. Enfin, une observable clef est le flux, c'est-à-dire le nombre de particules traversant une unité de surface par unité d'angle solide et par unité de temps.

Ci-dessous, les principales techniques de détection les grandeurs mesurées sont évoquées pour un observatoire spatial de type AMS-02. Le schéma de principe d'un tel instrument est esquissé dans la figure 2.

En opération à bord de la Station spatiale internationale depuis 2011, AMS-02 a une masse de 7,5 tonnes, ses dimensions sont de 5 m × 4 m × 3 m. AMS-02 a été conçu pour l'observation directe de rayons cosmiques avec des énergies dans la gamme 0,5 à 4 TeV, son acceptance est d'environ 0,5 m² · sr. L'aimant permanent est la pièce maîtresse de l'instrument.

Dans son puissant champ magnétique les particules chargées subissent une force de Lorenz et sont déviées lorsqu'elles traversent les différents plans de détecteurs. L'aimant permanent d'AMS (en néodyme-fer-bore) produit un champ magnétique 3 000 fois plus puissant que celui de la Terre.

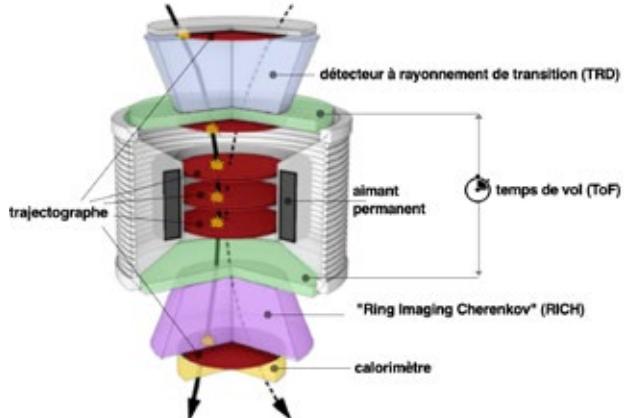


Fig.2. Schéma de principe d'un détecteur de rayons cosmiques dans l'espace tel qu'AMS-02.

² 1 GeV = 10^9 eV ; 1 TeV = 10^{12} eV ; 1 PeV = 10^{15} eV et 1 EeV = 10^{18} eV. L'énergie cinétique d'un moustique en vol étant environ 1 TeV.



Fig.3. L'AMS-02. (crédit ESA).

Le trajectographe mesure les coordonnées des particules déviées dans le champ magnétique de l'aimant permanent, permettant ainsi de reconstruire leur trajectoire. Dans AMS, il est composé de neuf plans de détecteurs silicium à micro-pistes, l'un par 200 000 canaux électroniques ! Lorsqu'une particule chargée crée des paires d'électron-trous dans ces semi-conducteurs, les porteurs de charge libérés migrent vers les deux pistes (électrodes) les plus proches, permettant de localiser l'interaction dans chaque plan de détecteur à 10 micromètres près. La courbure de la trajectoire ainsi déterminée est une mesure pour la « quantité de mouvement divisée par charge de la particule », y compris le signe de la charge (positif ou négatif) – c'est le moyen pour identifier des particules d'antimatière (comme le positron – même masse que l'électron, mais de charge opposée).

Dans le détecteur à rayonnement de transition (TRD), lorsqu'une particule chargée à haute énergie se déplace d'un milieu à un autre, elle émet un « rayonnement de transition » sous forme de rayons X. Le TRD est composé d'un radiateur dans lequel des photons visibles (ou UV) sont générés par les particules chargées relativistes, et d'un photodétecteur qui observe ces photons visibles. Un TRD permet de distinguer entre les électrons et hadrons (protons) à des énergies très élevées.

Disposés de part et d'autre de l'aimant permanent, les détecteurs de temps de vol (TOF) font office de chronomètre. Dans les compteurs à scintillation du TOF, le passage d'une particule ionisante excite des molécules, celles-ci émettent immédiatement des impulsions lumineuses par fluorescence. La lumière visible/UV est ensuite détectée par des photomultiplicateurs. Les détecteurs TOF ont plusieurs fonctions : ils avertissent (« triggrent ») les autres détecteurs de l'arrivée d'un rayon cosmique incident, la vitesse ($\beta = v / c$) d'une particule

est mesurée avec une résolution de 4 %, ce qui discrimine également entre les particules montantes et descendantes ; enfin, la charge des particules est obtenue par des mesures de leur perte d'énergie par ionisation.

Le détecteur RICH (Ring-Imaging CHERENKOV) permet de mesurer à la fois la charge et la vitesse des particules avec une grande précision (meilleure que 0,1 % pour la vitesse). Une particule chargée qui traverse le verre du détecteur à une vitesse proche de la lumière (supérieure à la vitesse de la lumière dans le verre, ou dans l'eau, comme dans l'humeur vitreux des astronautes de la mission Apollo mentionnée ci-dessus) émet un rayonnement Cherenkov – c'est un phénomène équivalent au passage du mur du son. La lumière Cherenkov émise prend la forme d'un cône avec un angle d'ouverture proportionnel à la vitesse de la particule.

Dans AMS-02, la lumière de Cherenkov est générée dans des radiateurs en aérogel de silice et en fluorure de sodium. Le cône de lumière résultant prend la forme d'un cercle ou d'une ellipse dans le plan de l'imageur RICH, constitué de 10 880 photomultiplicateurs.

Le calorimètre électromagnétique (ECAL) est un instrument d'imagerie tridimensionnel composé de 540 kg de plomb pris en sandwich avec 50 000 fibres scintillantes. Sa fonction est d'arrêter complètement les particules, en mesurant leur énergie et leur direction avec une grande précision. La résolution énergétique ECAL est d'environ 2 % et la résolution angulaire est de 0,5° (pour $E > 100$ GeV). Ensemble avec le trajectographe, l'ECAL permet par exemple de distinguer un positron parmi jusqu'à 100 000 protons.

Les rayons cosmiques dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut (clea-astro.eu/archives).

Il y a très peu d'articles abordant ce sujet dans les Cahiers Clairaut.

- L'effet Cérenkov dompté au LP2I. CC n° 134 (2011).
- L'exploration de la planète Mars à l'aube du 3^e millénaire. CC n° 127 (2009). Où l'on explique comment les rayons cosmiques sont utiles pour détecter l'eau sous la surface de Mars.

AVEC NOS ÉLÈVES

Étude du flux de muons selon la nature des matériaux d'un établissement scolaire

Catherine Fauroux, Christine Tran, Lycée Jeanne d'Arc – Étampes (91)

Dans le cadre d'un TPE une belle illustration de la démarche expérimentale à l'aide d'un cosmodétecteur. Les élèves ont appliqué la tomographie muonique à la détermination de l'absorption des différents bâtiments du lycée construit avec des matériaux différents.

Dans le cadre d'un TPE en 2017-2018, trois élèves de 1^{re} S (Matthieu Colin, Éric-Junior Égée et Natasha Krakowiak) ont eu l'opportunité d'utiliser un cosmodétecteur prêté par le dispositif ministériel « COSMOS à l'École ».

Cette roue cosmique permet de détecter les muons cosmiques, particules élémentaires produites dans la haute atmosphère et qui arrivent sur Terre à chaque instant. Après des recherches bibliographiques, dont un certain nombre en langue anglaise, les élèves se sont alors demandés si le flux de muons incidents pouvait dépendre de la nature du matériau traversé. Pour cela, ils ont effectué différentes mesures au sein de l'établissement en exploitant toutes les fonctionnalités de la roue cosmique. Ils ont ensuite exploité leurs mesures afin de répondre à la problématique qu'ils avaient choisie.



Derniers conseils de C. Tran avant les premières mesures dans la cour...

Leur démarche

Les muons cosmiques ne sont pas forcément des particules étudiées dans les programmes de lycée, mais il s'avère que cela est une expérience enrichissante pour nos élèves. Ces derniers avaient déjà été initiés aux particules du modèle standard lors de la participation à une conférence au Grand Rex à Paris en 2017. Ils avaient trouvé ce thème si passionnant que l'idée d'effectuer un scan de muons à différents endroits de l'établissement, dont les bâtiments datent de trois générations, est arrivée naturellement.

Bien évidemment, les élèves ont d'abord étudié le muon, et le principe de fonctionnement du cosmodétecteur. Pour les aider dans leur travail, Gérard Tristram, chercheur au CNRS et parrain de notre cosmodétecteur, est venu un mercredi après-midi dans l'établissement pour les initier aux rayons cosmiques et à l'utilisation du cosmodétecteur. À cette occasion, ils ont aussi découvert la mallette Cosmix, un autre détecteur à muons fonctionnant avec des barreaux de césum, apportée par un groupe d'élèves du lycée René Cassin à Arpajon. Ils ont pu réaliser des mesures simultanées et confronter ainsi les deux technologies.



Conférence de G. Tristam, IN2P3, CNRS.

Ils ont aussi cherché à comprendre l'utilité concrète des muons dans notre vie actuelle en se renseignant sur la mission ScanPyramids et sur le volcan de la Soufrière en Guadeloupe.

Lors des séances réservées au TPE, nos élèves ont d'abord réalisé une courbe de référence en allant sur le toit du lycée puis effectué des mesures en différents endroits de l'établissement pour établir des comparaisons avec l'expérience témoin et déterminer si la composition des bâtiments joue un rôle dans le nombre de muons qui nous parvient.

Le cosmodétecteur a permis aux élèves d'appliquer la démarche expérimentale et de se placer en position de chercheur. Ils ont utilisé un matériel scientifique développé par le CPPM (Centre de physique des particules de Marseille), dans le cadre du dispositif ministériel « Sciences à l'École ». Ils ont étoffé leurs connaissances en matière de physique des hautes énergies. Il s'est avéré très intéressant de travailler sur une machine que peu de personnes utilisent et de côtoyer une particule méconnue mais qui se révèle grandement utile dans notre vie quotidienne.

Pour la présentation du TPE, les élèves ont opté pour la rédaction d'une édition spéciale d'un magazine scientifique.



Mesures collaboratives organisées par Sciences à l'École en octobre 2017. Ces mesures ont contribué à l'élaboration d'un sujet de physique - chimie du baccalauréat S.



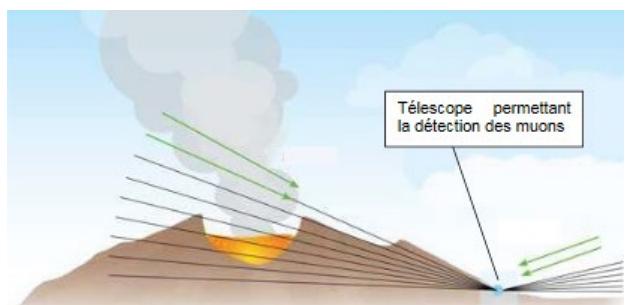
Appareil en fonctionnement.

Naissance d'une problématique

À travers leurs recherches sur les muons, les élèves ont découvert que ces particules pouvaient être

utilisées dans différents domaines d'investigation. Ils se sont particulièrement intéressés à la radiographie muonique pour explorer les volcans et à la tomographie muonique pour scanner des pyramides égyptiennes.

Le volcan de la Soufrière



Science in School, décembre 2013.

Depuis le début des années 2010, la tomographie muonique permet de renseigner précisément sur la densité de matière dans le volcan. En effet, cette technique se base sur l'absorption des muons par les roches à travers lesquelles ils sont passés. Plus la densité des roches est importante, plus les muons vont être absorbés. En confrontant le flux de muons ayant traversé le volcan au flux déterminé à ciel ouvert, les scientifiques peuvent connaître la quantité de matière que les muons ont traversée.

La radiographie muonique permet, par la même occasion, de déterminer la nature de la matière (aussi bien rocheuse que liquide ou encore gazeuse). Les chercheurs sont aussi capables de repérer une cavité et des zones fragilisées qui présentent un risque important pour la population. Le danger prépondérant n'est pas nécessairement une éruption volcanique mais un effondrement du volcan suite à une fragilité non détectée. Les chercheurs peuvent aussi étudier et observer les phénomènes qui ont lieu à l'intérieur des volcans. Ainsi, on sait grâce aux muons, que ce n'est pas moins d'un million de tonnes de fluide qui s'est déplacé dans le volcan durant l'été 2014.

Cependant, cette technique somme toute nouvelle ne permet pas de détecter et de prévenir d'une éruption volcanique imminente puisqu'il faudrait placer un capteur sous le volcan. À cela s'ajoute le fait qu'il faut presque 2 semaines de mesures pour obtenir la formation d'une image (il est donc à l'heure actuelle impossible par cette technique d'obtenir une image en temps réel) pour un volcan tel que la Soufrière qui ne fait pourtant qu'un kilomètre de large. Un volcan de plus grande envergure tel que l'Etna ou le Vésuve nécessiterait alors pas moins d'un an de mesures avec les matériaux actuels.

Khéops, une fabuleuse découverte

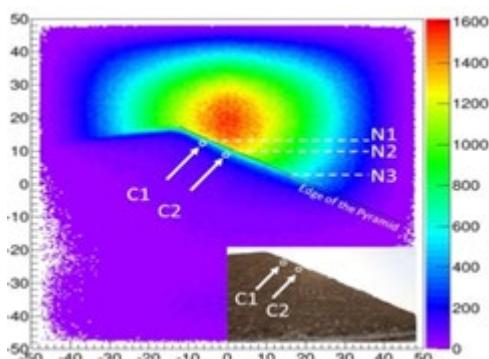
Mais ce n'est pas la seule utilité concrète des muons. En effet, depuis plus de 4 500 ans, la pyramide de Khéops, une des Sept Merveilles du monde, cachait en son sein une cavité d'une grandeur égale à celle d'un avion de près de 200 places ! Cette découverte du jeudi 2 novembre 2017, fruit des résultats obtenus par une équipe de scientifiques venant du monde entier (Français, Canadiens, Égyptiens et Japonais), est la plus grande découverte jamais effectuée depuis le Moyen Âge d'après un des directeurs du projet.

Le premier essai de détection des muons remonte en 1936 en Australie mais c'est au prix Nobel de physique américain, Luis Walter Alvarez, que l'on attribue le premier muogramme réalisé en 1970 sur d'autres pyramides telles que Khéphren.

La mission ScanPyramids, qui permet d'étudier les monuments de manière non invasive, a été lancée en octobre 2015. Les scientifiques ont observé le contraste entre les muons qui ont traversé l'objet étudié et ceux qui s'y sont arrêtés. Cette technique permet d'accéder à la densité des structures, voire de détecter du vide.



CEA Muon Telescope © CEA.



Muographie, image 2 D de la direction des muons détectés (octobre 2016). Rouge: moins de matière, moins d'absorption ; bleu : plus de matière, plus d'absorption.

Ainsi, comme le montre la muographie suivante, les scientifiques ont d'abord posé des plaques de détection au niveau N2 pour vérifier si les muons allaient mettre en évidence la cavité (C2) déjà connue. Les muons ayant révélé cette cavité, cette mesure témoin a validé la méthode. Après quoi, au niveau N1, les muons ont révélé une nouvelle

cavité (C1). Cette découverte confirme l'hypothèse de Jean-Pierre Houdin, architecte français, quant à l'existence de couloirs intérieurs derrière la façade de la pyramide servant à monter les blocs de pierre durant la construction de l'édifice.

À l'issue de leurs recherches, les élèves ont choisi d'étudier la variation des flux de muons selon l'endroit et la composition des bâtiments de leur lycée.

Matériel utilisé par les élèves

Principe de fonctionnement du cosmodétecteur



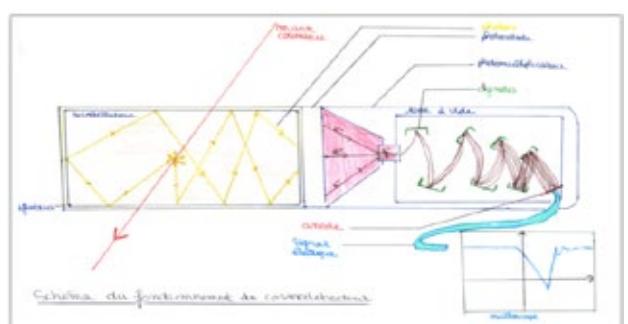
Cosmodétecteur en fonctionnement relié à l'ordinateur.

Crédit Sciences à l'École.

La roue cosmique est composée de quatre parties :

- 2 à 3 raquettes de scintillateurs qui détectent le passage éventuel des muons, en réagissant au passage d'une particule chargée en émettant un signal lumineux ;
- le photomultiplicateur associé à chaque raquette pour amplifier le signal détecté par le scintillateur ;
- la partie électronique pour le traitement des signaux ;
- et le logiciel installé sur un ordinateur portable.

La roue cosmique permet de détecter les particules chargées et particulièrement les muons lorsque ceux-ci traversent presque simultanément au moins deux scintillateurs.



Reproduction de Natasha Krakowiak.

Le scintillateur, constitué d'une matière organique de type plastique, émet de la lumière par fluorescence lors du passage d'une particule chargée.

Le signal lumineux est converti en signal électrique lorsque les photons issus du scintillateur parviennent à une photocathode et donnent naissance à des photoélectrons. Mais, ce courant électrique étant très faible et difficilement détectable, il doit être amplifié grâce à un photomultiplicateur. Le gain obtenu devient alors suffisamment important pour permettre la détection.

Conditions expérimentales

Les différents bâtiments étudiés sont de nature variée : certains, datant de la Révolution, ont des murs en brique. D'autres, ayant été bombardés pendant la Seconde Guerre mondiale ont été reconstruits en béton standard, dans les années 1950. Enfin, le bâtiment lycée, qui est sorti de terre en 2015, est composé de béton armé et de bois sur sa façade.

Les élèves ont positionné le cosmodétecteur à différents endroits de l'établissement : dans les caves, dans les laboratoires en rez-de-chaussée, dans une salle de classe au premier et au second étage du bâtiment, au CDI situé au troisième étage et sur le toit-terrasse du bâtiment lycée.

Pour chaque endroit de l'établissement, caractérisé par des couches de matériaux différents, les élèves ont mesuré le nombre de muons par minute pour une inclinaison déterminée de la roue cosmique. Ces mesures ont été reconduites plusieurs fois pour s'assurer de la reproductibilité des résultats. Dans cette étude, les conditions météorologiques pour les mesures en extérieur n'ont pas été prises en compte.

Résultats et analyse

Après une visite complète de l'établissement de la cave au plafond dans le sens propre du terme, nos jeunes élèves ont voulu exploiter cette source naturelle de muons qui vient de l'interaction du rayonnement cosmique avec la haute atmosphère. Ces particules sont très pénétrantes et se propagent en moyenne en ligne droite. Les élèves ont ainsi obtenu huit courbes différentes dont une enregistrée dans un environnement découvert sur le toit de l'établissement et qui servira de courbe de référence.

Notons que les couches de matériaux considérées sont celles de l'établissement. Par ailleurs, les muons ne traversent pas les mêmes couches de matière sur la totalité de la roue cosmique. De plus, les degrés utilisés dans les expériences ne sont pas les degrés des points cardinaux mais ceux choisis par nos

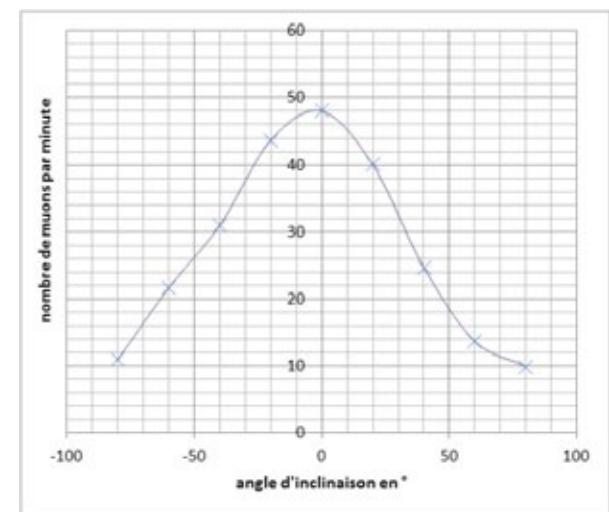
chercheurs. Si l'angle 0° correspond à la verticale, les mesures de 0 à -90° correspondent à une zone où il y a des habitations (vers le sud-est), les mesures comprises entre 0 et $+90^\circ$ correspondent à la colline de Guinette (vers le nord-ouest). Ainsi, nos élèves ont effectué leurs mesures de flux de muons pour un pas d'orientation de la machine de 20° . Pour des questions pratiques, lors des différentes acquisitions, le plan de rotation du cosmodétecteur a toujours été placé suivant la direction sud-est / nord-ouest.



Emplacements des différents lieux d'acquisition des mesures.

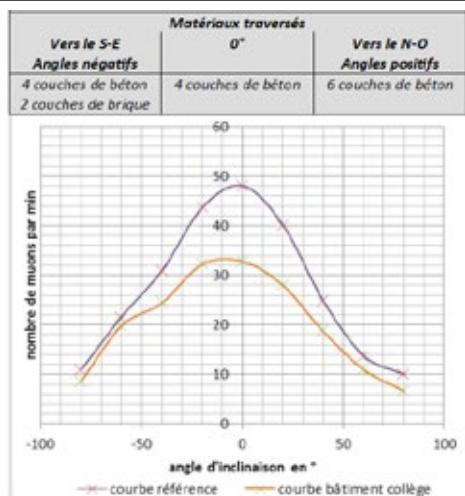
Les graphiques qui suivent montrent l'évolution du nombre de muons par minute en fonction de l'angle d'inclinaison du cosmodétecteur depuis différents lieux.

Mesure sur le toit, courbe de référence (1)

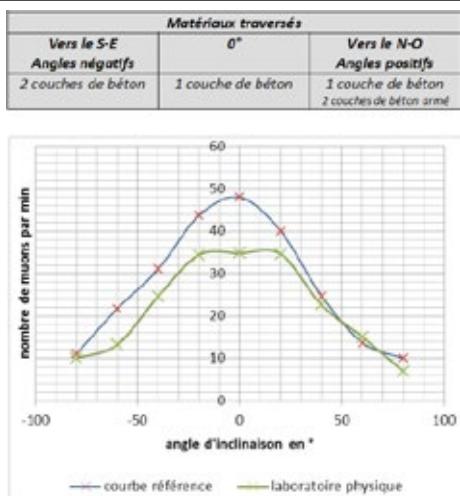


Ce graphique montre bien que le flux de muons est toujours maximal au zénith comme démontré par d'autres études. Il présente aussi une légère dissymétrie de part et d'autre de 0° , que l'on peut attribuer à la présence de la colline de Guinette qui surplombe la ville.

Au rez-de-chaussée, dans une classe de collège (2)

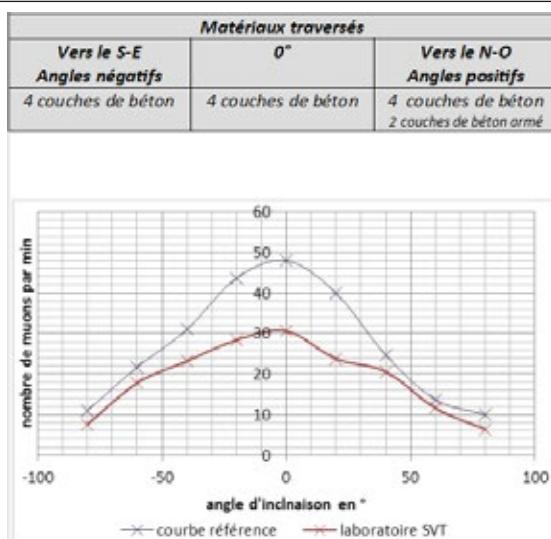


Au rez-de-chaussée, au laboratoire de physique (3)

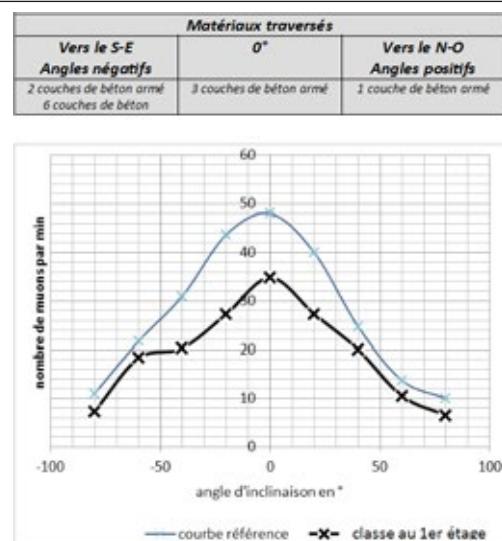


Le palier observé autour de 0° reflète la terrasse se trouvant au-dessus du laboratoire.

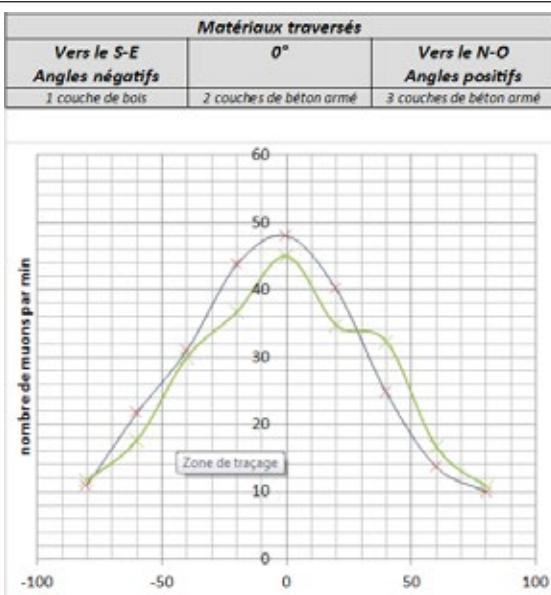
Au rez-de-chaussée, au laboratoire de SVT (4)



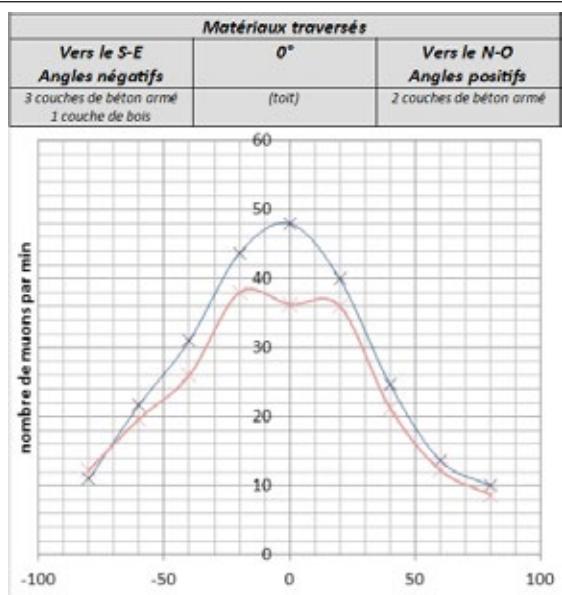
Au 1^{er} étage, dans le bâtiment lycée (5)



Au 2^e étage, dans le bâtiment lycée (6)



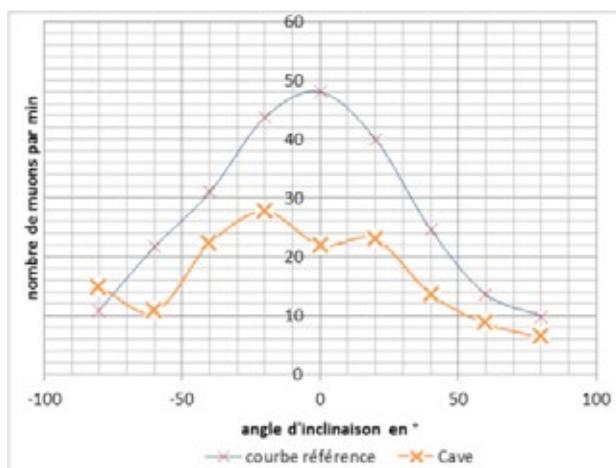
Au 3^e et dernier étage –CDI (7)



Au sous-sol (8)

Réalisée dans la cave, cette mesure sera la dernière expérience réalisée par nos jeunes élèves dans le cadre de cette étude.

Matériaux traversés		
Vers le S-E Angles négatifs (Fondations de l'établissement)	0° 5 couches de brique	Vers le N-O Angles positifs (Bitume de la route)



L'asymétrie observée aux alentours de -25° correspond à des mesures effectuées lorsque l'appareil visait une bouche d'aération donnant directement vers l'extérieur.

Remarque

Les élèves n'ont pas pris en compte les incertitudes. Celles-ci peuvent entacher les mesures effectuées. Toutefois, ce traitement n'était pas encore accessible pour des élèves de ce niveau scolaire.

Exploitation des résultats et réponse à la problématique

On observe dans un premier temps que le nombre de muons est toujours plus faible sur tous les graphiques par rapport à la courbe de référence, réalisée dans un environnement « sans » obstacle. Les mesures les plus faibles sont observées à la cave. Ainsi, plus il a de matière à traverser, plus le flux de muons diminue. Le nombre de couches de matériaux traversés semble donc avoir un impact sur le flux de muons. Il est alors intéressant de vérifier si le nombre de couches d'un même matériau ou si la nature des matériaux ont aussi une influence sur le flux de muons.

Ainsi, on constate que pour un même niveau, comme par exemple pour les trois mesures au rez-de-chaussée (figures 2, 3 et 4), plus le nombre de couches de

béton traversées est important, plus le flux de muons est faible. En comparant les mesures entre le 1^{er} et le 3^e étage (figures 5, 6 et 7), on observe que plus le nombre de couches de béton armé est important, plus le nombre de muons enregistrés est faible.

Il faut toutefois préciser que cette variation est plus significative lorsque l'observation est réalisée au zénith, région où le flux muonique est maximal. Ces observations tendent à montrer que le nombre de couches d'un même matériau a une influence sur le flux de muons.

Par ailleurs, en comparant le même nombre de couches de matériaux au zénith (figures 5 et 8), on constate que le flux de muons est beaucoup plus faible lorsqu'il traverse de la brique que du béton armé. Ce qui tendrait à prouver que la brique a un pouvoir absorbant plus important que le béton armé. Par contre, il semble difficile avec les seules courbes enregistrées de conclure sur le pouvoir absorbant des autres matériaux de l'établissement, à savoir, le béton et le bois.

Enfin, les formes particulières des figures 3 et 8 montrent que le cosmodéTECTeur est un bon outil pour obtenir une image fidèle de la topographie des lieux.

Pour conclure, cette étude réalisée sur des bâtiments en milieu urbain a permis de montrer que l'épaisseur de matière traversée et la nature des matériaux influence le flux de muons ce qui est en accord avec les études réalisées par les missions scientifiques actuelles.

Elle témoigne aussi de l'intérêt d'un matériel scientifique accessible pour des élèves de lycée, qui par ailleurs ont pu obtenir des résultats exploitables. Cela montre aussi que l'utilisation des muons permet d'explorer de façon non invasive la topographie d'un objet, tel qu'un bâtiment.

AVEC NOS ÉLÈVES

e-PÉRON : un laboratoire virtuel pour (re)découvrir la nature du rayonnement cosmique depuis les classes

Cyrille Baudouin, ex-coordonnateur d'e-PÉRON pour l'Institut de physique de l'Univers d'Aix-Marseille Université

Damien Dornic, responsable scientifique d'e-PÉRON, chargé de recherche CNRS au Centre de physique des particules de Marseille, dornic@cppm.in2p3.fr

Olivier Espagnet, coordination d'e-PÉRON au Pic du Midi, Service éducatif de l'Observatoire Midi-Pyrénées, olivier.espagnet@obs-mip.fr

Les auteurs proposent d'utiliser un laboratoire virtuel permettant de faire l'étude des rayons cosmique au sein des établissements scolaires en utilisant des valeurs scientifiques réelles enregistrées à l'Observatoire du Pic du Midi.

Comment sait-on que le rayonnement cosmique est constitué principalement de particules chargées ? Comment identifier l'existence de gerbes de particules ? Quelle est la nature des particules du rayonnement cosmique qui parviennent jusqu'au sol ? Se poser ces questions, c'est suivre le cheminement des physiciens du 20^e siècle qui se sont interrogés sur la nature du rayonnement cosmique. L'ambition de la Plateforme Éducative sur les Rayons cosmiques et les muONs est de fournir aux élèves de l'enseignement secondaire et de l'enseignement supérieur les outils pour répondre à ces questions. Grâce à une palette d'expériences installées à l'Observatoire du Pic du Midi et accessibles en ligne, il est possible de « re »découvrir la nature du rayonnement cosmique depuis les classes, en menant sa propre enquête grâce à des données scientifiques réelles !

De l'hypéron à e-PÉRON

Installée au Pic du Midi, la plateforme expérimentale e-PÉRON s'inscrit dans une histoire déjà riche. Dans les années 1930-1950, les physiciens cherchaient à caractériser la nature du rayonnement cosmique en installant des expériences en altitude, là où le flux de rayonnement cosmique est plus important. Leurs expériences utilisaient notamment les énergies produites par le rayonnement cosmique pour sonder les tréfonds de la matière et de nombreuses particules furent découvertes de cette manière : positron, muon, kaon. À 2 877 m d'altitude, avec 4 fois plus de flux de rayonnement cosmique qu'au niveau de la mer, le Pic du Midi devint ainsi un lieu d'étude privilégié par les cosmiciens. Des physiciens prestigieux s'y

succédèrent, comme Patrick Blackett, Cecil Powell, Pierre Auger ou Giuseppe Occhialini. Une nouvelle particule composite y fut découverte en 1949 : l'hypéron... comme e-PÉRON !

Bien qu'entièrement dédié à des objectifs pédagogiques, e- PÉRON constitue un trait d'union entre l'aventure de ces cosmiciens et les recherches actuelles. Initié dans le cadre du Labex OCEVU, e-PÉRON est en effet porté par des laboratoires de recherche travaillant sur la problématique toujours très actuelle de la recherche des sources du rayonnement cosmique (Centre de physique des particules de Marseille / CPPM, Institut de recherche en astrophysique et planétologie / IRAP, Observatoire Midi-Pyrénées / OMP) en partenariat avec le Syndicat mixte pour la valorisation du Pic du Midi et le dispositif ministériel Sciences à l'école. L'objectif initial du projet était de fournir des données de qualité « recherche » pour former les étudiants en licence et de master au traitement et à l'analyse de données réelles sur cette thématique. Mais l'idée de rendre accessible ces données à des publics de lycées sous une forme adaptée a rapidement émergé.

Laboratoire virtuel

La plateforme expérimentale d'e-PÉRON consiste en un réseau de détecteurs de rayons cosmiques installés à l'Observatoire du Pic du Midi. La disposition et la forme de ces détecteurs sont adaptées à chacune des expériences, mais ils sont tous conçus selon le même principe : un scintillateur (plastique ou liquide) est couplé à un photomultiplicateur pour détecter le passage de particules chargées (muons,

électrons) issues des gerbes de particules atmosphériques provoquées elles-mêmes par la collision des rayons cosmiques avec les noyaux atomiques des constituants atmosphériques (azote et oxygène) figure 1.

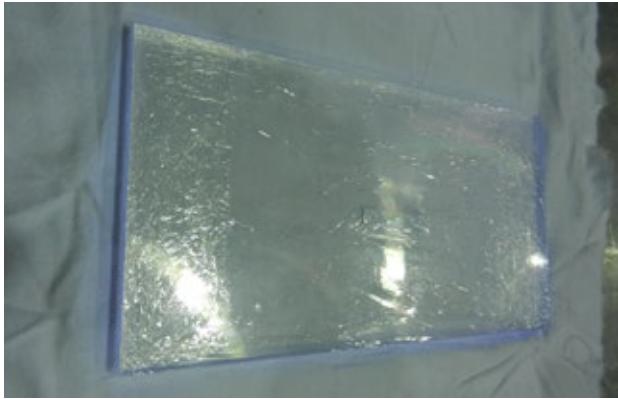


Fig.1. Scintillateur plastique utilisé sur les expériences d-e-PÉRON pour détecter le passage de particules chargées. Selon les expériences, il peut être rectangulaire ou cylindrique.

Le principe de détection est basé sur le fait que lorsqu'une particule chargée dépose une partie de son énergie dans le scintillateur, celui-ci la restitue par scintillation sous forme de photons. Ces derniers sont détectés par un photomultiplicateur qui les convertit en électron et donc en courant électrique. Le comptage des signaux de chaque détecteur se fait alors par une carte d'acquisition QuarkNet pilotée par un Raspberry Pi (figures 2 et 3).



Fig.2. Détecteurs en cours de montage : ici on voit les photomultiplicateurs disposés sur les scintillateurs.

L'intégralité des données recueillies par les expériences sont stockées dans une base de données. Par l'intermédiaire du site internet, les utilisateurs ont ainsi accès à l'expérience de leur choix, et peuvent sélectionner l'intervalle de temps qui les intéresse. De plus, un accès par niveau d'utilisateur est proposé : un niveau de traitement avancé et une visualisation des données (enseignement secondaire),

l'accès aux données brutes non traitées (enseignement universitaire).

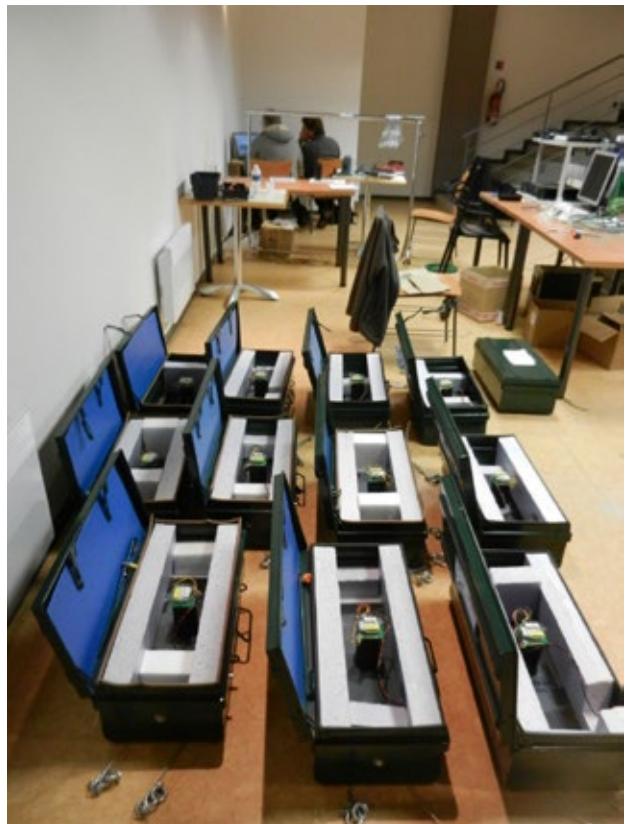


Fig.3. Fin du montage : les scintillateurs sont disposés dans des caisses. Ici, il s'agit des détecteurs utilisés dans l'expérience à la Auger comptant un réseau de 12 détecteurs.

Les expériences

Depuis 2015, les expériences d-e-PÉRON collectent des données en continu. Il y a d'une part les reproductions d'expériences historiques qui ont permis de caractériser la nature du rayonnement cosmique :

- « effet est / ouest » : influence du champ géomagnétique et mesure de la charge des rayons cosmiques ;
- « expérience à la Auger » : distribution latérale des gerbes et estimation de leur énergie ;
- « expérience à la Rossi » : mise en évidence des gerbes de particules ;
- « télescope à muons » : mesure de la distribution angulaire du rayonnement cosmique, tomographie muonique ;
- « expérience vie moyenne du muon » : mesure de la durée de vie moyenne du muon, effets relativistes.

D'autre part, une expérience de physique des particules (bien connue des enseignants du secondaire) permet d'étudier les muons et d'aborder les notions de relativité restreinte.

Enfin, les utilisateurs ont également accès à un ensemble de données pouvant affecter les mesures du rayonnement cosmique en lien étroit avec l'environnement du Pic du Midi et les activités de recherches qui y sont menées : l'activité solaire (en lien avec le coronographe CLIMSO), les données atmosphériques du laboratoire d'aérologie, les effets du radon.

Intéressons-nous ici plus particulièrement à deux expériences historiques exploitables dans l'enseignement secondaire (« effet est/ouest » et « expérience à la Rossi »), ainsi qu'à un dispositif expérimental original (« télescope à muons »).

« Effet est/ouest »

L'objectif de cette expérience est de tester l'existence d'une asymétrie entre les flux de rayons cosmiques provenant de l'est et ceux provenant de l'ouest. Une telle asymétrie doit révéler deux aspects de la nature du rayonnement cosmique :

- le fait que le rayonnement cosmique est influencé par le champ magnétique terrestre et donc qu'il est constitué majoritairement de particules chargées ;
- le sens de l'asymétrie indique le signe de la charge des rayons cosmiques (un taux plus élevé venant de l'ouest est compatible avec des particules majoritairement de charges positives).

Historiquement, en 1932 - 1933, plusieurs expériences sont parvenues à mettre en évidence l'effet est/ouest à des latitudes censées permettre de le mesurer sans ambiguïté : Thomas Johnson et Jabez Street (à Washington puis à Mexico) ; Arthur Compton et Luis Alvarez (à Mexico) ; Bruno Rossi (en Érythrée). Leurs résultats montraient un excès de rayonnement venant de l'ouest et étaient donc compatibles avec un rayonnement cosmique composé majoritairement de particules chargées positivement.

Ici au Pic du Midi, l'objectif est de mesurer directement le flux de muons cosmiques (ceux produits dans les gerbes atmosphériques) provenant respectivement de l'est et ceux provenant de l'ouest avec deux paires de détecteurs en coïncidence. Les 4 détecteurs cylindriques (scintillateurs) sont disposés par couple de 2 tubes : tube 1 / tube 2 et tube 3 / tube 4. L'objectif est de détecter les coïncidences au sein de chaque couple dans une direction fixe donnée (azimut + inclinaison) : le couple T1/T2 regarde vers l'est avec une inclinaison d'environ 53° par rapport au plan horizontal, le couple T3/T4 regarde vers l'ouest avec une inclinaison d'environ 53° par rapport au plan horizontal. Les directions des détecteurs sont fixes, à la fois en azimut, et en inclinaison (figure 4).

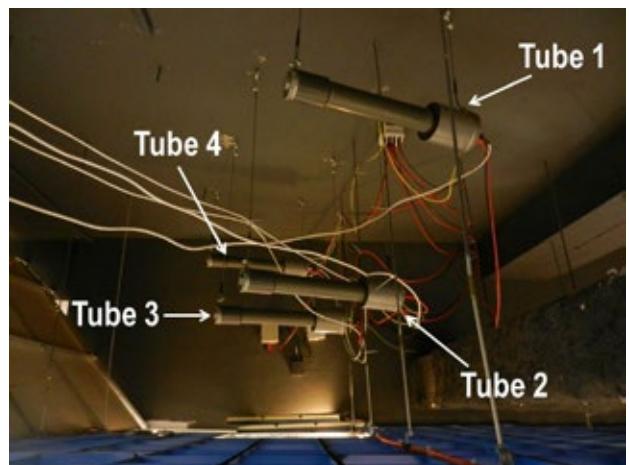


Fig.4. Disposition des détecteurs dans l'expérience « Effet est/ouest ».

Une coïncidence détectée entre les tubes 3 et 4 signifie que le muon détecté provient de l'ouest et que la gerbe qui l'a généré (et donc le rayon cosmique) vient globalement de l'ouest. Pour une coïncidence entre les tubes 1 et 2, le rayon cosmique provient globalement de l'est. On considère qu'il y a une coïncidence entre 2 tubes lorsque les signaux sont quasiment simultanés (durée < 100 ns), ce qui signifie alors que chaque détection est due à la même particule.

Ces coïncidences sont à analyser a posteriori car tous les signaux des détecteurs individuels, qu'il y ait coïncidence ou non, sont stockés dans une base de données. Les utilisateurs de l'enseignement secondaire ont accès à des données déjà traitées. Pour la période sélectionnée, ils peuvent ainsi visualiser directement les taux de coïncidence (ou les nombres d'événements) pour chacun des 4 couples de détecteurs et ainsi observer une différence notable entre le flux provenant de l'ouest et celui provenant de l'est (cf courbe figure 5).

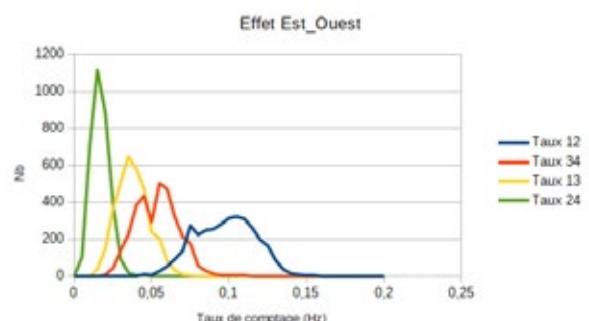


Fig.5. Taux de coïncidences entre les différents couples de tubes dans l'expérience « Effet est/ouest ». On voit que le flux provenant de l'ouest (taux 12) est plus important que le flux provenant de l'est (taux 34).

« Expérience à la Rossi »

L'objectif de cette expérience est de caractériser la nature du rayonnement cosmique en étudiant son interaction avec la matière. Plus précisément, il s'agit d'identifier l'existence de cascade de particules produites lors de cette interaction.

Lorsqu'une particule chargée possède suffisamment d'énergie, son interaction avec la matière va produire la création de nouvelles particules dans lesquelles l'énergie initiale est transférée. Si elles ont suffisamment d'énergie, ces particules secondaires vont à leur tour produire de nouvelles particules en interagissant elles aussi avec la matière selon le même processus. Une cascade de particules se développe donc jusqu'à ce que l'énergie de chaque particule ne soit plus suffisante pour engendrer de nouvelles particules. Ce phénomène de gerbes de particules est observable par exemple sur la photo ci-dessous (figure 6) lors de l'interaction d'un rayon cosmique secondaire avec une superposition de plaques de plomb.

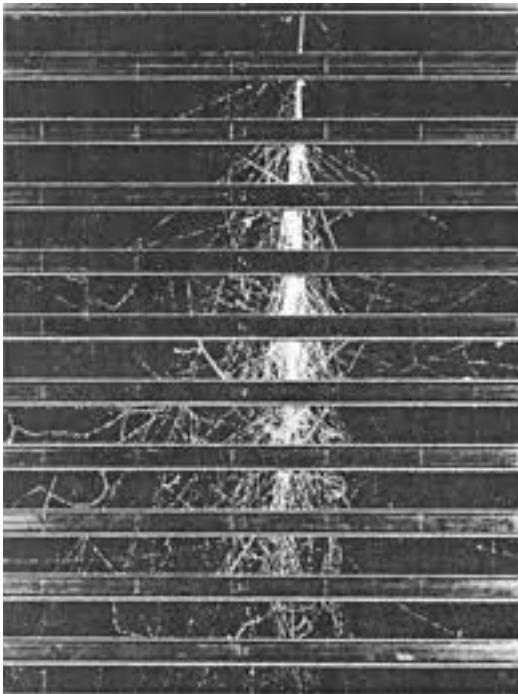


Fig.6. Chambre à brouillard vue par la tranche : on y distingue le développement d'une gerbe de particules initiée par le rayonnement cosmique, et se développant au cours de la traversée successive de plaques de plomb.

Pour identifier l'existence d'une gerbe de particules, on peut donc imaginer « sonder » le flux de particules produites à chaque étage dans une section donnée, par exemple dans l'axe de propagation de la cascade. Un tel sondage verrait d'abord une augmentation du flux de particules, puis une lente diminution.

Le dispositif choisi est une reproduction de l'expérience historique réalisée par Bruno Rossi dans les années 1930. Il s'agit d'une véritable expérience de physique des particules : on observe le produit du bombardement d'une cible par une source inconnue dont on cherche à déterminer la nature.

La source est « naturelle » puisqu'il s'agit d'une particule du rayonnement cosmique secondaire (produit de l'interaction du rayonnement cosmique primaire avec l'atmosphère).

La cible est constituée de couches de plomb dont l'épaisseur varie au cours du temps.

La détection des gerbes de particules est faite avec 3 détecteurs individuels disposés en « pyramide » (figure 7).

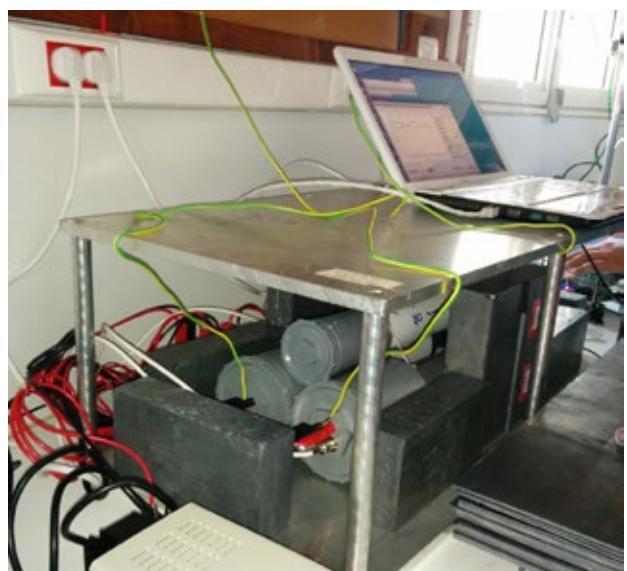


Fig.7. Disposition des détecteurs dans l'expérience à la Rossi pour mesurer les triples coïncidences.

Avec une telle configuration, une triple coïncidence ne peut pas être provoquée par une particule unique, mais bien par le passage simultané de 2 particules. Cette simultanéité ne peut être provoquée que par un seul événement à l'origine des 2 particules, soit un « échantillon » de la cascade de particules. Le fait de faire varier la quantité de plomb, revient à aller sonder la cascade de particules évoquées plus haut à différentes hauteurs.

Là aussi, les coïncidences sont analysées a posteriori. Les utilisateurs de l'enseignement secondaire accèdent à un jeu de données déjà traitées et ils peuvent directement visualiser l'évolution du taux de triple coïncidence en fonction du temps ou en fonction de l'épaisseur de plomb (figure 8).

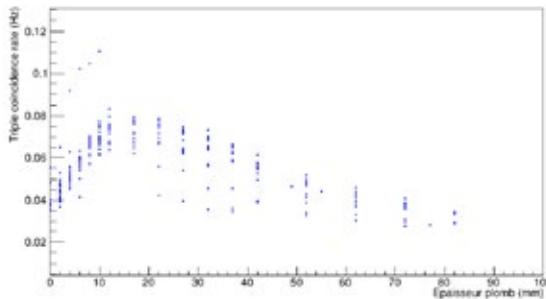


Fig.8. Courbe dite de « transition de Rossi ». On voit le flux augmenter rapidement avant de s'atténuer progressivement. Chaque courbe correspond à un cycle d'ajout et de retrait des plaques de plomb, ici sur une période de 2015 à 2020.

« Télescope à muons »

Comme son nom l'indique, ce dispositif a l'apparence d'un télescope optique mais au lieu de collecter des photons, il détecte des muons. Disposé sur une monture de télescope classique (de type C14), il est constitué de deux disques scintillateurs de 30 cm et espacés de 65 cm, tous deux équipés d'un photomultiplicateur. Lorsqu'une particule chargée (muon) passe à travers le scintillateur, un photon est émis, collecté puis amplifié par un photomultiplicateur, et le signal est transmis à la carte d'acquisition qui effectue ainsi le comptage des muons. Lorsqu'un signal est détecté quasi simultanément ($\Delta t \leq 100$ ns) dans les deux scintillateurs, alors on considère qu'il s'agit d'un seul muon et il est comptabilisé. Une interface informatique permet de visualiser les mesures effectuées dans la direction choisie et dans l'intervalle de temps sélectionné (figure 9).



Fig.9. Le télescope à muons est constitué de 2 scintillateurs circulaires chacun équipés d'un photomultiplicateur (embouts ronds visibles sur la photo). Cet instrument est relié à un PC et détecte le passage de particules chargées (muons, électrons, particules alpha).

Ce télescope à muons est transportable. Pour l'instant, il est alternativement installé au CPPM ou au Pic du Midi. Il a été conçu pour réaliser des activités pratiques dans le cadre des licences ou masters des universités de Toulouse ou d'Aix-Marseille, mais il peut également être utilisé lors de visites de publics scolaires au Pic du Midi pour visualiser ce qu'est le rayonnement cosmique.

Plusieurs types de mesures peuvent être réalisées avec le télescope à muons :

- un scan de la voûte céleste afin d'observer d'éventuelles différences de flux de rayonnement cosmique en fonction de l'azimut et de la hauteur dans le ciel ;
- la tomographie d'une montagne ou d'une construction humaine.

Exploitation pédagogique

Des données, rien que des données

L'étude du rayonnement cosmique implique de nombreuses problématiques et thématiques scientifiques : le milieu interstellaire, les objets astrophysiques, les constituants de la matière, le champ magnétique terrestre, l'atmosphère, la démarche scientifique, l'instrumentation, l'étude statistique de données. De plus, le rayonnement cosmique possède la particularité d'être disponible partout (ou presque) à la surface de la Terre puisqu'il nous bombarde en permanence et son origine constitue toujours une problématique scientifique d'actualité. Pour toutes ces raisons (et bien d'autres), son étude dans un contexte pédagogique suscite un vif intérêt de la part de nombreux enseignants du secondaire depuis quelques années.

Cependant, la conception et la conduite d'expériences sur le rayonnement cosmique directement en classe peut faire face à de nombreux obstacles : l'achat et l'installation du matériel nécessaire à l'expérimentation, la compétence nécessaire à l'analyse des données, les longues périodes d'acquisition nécessaires à l'obtention de résultats significatifs.

Or l'investissement (en temps, en compétences, financier) nécessaire à la bonne conduite du projet en regard du temps à y consacrer réellement en classe, n'est pas nécessairement considéré comme rentable par un grand nombre d'enseignants. L'objectif de la plateforme expérimentale d'e-PÉRON est de lever une partie de ces obstacles en permettant au plus grand nombre d'accéder à des données réelles sans instrumentation spécifique (autre que des ordinateurs

et une connexion internet) et/ou de venir en complément d'instruments déjà existants (comme le cosmo-détecteur du programme *Cosmos à l'École*) pour les utilisateurs les plus expérimentés.

Ainsi, depuis le site web d'e-PÉRON, les utilisateurs accèdent à l'ensemble des ressources leur permettant d'exploiter les expériences : description du protocole expérimental, remise en contexte historique de l'expérience, visualisation des données sous forme de courbes directement exploitables (figure 10).

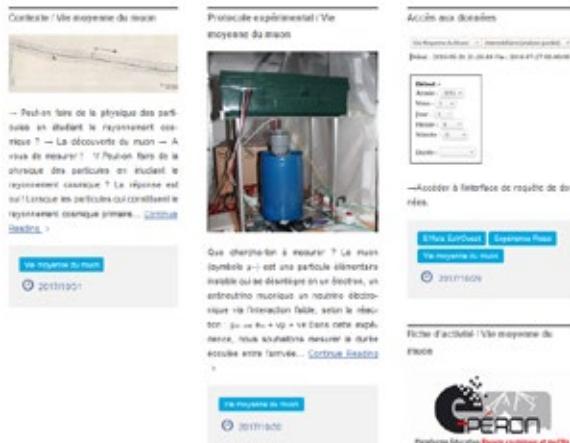


Fig.10. Sur le site web d'e-PERON, l'utilisateur a l'accès à des ressources pédagogiques pour l'aider à exploiter les expériences. Pour chaque expérience, un filtre permet d'accéder facilement aux ressources d'une même expérience (ici pour « la vie moyenne du muon »).

Pistes d'exploitation

Plusieurs modalités d'exploitation pédagogique peuvent être envisagées selon le temps que l'enseignant souhaite consacrer à cette activité. Le fait de s'affranchir des contraintes techniques liées au matériel expérimental offre ainsi un large éventail de possibilités depuis un temps court (2 h) jusqu'à des durées plus longues sur des projets exploratoires, sous forme d'activités dirigées ou plus libres.

Citons par exemple :

- la réalisation d'une activité « clé en main » en 2 h disponible grâce à une fiche de TP (expérience « vie moyenne du muon ») ;
- la réalisation d'activités complémentaires d'une « manip » réalisée en classe (cosmo-détecteur, chambre à brouillard, ballon sonde...) ; les données e-PÉRON permettent alors d'avoir des données stables sur des longues périodes de temps et de se concentrer sur l'analyse des données ;
- la réalisation d'activités complémentaires d'une visite (musée, Pic du Midi...) ou d'une intervention

d'un chercheur sur la thématique du rayonnement cosmique ou d'un sujet connexe (radioactivité par exemple) ;

- des projets de groupe plus exploratoires...

En guise de conclusion mais également d'ouverture, rappelons que l'exploitation pédagogique d'e-PÉRON dans l'enseignement secondaire reste largement à construire et à inventer. Car même si nous bénéficions de l'expérience acquise par le dispositif « *Cosmos à l'école* », e-PÉRON a la particularité de mettre à disposition des quantités de données sans les contraintes techniques et instrumentales.

Cela offre bien sûr la possibilité d'étudier le rayonnement cosmique pour lui-même en tant que phénomène physique présent dans notre environnement, mais cela offre aussi la possibilité de construire des projets plus interdisciplinaires dans lesquels le rayonnement cosmique n'est qu'un élément. En effet, le rayonnement cosmique a la particularité de « traverser » de nombreuses thématiques scientifiques et d'être aujourd'hui à la source de plusieurs applications ou enjeux de société.

En voici quelques exemples :

- en astrophysique, la problématique actuelle de recherche des sources du rayonnement cosmique de très haute énergie ;
- en sciences de la planète, la datation des roches en géomorphologie grâce aux cosmo-nucléides, l'étude de l'influence du rayonnement cosmique sur la formation des nuages et le changement climatique, la formation des éclairs lors des phénomènes orageux... ;
- le rayonnement cosmique utilisé comme sonde : production d'images des chambres magmatiques de volcans ou de l'intérieur d'un cœur de centrale nucléaire, ou encore en nivologie (mesure de la quantité de neige dans des régions de montagne) ;
- l'impact du rayonnement cosmique sur les activités humaines : santé pour les personnels navigants, effets sur les composants électroniques, impact sur les vols spatiaux habités... ■

AVEC NOS ÉLÈVES

Comment bénéficier du prêt d'un détecteur/compteur de muons ?

Jean-Michel Vienney

Tout savoir sur la manière d'acquérir un dispositif pour étudier les muons cosmiques et sur les principales manipulations que l'on peut réaliser.

Pour ceux qui souhaitent mettre en œuvre un détecteur de muons cosmiques, que ce soit dans le cadre du projet d'un groupe d'élèves, pour illustrer un cours à propos de la détection des muons, ou comme illustration dans une exposition, il existe au moins deux possibilités :

- la roue cosmique du dispositif ministériel « Cosmos à l'École » ;
- la mallette Cosmix mise au point par le CENBG (Centre d'études nucléaires de Bordeaux-Gradignan).

Et en marge, un projet de « science collaborative » baptisé « Open Radiation ».

Cosmos à l'École¹

Le cosmodétecteur est un détecteur de muons cosmiques constitué de 4 parties :

- les raquettes de scintillateurs qui détectent le passage éventuel de muons ;
- des photomultiplicateurs qui amplifient le signal détecté par chaque scintillateur ;
- des circuits électroniques destinés à mettre en forme, numériser et discriminer les signaux en fonction de leur niveau ;
- un logiciel permettant de les enregistrer et les exploiter.

Le choix du scintillateur est basé sur la quantité d'énergie nécessaire pour créer un photon (elle ne doit pas être trop élevée pour pouvoir détecter les muons), le spectre d'émission des photons (celui-ci doit être compatible avec le photomultiplicateur), le temps de décroissance de la scintillation (il doit être le plus court possible pour éviter un temps mort trop long), le pouvoir d'absorption des rayonnements (selon que l'on souhaite arrêter le muon pour la mesure du temps de vie ou qu'on veut juste le détecter).

Le fait de disposer de plusieurs raquettes permet notamment, en détectant les coïncidences (événements pratiquement simultanés), de savoir si un même muon a traversé un ou plusieurs détecteurs. On peut ainsi

remonter à leur distribution spatiale en fonction de la distance zénithale.

Ces détecteurs sont mis à disposition des enseignants et élèves (collèges, lycées et classes préparatoires), quelle que soit la voie (générale, technologique, professionnelle) sélectionnés sur appel à projet en 2009, 2012, 2014 et 2017 et qui ont suivi un stage de formation. L'ensemble de ces établissements (44 en 2020, répartis sur toutes les académies) constitue le réseau « Cosmos à l'école ».

Sur le site de l'opération « cosmos à l'école », on peut télécharger un cahier pédagogique² très détaillé, et on trouve une carte du réseau³ donnant la répartition actuelle des détecteurs.

Il est en principe possible à tout établissement de solliciter le prêt d'un cosmodétecteur en s'adressant à un des établissements du réseau, moyennant l'établissement d'une convention de prêt.



La mallette Cosmix du CENBG⁴

Moins sophistiquée et beaucoup plus facile à mettre en œuvre que le cosmodétecteur, cette mallette a été conçue à partir du recyclage des barreaux de scintillateurs d'iodure de césum (CsI) et les photodiodes utilisées pour les tests préliminaires au lancement du télescope FERMI lancé par la NASA en 2008.

Les détecteurs proprement dits sont deux barreaux parallélépipédiques (16 cm × 2 cm × 3 cm), chacun

² <http://www.sciencesalecole.org/plan-cosmos-a-lecole-ressources-pedagogiques-ressources-scientifiques/>

³ <http://www.sciencesalecole.org/plan-cosmos-a-lecole-reseau/>

⁴ <https://www.cenbg.in2p3.fr/COSMIX-presentation-du-Detecteur>

¹ <http://www.sciencesalecole.org/plan-cosmos-a-lecole-presentation/>

associé à une photodiode au silicium. Le passage d'un muon dans le détecteur se traduit par une impulsion électrique qui après amplification et mise en forme peut, si on le désire, être visualisée sur l'écran d'un oscilloscope.

Le comptage et la datation précise des impulsions recueillies sont assurés par un microcontrôleur Arduino (récemment introduit dans les programmes de physique du lycée) associé à un récepteur GPS et un capteur barométrique (pour l'altitude). Ces événements sont enregistrés dans un fichier texte (csv) sur une carte SD et peuvent être récupérés pour analyse. On peut aussi se contenter d'afficher au fur et à mesure le nombre d'impulsions émises par chaque détecteur, et le nombre de celles qui ont été en coïncidence temporelle (quasi-simultanément).

L'utilisation la plus simple consiste à effectuer des comptages de durées égales, en disposant les barreaux l'un à côté de l'autre, puis l'un au-dessus de l'autre. On a ainsi accès au nombre moyen de particules (essentiellement des muons) qui ont été vues par chaque détecteur pendant la durée du comptage, ce qui permet de mettre en évidence à la fois le caractère aléatoire de leur arrivée, mais aussi de montrer que la plupart ont une direction sensiblement verticale. En effet, lorsque les barreaux sont juxtaposés, on n'observe que très peu de coïncidences alors qu'elles sont beaucoup plus nombreuses (40 % des événements) lorsque les barreaux sont superposés.

Mais le fait de disposer du GPS et du capteur barométrique permet d'imaginer des expériences beaucoup plus sophistiquées, comme par exemple comparer le flux de muons pour différentes altitudes, positions géographiques, dates, au sol ou sous terre... Ce type de manipulations est d'autant plus facilement réalisable que la mallette est très facilement transportable, et qu'elle se contente d'une alimentation électrique très réduite (la prise USB d'un ordinateur ou d'un chargeur de téléphone). Ces possibilités ont inspiré plusieurs groupes de jeunes, notamment pour des TPE et des projets présentés aux Olympiades de physique⁵.

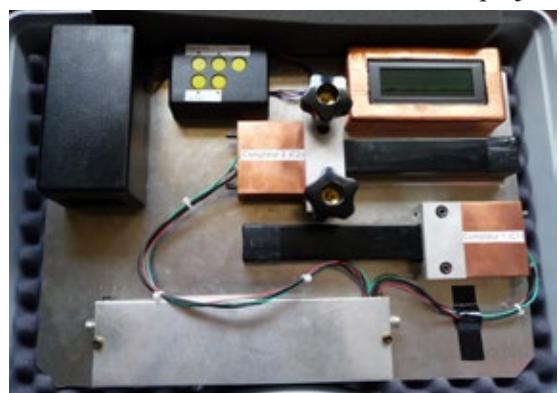
Sur le site du CENBG on trouve une notice détaillée (cf. note 4), une vidéo de présentation⁶ expliquant

5 https://odpf.org/images/archives_docs/24eme/memoires/EquipeY/memoire.pdf
https://odpf.org/images/archives_docs/26eme/memoires/EquipeE/memoire.pdf
https://odpf.org/images/archives_docs/23eme/memoires/EquipeT/memoire.pdf
https://odpf.org/images/archives_docs/23eme/memoires/EquipeT/memoire.pdf

6 https://www.cenbg.in2p3.fr/IMG/mp4/mde_2_2.mp4

le comptage de base, un programme⁷ permettant d'afficher les compteurs sur un ordinateur (pour projection en classe), et quelques exemples d'utilisation.

Au gré des dotations, cette mallette a été reproduite en une cinquantaine d'exemplaires. Une partie (une dizaine) a été distribuée dans des établissements de la région Aquitaine, une autre (3 par académie) en Île-de-France avec dans chaque cas un enseignant responsable par établissement, le reste étant distribué entre des laboratoires (IN2P3...) ou des établissements d'enseignement (universités, grandes écoles...). Contrairement au dispositif Cosmos à l'école, il n'y a pas de coordination nationale institutionnalisée, mais des mallettes sont régulièrement prêtées aux établissements qui en font la demande. Le mieux est dans ce cas de s'adresser aux initiateurs de ce projet⁸.



Le projet Open Radiation⁹

Initié par l'IFFO-RME (Institut français des formateurs aux risques majeurs et à l'environnement), l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire), Planète-Sciences et Sorbonne Université, ce projet consiste à mutualiser les mesures de radioactivité effectuées par « tout un chacun » en utilisant un capteur « bon marché » (une centaine d'euros tout de même) relié à un smartphone qu'il est éventuellement possible de se procurer en kit.

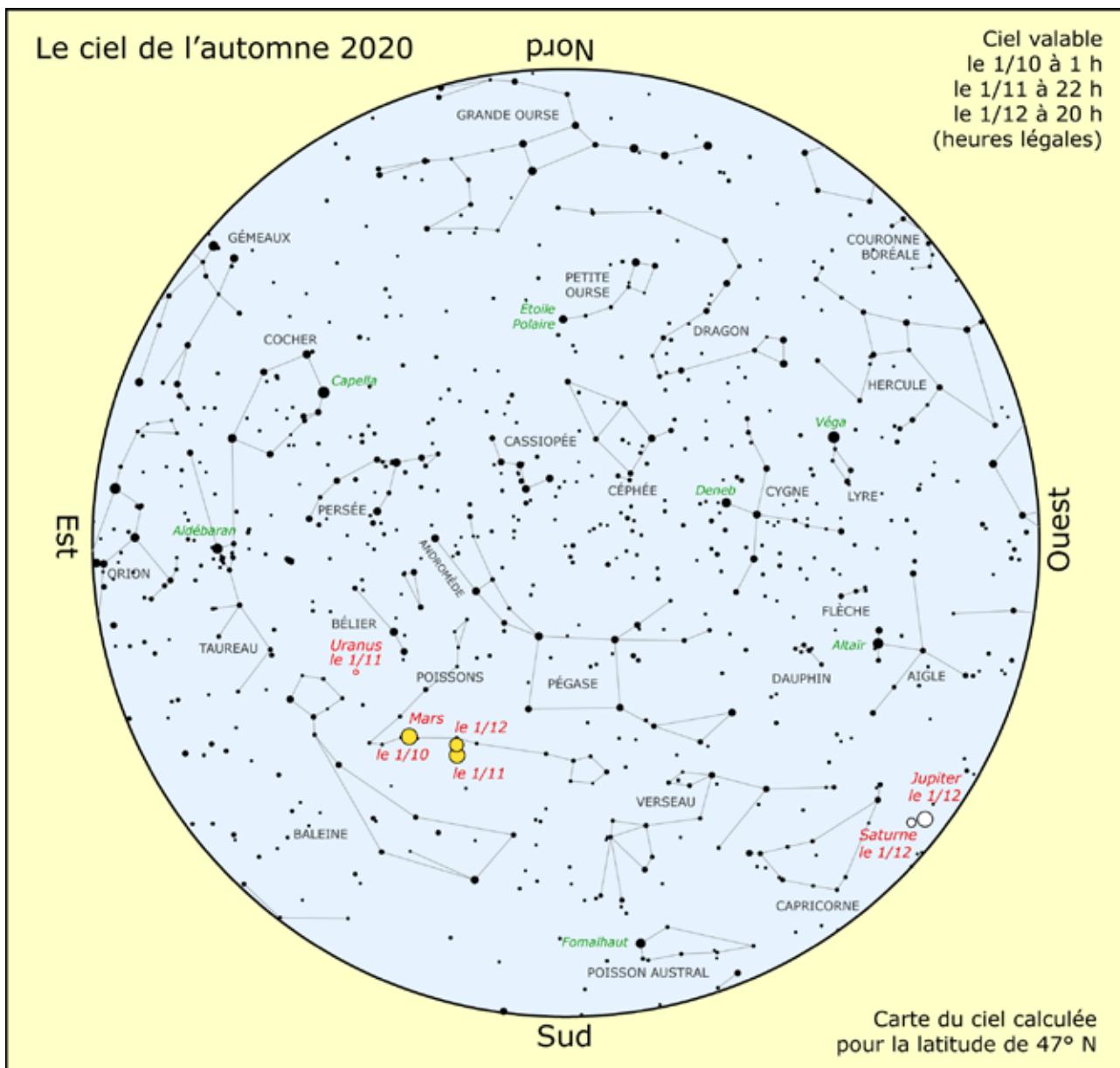
Ce projet s'intéresse à toutes les sources de rayonnement, naturel, artificiel, tellurique, mais aussi cosmique. Il propose entre autres de recueillir et mutualiser les mesures effectuées en altitude lors de voyages en avion, et de mettre en évidence des variations en fonction de l'altitude, de la latitude, et de l'activité solaire. ■

7 <https://www.cenbg.in2p3.fr/COSMIX-Compter-les-muons-avec>

8 Benoit Lott, cosmix@cenbg.in2p3.fr

9 <https://www.openradiation.org/fr>

OBSERVATION



Visibilité des planètes

Mercure peut être aperçue le matin début novembre à l'horizon ESE (élongation maximale le 10/11).

Vénus est encore visible le matin tout l'automne côté est.

Mars est la planète à observer ces mois-ci. Elle sera au plus près de la Terre début octobre, visible dès le début de nuit, plus lumineuse que Jupiter. Avec un diamètre apparent de plus de 22' et passant à 50° au-dessus de l'horizon sud, toutes les conditions sont remplies pour de belles observations de cette petite planète.

On peut encore voir **Jupiter** et **Saturne** le soir. On pourra suivre leur rapprochement en décembre.

Uranus pourra aussi être recherchée dans le Bélier (opposition le 31 octobre).

Quelques événements (heures légales)

22/09 : équinoxe d'automne à 15 h 30 min.

8/10 : maximum des Draconides (étoiles filantes).

25/10 : passage à l'heure d'hiver.

17/11 : maximum des Léonides (étoiles filantes).

19/11 : rapprochement Lune Jupiter Saturne.

14/12 : maximum des Géminides (étoiles filantes).

14/12 : éclipse totale de Soleil (Amérique du Sud).

21/12 : conjonction serrée Jupiter Saturne (à 6' !). À observer peu après le coucher du Soleil au sud-ouest.

21/12 : solstice d'hiver à 11 h 02 min.

Lune

Pleine Lune : les 1/10, 31/10, 30/11.

Nouvelle Lune : les 16/10, 15/11, 14/12.

Quadrant des sinus et déclinaison du Soleil

David Alberto, professeur de physique-chimie, Le Havre

Le quadrant des sinus est un instrument mathématique ancien permettant de lire directement des valeurs approchées du cosinus et du sinus d'un angle entre 0 et 90°. Comme son nom l'indique, il a la forme d'un quart de cercle ; il est parfois muni d'un système de visée des astres (mesure de hauteur) et d'un fil à plomb. Ce type d'instrument était utilisé par les astronomes arabes dès le 9^e siècle. Cet article explique comment le quadrant des sinus permet de déterminer la valeur de la déclinaison du Soleil, à une date choisie. La détermination ne se fait pas par mesure, mais par une sorte d'abaque.

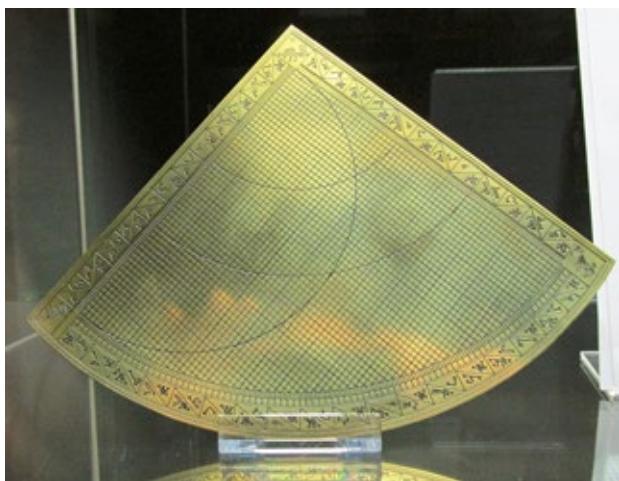


Fig.1. Quadrant des sinus, musée d'histoire des sciences d'Istanbul (image brewbooks/wikimedia).

Principe de la lecture des sinus et cosinus

Le quadrant porte deux séries de graduations sur les bords droits, allant de 0 à 60. Le bord courbé est gradué en degrés. Le quadrillage est parcouru de deux demi-cercles et d'un petit quart de cercle centré sur l'origine des graduations droites (voir figure 2). Un fil fixé au coin de l'instrument sert de repère mobile.

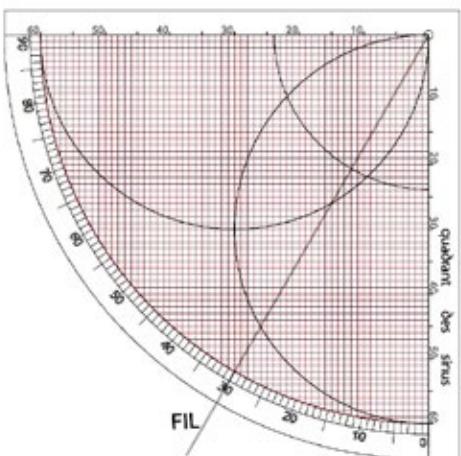


Fig.2. Les lignes d'un quadrant des sinus.

Le principe de la lecture des sinus est simple. On veut par exemple connaître la valeur de $\sin(60^\circ)$:

- on tend le fil sur la graduation 60° (figure 3) ;
- on repère le point où le fil coupe l'arc gradué en degrés ;
- on suit l'horizontale jusqu'à la graduation. On lit « 30 », c'est-à-dire $30/60$ soit 0,5.

Pour le cosinus, on suit la verticale jusqu'à l'autre graduation, ce qui donne $52/60$, une valeur approchée de $\sqrt{3}/2$.

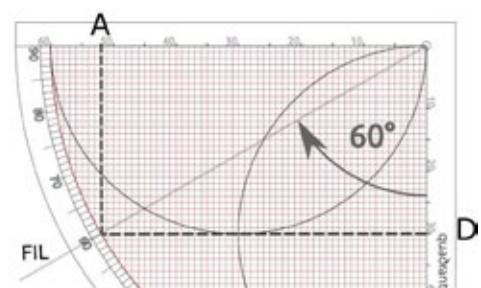


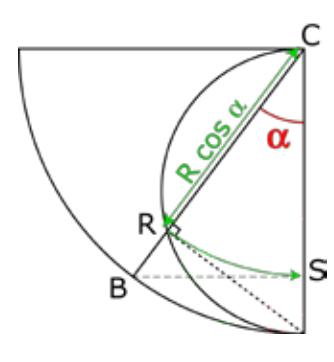
Fig.3. Le sinus (en A) et le cosinus (en D) de 60° .

Remarque

Les deux demi-cercles visibles sur le quadrant fournissent une méthode alternative à la précédente.

Fig.4. Utilisation d'un des demi-cercles pour le cosinus.

Au lieu de projeter B en S, on fait coulisser une perle sur le fil en R, à l'intersection de celui-ci et du demi-cercle. Pour lire la valeur du cosinus, on ramène le fil verticalement et la perle se retrouve en S. Pour le sinus, on utilise l'autre demi-cercle.



Pourquoi les graduations rectilignes ont-elles pour valeur limite « 60 » ?

Comme on l'a vu, cette valeur sert de dénominateur pour la fraction lue. On peut supposer que les

nombreux diviseurs de 60 facilitent certains calculs ou simplifications. De nos jours, un dénominateur 100 nous paraîtrait plus familier, et fonctionnerait également¹.

À quoi sert le petit quart de cercle visible sur de nombreux quadrants des sinus ?

Ce quart de cercle est parfois appelé «*arc d'obliquité*». C'est précisément cet élément qui ajoute à l'instrument une fonctionnalité pratique pour l'astronome : la détermination de la déclinaison du Soleil, à une date donnée.

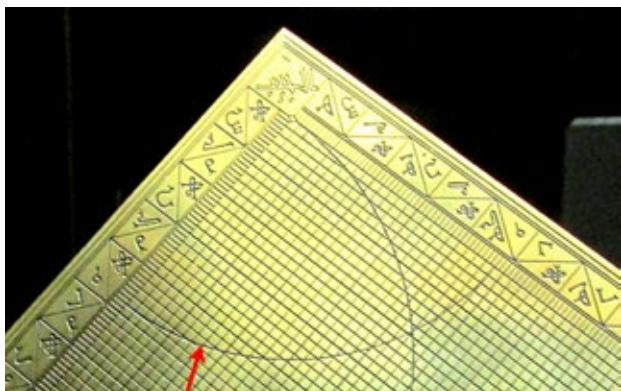


Fig. 5. L'arc d'obliquité.

Pour comprendre son utilisation, il est nécessaire de rappeler la définition de certains angles en astronomie.

Angles astronomiques : longitude écliptique, obliquité et déclinaison

Le plan de l'écliptique, que parcourt le Soleil vu depuis la Terre durant l'année, est incliné par rapport au plan de l'équateur d'un angle $\varepsilon = 23,4^\circ$ (obliquité de l'écliptique)². Ces plans donnent chacun lieu à un système de repérage³ de la position du Soleil au cours de l'année (figure 6).

On note λ la longitude écliptique du Soleil, comptée dans le plan de l'écliptique. Cet angle a pour origine le point vernal, noté γ (voir figure 6). Par définition, c'est à l'équinoxe de printemps que le Soleil passe par le point vernal ($\lambda = 0^\circ$).

On définit également la déclinaison du Soleil, notée δ , comme l'angle entre la direction du Soleil et le plan de l'équateur (cet angle est pris dans un plan perpendiculaire au plan de l'équateur passant par les pôles). Au cours de l'année, la déclinaison du

1 Précisons qu'à l'époque de ces premiers quadrants, on utilisait des fractions mais encore pas de nombres décimaux, ni de nombres négatifs.

2 Aujourd'hui, l'obliquité de l'écliptique vaut $23,4^\circ$, elle était de $23,6^\circ$ au 9^e siècle,

3 Voir par exemple le n° 155 des Cahiers Clairaut (2016).

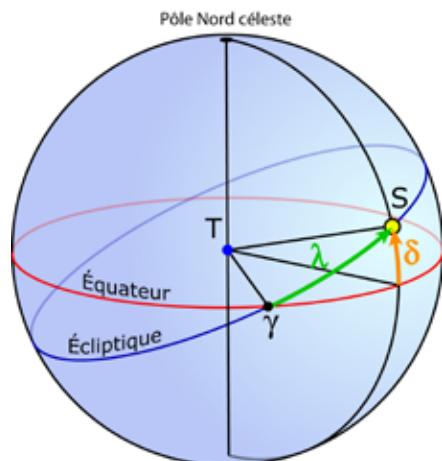


Fig.6. Longitude écliptique λ et déclinaison δ du Soleil.

Soleil est tantôt positive, tantôt négative, ses valeurs extrêmes étant $+23,4^\circ$ et $-23,4^\circ$.

Ces deux angles sont liés par la relation :

$$\sin \delta = \sin \lambda \times \sin \varepsilon \quad (1)$$

Le calendrier zodiacal qui figure dans nombre d'instruments astronomiques anciens, décomposait l'année en 12 signes de 30 degrés.

Un découpage sans correspondance avec les 365 jours de notre année civile, mais bien commode pour relier la date à la longitude écliptique :

$\lambda = 0^\circ$: premier jour du Bélier (20 mars)

$\lambda = 30^\circ$: premier jour du Taureau (20 avril)

$\lambda = 60^\circ$: premier jour des Gémeaux (21 mai)

etc., à raison d'environ un degré par jour⁴.

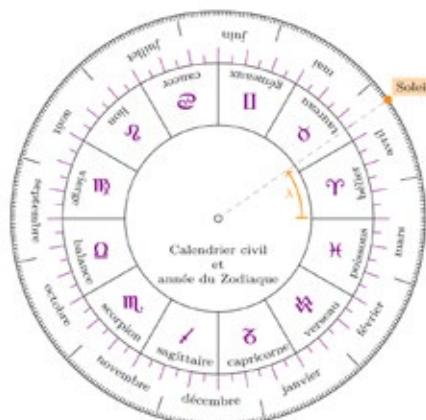


Fig.7. Calendrier du zodiaque, calendrier civil et longitude écliptique du Soleil λ .

La connaissance de la déclinaison du Soleil est un paramètre utile en astronomie. Il permet par exemple de déterminer la hauteur méridienne du Soleil, c'est-à-dire sa hauteur maximale au cours de la journée. Mais comme la déclinaison varie de jour en jour, il était pratique d'avoir une méthode pour la déterminer sans transporter sur soi un tableau de 360 ou 365

4 Ces dates peuvent varier d'un jour d'une année à l'autre.

valeurs. C'est ce que permet le quadrant des sinus et son arc d'obliquité.

Procédure pour une longitude écliptique inférieure à 90°

Supposons que l'on se trouve le 30 avril, le Soleil est au dixième degré du Taureau. La longitude écliptique vaut alors 40° (30° pour le signe du Bélier + 10°).

- (1) On place le fil du quadrant sur l'angle 40° (longitude écliptique) ;
- (2) on repère l'intersection du fil avec l'arc d'obliquité ;
- (3) on suit la grille dans la direction « verticale » (voir figure). On lit alors directement la déclinaison du Soleil (dans cet exemple, un peu moins de 15°).

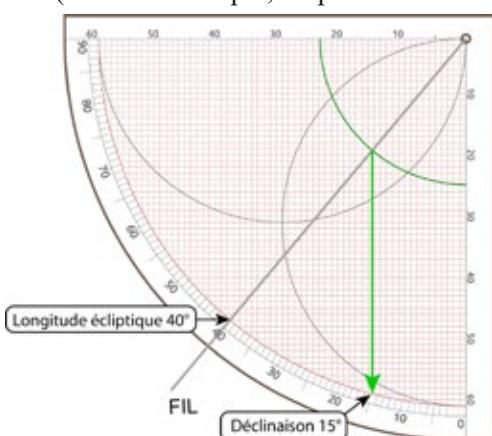


Fig.8. Lecture de la déclinaison du Soleil sur le quadrant.

Afin d'expliquer comment cette procédure fonctionne, rappelons la formule notée (1) vue plus haut :

$$\sin \delta = \sin \lambda \times \sin \varepsilon \quad (1)$$

L'instrument doit donc réaliser une multiplication par $\sin \varepsilon$ pour passer de la longitude à la déclinaison. Ensuite, il faut remarquer deux triangles homothétiques, ABC et EFC, qui apparaissent lors de la lecture de l'angle sur le quadrant (figure 9) :

$$\frac{CE}{CA} = \frac{CF}{CB} \quad (\text{théorème de Thalès}).$$

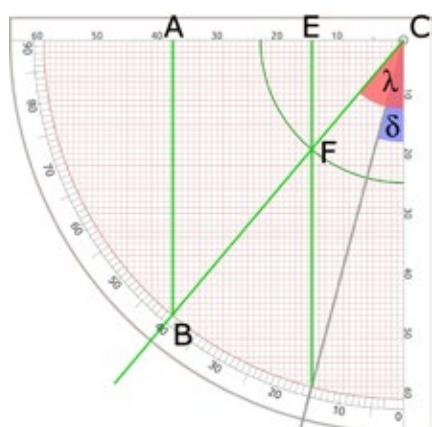


Fig.9. Justification de la construction.

$$CE = R \sin \delta ; CA = R \sin \lambda ;$$

$$CF = r \text{ (rayon de l'arc d'obliquité)} ; CB = R.$$

$$\text{On obtient } \frac{R \sin \delta}{R \sin \lambda} = \frac{r}{R} \text{ donc } r = \frac{R \sin \delta}{\sin \lambda}.$$

On veut que la relation (1) soit vérifiée. On remplace $\sin \delta$ par $\sin \lambda \sin \varepsilon$ et on obtient :

$$r = \frac{R \sin \lambda \sin \varepsilon}{\sin \lambda} = R \sin \varepsilon$$

$r = 60 \sin 23,4^\circ \approx 23,8$. C'est bien le rayon du quart de cercle sur l'instrument.

On peut vérifier avec l'exemple numérique pris ci-dessus, avec $\lambda = 40^\circ$.

On a : $\delta = \arcsin(\sin 40^\circ \sin 23,4^\circ)$, ce qui donne en degrés $\delta \approx 14,8^\circ$

Sur l'instrument, on lit bien un peu moins de 15°.

Les valeurs de déclinaison lues sur le quadrant ne diffèrent pas de plus de 0,5° de la valeur calculée.

Qu'en est-il pour les dates où la déclinaison est supérieure à 90° ?

Une fois atteinte la valeur 90° de longitude écliptique (solstice d'été, 20 ou 21 juin), il faut redescendre l'échelle des angles. Par exemple, pour la date du 1^{er} juillet (ou dixième degré du Cancer), $\lambda = 100^\circ$. On place le fil sur l'angle 80° (car depuis 90°, on redescend de 10°). La valeur de la déclinaison obtenue sera la même que pour la date de longitude 80°.

Au-delà de l'équinoxe d'automne (22 ou 23 septembre, ou premier degré de la Balance), la valeur de la longitude continue d'augmenter (de 180 à 270°). Sur le quadrant, on remonte l'échelle des angles, de 0 à 90°. À partir du solstice d'hiver, on descend à nouveau l'échelle des angles. Il faut se souvenir que la déclinaison est négative (ou sud) en automne et en hiver.

Ainsi, en parcourant quatre fois ce quadrant, on aura décrit une année de course du Soleil autour de la Terre.

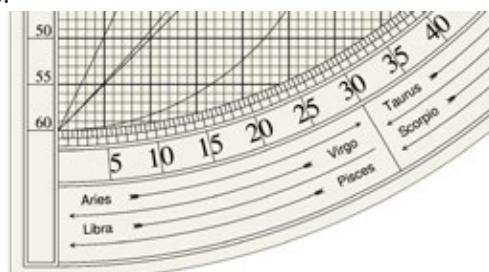


Fig.10. Sur ce quadrant des sinus moderne, les mois zodiacaux ont été placés sur le bord incurvé, afin de faciliter le décompte de ces allers de retours. Image Timothy Mitchell ([www.astrolabeproject.com](http://astrolabeproject.com)).

Bibliographie, sitographie

Les instruments de l'astronomie ancienne, Ph. Dutarte. Éd. Vuibert.

<http://astrolabeproject.com/downloads/quadrants/SineQuadrantHandoutVersion1.pdf>

Les étoiles variables

Michel DUMONT, Variabiliste

Ancien démonstrateur au Palais de la découverte et ancien professeur de mathématiques

Après avoir rappelé la définition de la magnitude des étoiles et proposé quelques d'exercices simples d'application, l'auteur suggère une étude visuelle des étoiles variables, applicable à l'occasion d'une école d'astronomie ou dans le cadre d'un club.

Introduction

Une étoile est dite variable si son éclat est changeant. Cet éclat est représenté par sa magnitude m définie par la formule de Pogson : $m = -2.5 \log E + k$

k est une constante qui fixe le zéro de l'échelle des magnitudes ; E est l'éclat (la luminosité) de l'étoile. Il s'agit de logarithmes décimaux qui étaient beaucoup plus faciles à manipuler avant l'arrivée des petites calculatrices.

Les unités dans lesquelles s'expriment les grandeurs photométriques ne sont pas nécessaires dans cette introduction, puisque les magnitudes sont presque toujours définies de façon relative par la formule :

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log (E_1/E_2) \quad (1)$$

où m_i et E_i sont relatifs à l'étoile i . On notera que la magnitude d'une étoile est un nombre algébrique d'autant plus petit que l'étoile est brillante. La magnitude, définie par la formule de Pogson fut imaginée pour coïncider avec la « grandeur » de l'étoile utilisée autrefois ; les étoiles de première « grandeur » étant plus brillantes que les étoiles de deuxième « grandeur ».

Sur le ciel, on a défini un certain nombre d'étoiles standards dont la magnitude fut fixée ; toutes les autres magnitudes sont déterminées par comparaison avec des standards. Parmi les standards, on avait choisi l'étoile Polaire qui a l'avantage (très important) d'être toujours à la même hauteur d'un lieu donné ; malheureusement, l'étoile Polaire est légèrement variable !

Exercice 1 : (Classe terminale) : Retrouver la formule (1) à partir de la formule de Pogson.

Exercice 2 : Si la différence des magnitudes de deux étoiles est égale à 1, quel est le rapport des éclats ? (On constatera que ce rapport est voisin de 2,5 mais dans la formule de Pogson, c'est bien 2,5.

Le voisinage des deux nombres est une coïncidence numérique).

Exercice 3 : Lorsqu'une étoile est 100 fois plus brillante qu'une autre, quelle est la différence des magnitudes ?

Exercice 4 : La magnitude de Sirius est de -1,44, celle du Soleil est de -26,9. Calculer le rapport des éclats.

Exercice 5 : On observe une étoile dans une lunette. La quantité de lumière reçue est proportionnelle à la surface de l'objectif (de la lunette). On suppose que la pupille de notre œil (dans l'obscurité) fait 6 mm de diamètre et permet (dans des conditions normales, à la campagne) d'apercevoir les étoiles de magnitude 6.

Quelle magnitude peut-on apercevoir avec une lunette de 60 mm de diamètre, avec un télescope de 200 mm de diamètre ?

Supposons que la distribution des étoiles, au voisinage du Système solaire, soit aléatoire ; sachant que l'on peut voir 6 000 étoiles à l'œil nu, combien peut-on voir d'étoiles avec un télescope de 200 mm de diamètre ?

Les étoiles variables

Dans l'Antiquité, on avait noté l'apparition (rare) d'étoiles nouvelles qui avaient ensuite progressivement disparu (novae ou supernovae). Les variations de β Per (Algol) avaient été remarquées par les Arabes. La régularité du phénomène fut précisée par Goodricke en 1782. En 1596 Fabricius découvrit les variations de Mira Ceti. À partir du XIX^e siècle, les découvertes se sont succédées et l'on connaît aujourd'hui plus de 100 000 étoiles variables.

Il y a deux grandes familles d'étoiles variables :

- les variables à éclipses qui sont des étoiles doubles dont les composantes s'éclipsent mutuellement et régulièrement ;

- les variables intrinsèques qui, a priori, sont simples et dont les variations sont produites par des variations des paramètres de l'étoile, en général la température et le diamètre de l'étoile.

Il y a de nombreuses sortes de variables dans chacune de ces familles.

Avant l'arrivée de la photométrie photoélectrique (PPE) puis des CCD, les observations d'étoiles variables (i.e. la mesure de leur magnitude) se faisaient visuellement ou avec des photographies. La précision des mesures visuelles est sensiblement égale à celle des mesures photographiques, mais la PPE et les CCD sont 5 à 10 fois plus précises et même 100 plus pour les observations effectuées par les satellites hors de l'atmosphère.

Les amateurs ont joué un rôle important dans l'étude des variables au cours des deux siècles précédents. Aujourd'hui, l'avènement de télescopes automatiques capables d'observer plusieurs centaines de variables avec une précision 10 fois meilleure que les mesures visuelles sonne le glas des variabilistes visuels !

Une petite expérience

Dans chacune des deux familles, il y a des variables à évolution lente et d'autres très rapides. Parmi les variables intrinsèques, il y a des variations considérables, parfois de plus de 10 magnitudes. L'étoile est alors 10 000 fois plus brillante au maximum qu'au minimum ! Mais la période des variations est de plus d'un an.

La figure 1 montre la courbe de lumière de l'étoile CY Aqr dont les variations sont dues à une pulsation rapide de l'étoile, dont la période est de 1 h 28 min.

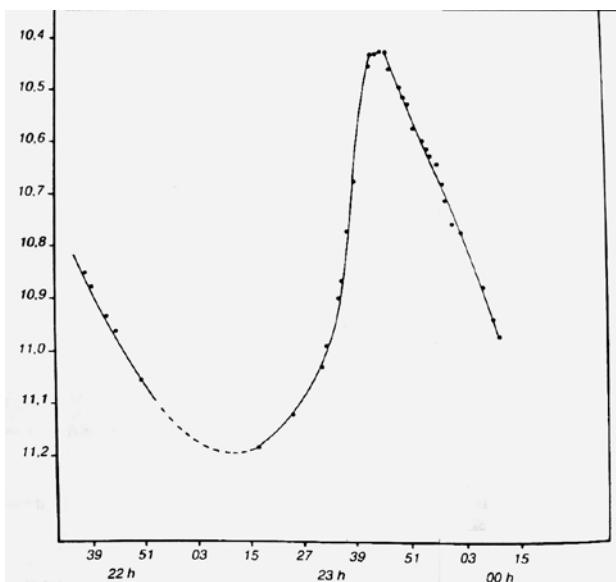


Fig.1. Courbe de lumière de CY Aqr obtenue pendant la nuit du 25-26 août 1982 avec le télescope photométrique de 76 cm de l'observatoire du Jungfraujoch.

La figure 2 montre la courbe de lumière de la variable à éclipses V566 Oph dont la période est de 9 h 50 min. Sur cette figure, toutes les observations effectuées en 2016 ont été composées sur un seul cycle. Soit T_0 l'instant du minimum de l'éclipse prévu par les éphémérides, T l'instant de l'observation et P la période ; la phase ϕ est donnée par :

$$\phi = \text{FRAC} ((T-T_0) / P)$$

où $\text{FRAC} (x)$ est la partie décimale de x ; $\text{FRAC} (x) = x - (\text{partie entière de } x)$

ϕ est donc un nombre compris entre 0 et 1. Pour mieux visionner la courbe de lumière, en général, on trace 2 ou 3 cycles (identiques !).

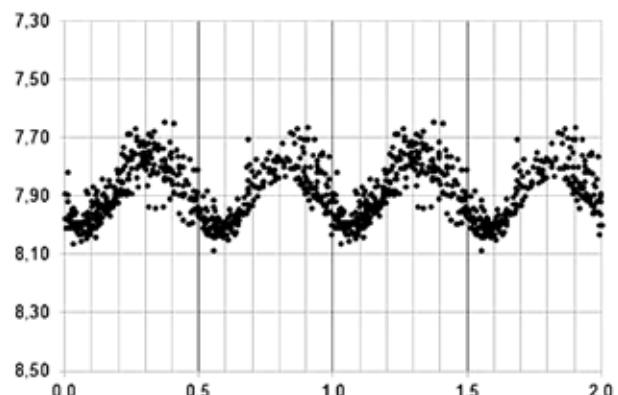


Fig.2. Courbe de lumière de V566 Oph tracée à partir de 511 observations visuelles faites par Stéphane Ferrand en 2016.

La figure 3 montre les 330 observations de la céphéide FF Aql effectuées par l'auteur de 2014 à 2018.

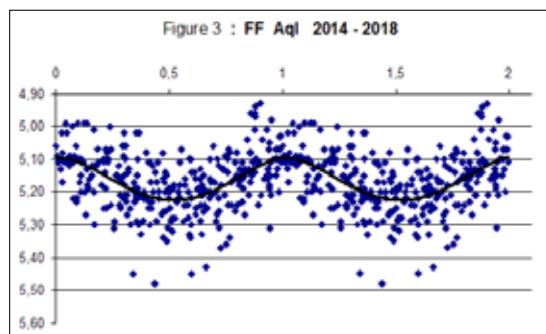


Fig.3. Courbe de luminosité d'une Céphéide dans l'Aigle.

Pour débuter dans l'observation des étoiles variables, FF Aql ne serait pas un bon choix, car son amplitude est faible (0,35 mag.)

Sur cette figure 3, on a tracé le graphe d'un polynôme déterminé par la méthode des moindres carrés et calculé par Excel. Toute fonction continue et périodique peut être approximée par un polynôme trigonométrique dont la détermination est une bonne application de l'usage des logiciels de calcul en vogue à l'Éducation nationale. La solution est la suivante :

$$m(\phi) = 5,17 - 0,063 \cos(2\pi\phi) - 0,008 \sin(2\pi\phi) - 0,005 \cos(4\pi\phi)$$

Les termes suivants sont négligeables. On constate que le maximum se produit à la phase

$\phi = 0,017$ soit 1,8 h plus tard que l'éphéméride donnée dans le GCVS (Catalogue Général des Étoiles Variables édité en Russie).

Pour un premier essai lors d'un stage ou d'une école d'astronomie, on peut essayer de reconstituer la courbe de lumière de la céphéide (variable pulsante) S Sge, dans la constellation de la Flèche. La figure 4 montre la carte de cette petite constellation visible en été et proche de la constellation du Cygne. Les étoiles à utiliser pour les comparaisons d'éclats sont A, B et F dont la magnitude et le spectre sont donnés **sous la carte**. S Sge varie de la magnitude 5,1 à 6,0 en 8,382 jours (8 j 9 h 10 min).

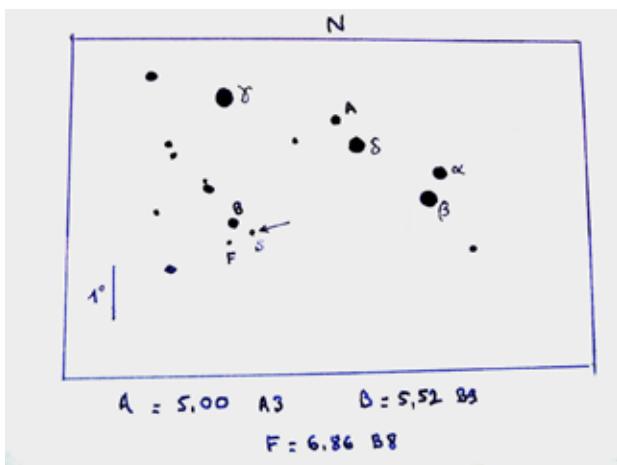


Fig.4. La variable S Sge dans la constellation de la Flèche.

La technique élémentaire pour effectuer les comparaisons est la « méthode des degrés » imaginée par Argelander (1799 – 1875) et décrite au paragraphe suivant.

Méthode des degrés

La méthode consiste à choisir dans le champ de l'étoile variable deux étoiles dont les éclats encadrent celui de la variable. Soient par exemple A une étoile plus brillante que la variable V et B une étoile plus faible que V. On cherche à obtenir une expression du genre A (a) V (b) B où a est le nombre de degrés qui séparent les éclats de A et de V et b le nombre de degrés qui séparent V de B. La magnitude m_V de V sera alors :

$$m_V = m_A + a/(a+b) \times (m_B - m_A)$$

où m_B et m_A sont les magnitudes respectives de B et A.

Les degrés sont définis de la façon suivante :

1 degré : Si A et V paraissent d'éclat identique au premier coup d'œil, mais si, après un examen attentif, il semble, sauf à de rares instants, que A est plus brillante que V, on dira que A est plus brillante que V de 1 degré. On écrira : A (1) V

2 degrés : Si A et V paraissent de même éclat au premier coup d'œil, mais si rapidement et sans hésitation, on estime que A est plus brillante que V, on écrira : A (2) V.

3 degrés : Si une légère différence d'éclat est décelable dès le premier coup d'œil, on dira que A est plus brillante que V de 3 degrés : A (3) V

4 degrés : Une nette différence d'éclat sensible au premier coup d'œil s'écrit A (4) V

5 degrés correspondent à une véritable disproportion d'éclat. On s'efforcera de choisir des étoiles de comparaison dont les différences d'éclat restent modestes.

Une observation visuelle d'étoile variable doit comporter : la date, l'heure (UT), le nom de l'étoile, la comparaison du genre A (a) V (b) B, la magnitude déduite de la comparaison, l'instrument utilisé (jumelles, lunette, télescope... avec diamètre et grossissement : pour l'observation des variables, les forts grossissements sont inutiles). On peut aussi noter la qualité auto-estimée de l'observation : fiable, moyenne, douteuse...

Conclusion

D'abord repérer la constellation de la Flèche (Sagitta Sge), puis l'étoile S grâce à la figure 4, avec une paire de jumelles, puis se lancer dans la comparaison. Attention, en cas d'observations en groupe, ne pas s'échanger d'information ! La suggestion est la première cause d'erreur lors des mesures visuelles. Bon courage !

L'ASTRONOMIE dans les TIMBRES (4)

Anne-Marie Louis, anne-marie.louis@wanadoo.fr

À la base il y a l'observation. Un petit aperçu de ce que l'univers des timbres nous propose en matière d'observation, comme des photos de vacances, avec un œil un peu technique et toujours critique... Et puisqu'il s'agit d'astronomie, nous regarderons évidemment vers le passé.

4^e partie – Voir et observer

Par où commencer quand une belle série, comportant des timbres exceptionnels, doit illustrer un article un peu fourre-tout ? Le Soleil nous avait manqué pendant le confinement, alors googlons **timbre Soleil** par curiosité. Parmi les propositions : **éclipse de Soleil du 11 août 1999**.



Mais depuis, que de médiocrités... *Sous le Soleil 2016*, rien de nouveau. Ah un joli coucher de Soleil en 2012 dans le carnet *Le timbre fête le feu* (5 500 000 exemplaires) ! On voit nettement l'aplatissement du Soleil dû à la réfraction atmosphérique. En 2013, face au Soleil, une femme ou plutôt son ombre : le carnet, édité à l'occasion de la journée internationale de la femme, illustre un rallye féminin et est intitulé *Valeurs de Femmes, Femmes de Valeurs* (2 500 000 exemplaires). **L'héliogravure** n'a pas produit que des chefs-d'œuvre !



Si vous vous interrogez sur les émissions philatéliques en lien avec l'astronomie ou les sciences en France, elles sont hélas de plus en plus rares. En 2019 l'Allemagne a mis en images deux phénomènes

lumineux. Si le fragment d'arc-en-ciel est assez fréquent, le Soleil rectangulaire, moins prévisible, existe bel et bien et je l'ai vu. Ce faux mirage révèle l'absence d'uniformité du milieu optique traversé, qui réfracte alors la lumière de manière surprenante.



En 2017 c'est aussi l'Allemagne qui avait émis ce timbre illustrant les **ondes gravitationnelles**, conçu par l'artiste Andrea Voß-Acker à partir d'une modélisation numérique de la première détection.



Changeons de latitude. Soleil de minuit au **Cap Nord** : rien ne nous dit à quelle heure la photo a été faite ? Pour ma part j'ai photographié la pleine Lune à midi en hiver, je pense en faire un timbre !



Les timbres anciens peuvent réserver de belles surprises, comme ces **rayons crénulaires** sur *la rade des Saintes*, une série aux nombreuses valeurs et nuances émise dans les années 30 en **Guadeloupe**.



Voyez aussi ce timbre du **Peru** de 1952, le premier d'une longue série pour la poste aérienne jusqu'à la fin des années 70, tous émis avec cette légende incorrecte : *Cusco Observatorio solar de los incas*.



Il s'agit en réalité de l'**intihuatana** (« lieu où l'on attache le Soleil »), gnomon sculpté dans la roche au sommet du quartier sacré de *Machu Picchu*, le point le plus élevé de la cité. Merci à Liliane et Jean Vilas de m'avoir transmis une riche collection où j'ai trouvé ces merveilles !

En 2007 les **AAAF**, Terres australes et antarctiques françaises, nous avaient montré le **mouvement du Soleil** au solstice d'été depuis la base Dumont d'Urville, située en terre Adélie. Mais là-bas aussi, les timbres à vocation astronomique se font rares...



De g. à d. : 14 h 53, 13 h 46, 12 h 40, 11 h 34, 10 h 25

Un détour par l'**Année mondiale de l'astronomie** pour la suite du voyage.

AMA09 : quatrième épisode

Deux timbres furent émis par l'**Islande** en 2009 : celui de gauche (105 Kr) évoque les observations faites chaque jour de l'année avec précision par un fermier, **Otti Helgason** surnommé **Star-Otti** (*Stjörnu-Otti* en islandais), qui vécut aux alentours de 1100 et put ainsi déterminer les dates et position des solstices d'hiver et d'été, aide précieuse pour les Vikings qui ne disposaient pas alors d'instruments de navigation. Le timbre de droite (140 Kr) représente **Lambhus**, une ferme isolée où eurent lieu en 1789 les premières observations astronomiques officielles. Les timbres d'**Islande** sont souvent assez dépouillés, les explications sont accessibles aux islandophones !



Le **Danemark** avait choisi **Rundetårn** (à gauche), la tour ronde du XVII^e s., plus vieil observatoire d'Europe encore en activité, où travaillèrent Picard et Rømer et le **planétarium Tycho Brahe** (à droite).



L'éclairage avec une lampe UV est ici du meilleur effet.



Les célèbres tableaux de **Donato Creti** ont déjà été cités dans les Cahiers Clairaut : le comte Marsili, astronome amateur et naturaliste avait fait peindre en 1711 une série de 8 tableaux qu'il offrit au pape Clément XI pour le convaincre de l'intérêt de créer, à Bologne, le premier observatoire public d'Italie. En 2009 ce sont deux de ces tableaux qui avaient été reproduits par le **Vatican** à cette occasion : le **Soleil** et **Saturne**. Si les proportions sont quelque peu contestables, on remarque l'observation du Soleil en toute sécurité par projection à l'aide d'une lunette, ce qui prouve que le peintre avait été bien conseillé.



Observatoires, astronomes et graveurs

Il y eut une époque où la gravure des timbres était manuelle, faite en creux, au burin. Les timbres gravés en *taille-douce* présentent un léger relief au toucher. Véritables prouesses artistiques devenues rares, ce sont des œuvres d'art d'une admirable finesse. Et l'astronomie y a sa place !

1 - 1956, une époque où l'Administration des postes françaises était fière de présenter une série, la deuxième, consacrée aux *savants et inventeurs*, parmi lesquels figuraient Jean-Henri Fabre, Paul Sabatier, Charles Tellier et **Camille Flammarion**, celui qui voulait « vulgariser l'Astronomie sans la rendre vulgaire ». Faut-il rappeler qu'il publia en 1880 *L'Astronomie populaire*, fonda en 1883 l'**observatoire de Juvisy** et en 1887 la **SAF**, Société astronomique de France... Le timbre, gravé par **Raoul Serres**, présente un noble portrait et résume une œuvre admirable sur une petite surface avec une belle habileté. Il valait 18 francs. Il y en eut 2 300 000 exemplaires, et pour le premier jour deux cachets : celui de son lieu de naissance, Montigny-le-Roi (Haute-Marne), et Juvisy-sur-Orge (Seine-et-Oise), où il semble que l'on pouvait observer un magnifique ciel étoilé...



On relira avec émotion sur ce sujet deux articles de la revue *L'Astronomie* de juin 56 et mars 74 :

<https://tinyurl.com/y25m88ob>
<https://tinyurl.com/y4z782jm>

2 - La construction de l'**observatoire du pic du Midi de Bigorre** débuta en 1870. Le timbre gravé par *Raoul Serres* fut mis en vente au prix de 40 francs dans tous les bureaux de poste à partir du 24 décembre 1951 (donc entre l'arrivée de l'électricité en 1949 et celle du premier téléphérique en 1952 !) Vous le trouverez sans mal : il y en eut 57 780 000 exemplaires.



3 - Il y a toujours quelque chose à glaner dans les notices philatéliques de Wikitimbres (il suffit de rechercher le timbre et de cliquer en bas sur l'onglet *Documents*). Il est rappelé à juste titre que l'installation de l'**Observatoire de Haute-Provence**, qui débuta dans les années 30, fut très perturbée par la guerre. Plus loin : « *Il est évidemment impossible d'expliquer au grand public l'importance des travaux réalisés dans cet observatoire. Il convient cependant de lui dire que l'emplacement fut choisi après une prospection très poussée, avec essai d'appareils perfectionnés : il est certainement le meilleur emplacement possible en France.* » Le timbre à 1,30 franc, émis en 1970, a été gravé par *Jacques Combet*.



Avant de quitter wikitimbres, si dans les *classements* apparaît le terme **observatoire**, cliquez : 4 timbres s'affichent, dont les *tours catalanes* et un... *pigeonnier* en Tarn-et-Garonne !

4 - La **station de radiastronomie de Nançay** fut inaugurée en 1956. Le timbre montrant le **radiotélescope** fut gravé par *Claude Durrens* et émis à 6 400 000 exemplaires en 1963. Sans doute un des meilleurs exemples de l'excellence dans ce domaine, et la notice est très complète, ce qui ne gâte rien...



Jean Schneider m'a fait remarquer récemment qu'il n'y avait aucun timbre consacré à l'Observatoire de Paris. Mais nous avons eu un écho différent de la part de Suzanne Debarbat : « *Pour l'Observatoire de Paris, je suis sûre qu'il en a eu un. Lorsque la poste du XIV^e a lancé un appel pour des monuments de cet arrondissement, je l'ai proposé et le timbre est sorti.* » Y a-t-il quelqu'un qui pourrait nous aider à retrouver ce timbre édité localement et non répertorié ?

En revanche l'**Observatoire de Paris** figure sur un timbre d'une série de République centrafricaine, émise en 1983 pour le *Bicentenaire de la 1^{re} ascension d'un homme en ballon* (un homme accompagné d'un autre, comme chacun sait !)



Légende : L.J. Gay-Lussac 1778-1850 Ascension à 4 000 m – 1804. Deux personnes dans la nacelle et l'Observatoire de Paris en toile de fond. Il s'agit

bien de la première ascension que fit **Gay-Lussac** avec **Biot** le 20 août 1804 pour faire des mesures, en particulier de l'affaiblissement du magnétisme terrestre avec l'altitude. Or l'ascension n'eut pas lieu comme prévu au jardin du Luxembourg mais au jardin du Conservatoire des Arts-et-Métiers, comme on le voit sur les illustrations de l'événement. Et puis le portrait n'est pas celui de Joseph Louis Gay-Lussac mais celui de... Jean-Baptiste Biot ! Il existe deux autres timbres sur lesquels figure l'Observatoire de Paris, nous en reparlerons.

Un peu d'espace...

Il aurait été dommage de ne pas montrer aussi, en écho au thème du dossier de ce numéro, l'**observatoire Pierre-Auger** en Argentine puisqu'on y étudie les rayons cosmiques.



Et il n'était pas envisageable de laisser passer les 30 ans du **télescope spatial Hubble** : de nombreux timbres existent, émanant le plus souvent de pays qui ne sont pas des puissances spatiales, comme la Tanzanie, les Grenadines ou São Tomé... À l'occasion du 25^e anniversaire la **République de Guinée** avait émis 2 superbes blocs-feuilles. Vous n'en verrez qu'un, par manque de place.



Dans le CC 170 page 38, sur un bloc-feuillet bulgare dédié à la comète de Halley, figurait en haut à droite le petit dessin de l'une des deux sondes spatiales « **VEGA** ». Or pendant la deuxième semaine de juillet, l'observation de la comète C/2020-F3 Neowise dans le ciel matinal, pas très loin de Vénus, a rappelé à **Danièle Imbault** cette **mission franco-soviétique VEGA** (Венера-Галлэй = Venera-Halley) d'exploration « *in-situ* » de Vénus et de la comète de Halley, à laquelle elle a contribué.

L'illustration vient encore de **Guinée**, et Danièle évoque pour nous son travail « *de 1980 à 1985, comme chef de projet d'un des 12 instruments scientifiques (dont la moitié dédiés à l'analyse du sol) embarqués sur la sonde de descente et d'atterrissement sur Vénus (qu'on voit au premier plan sur le bloc-feuillet) : le collecteur d'aérosols français qui, associé au spectromètre de masse de l'Institut de géochimie de Moscou, a prélevé et analysé les aérosols des nuages sur 40 km d'atmosphère (environ 20 min de descente). On a ainsi réalisé la première mesure *in-situ* confirmant que les nuages de Vénus sont constitués d'acide sulfurique, quelle que soit leur altitude. Au second plan sur le bloc-feuillet, on voit le ballon-sonde français de 3,4 m de diamètre (autre première !), largué à 50 km d'altitude, qui a mesuré, pendant 46 h, température, pression et vitesse du vent. Le timbre lui-même représente la sonde VEGA au complet, avant le largage dans l'atmosphère de Vénus du module de descente, encore enfermé dans la sphère supérieure... Depuis cette mission, il y a 35 ans, aucune sonde ne s'est posée sur la surface vénusienne à 460 °C... Et quand je regarde Vénus, je pense à l'instrument dont j'ai piloté la conception et la réalisation, que j'ai étalonné et qui est là-haut... tout fondu et brûlé* ».



(A suivre)

Distance d'un satellite à la Terre

Olivier Gayrard

Dans un article précédent, (CC 163), nous avons vu comment déterminer avec un peu de réflexion et de calculs la distance d'un satellite géostationnaire à la Terre. Dans cet article nous reprenons une méthode décrite par Pascal Descamps de l'IMCCE Observatoire de Paris permettant de déterminer la distance des satellites passant près du zénith. D'autres méthodes de calcul sont ensuite proposées, accessibles aux lycéens.

Observations

Lors des sorties d'observation du ciel avec nos élèves, il y a immanquablement un moment où l'un ou l'autre d'entre eux n'attire l'attention du groupe sur « un petit point qui se déplace ». C'est un satellite artificiel. Peut-on tirer profit de l'observation de son passage dans le ciel pour mettre en place une démarche d'investigation ? Commençons par estimer sa vitesse apparente. Expérimentons : bras tendu poing et pouce dressé parallèlement à la trajectoire, quelle durée sera nécessaire au satellite pour traverser les $10^\circ + 5^\circ$ recouvert par notre poing et doigt ? Comptons les secondes. Zéro météorite, une météorite, deux météorites, trois météorites...

Quelques questionnements peuvent alors émerger. Bas sur l'horizon ou proche du zénith, les vitesses apparentes seront elles les mêmes ? Un peu plus tard dans la nuit, un nouveau satellite se présente. De nouveau il frôle le zénith. Les vitesses seront elles identiques ? Si elles sont différentes, que pourraient-on en déduire ? Et à quelle distance ces satellites se trouvent-ils ? Pour apporter des réponses à ces questions, il nous faut développer la suite de la démarche scientifique.

En premier lieu, nous élaborerons un protocole d'observation permettant d'acquérir des mesures de vitesse apparente les plus précises possible. Une fois réalisées ces expériences nous construirons un modèle mathématique qui s'appuiera sur la théorie newtonienne. En retour, ce modèle apportera les réponses à nos questions. Une recherche documentaire nous permettra de critiquer nos résultats.

Expérimentation, protocole et mesures

Rendons-nous sur le site Heavens Above (1) puis suivons le lien des prévisions quotidiennes des passages des satellites les plus brillants. La localisation est ici Saint-Benoît-de-Carmaux

(44,0524° N, 2,1307° E). Recherchons les satellites facilement visibles à l'œil nu, (magnitude minimum de $m = 3,0$), et dont la culmination est voisine de 90° , (distance zénithale $\zeta = 0^\circ$). À la date du 14 avril 2020, deux satellites font de bons candidats : Atlas Centaure R/B, $m = 0,9$ et $\zeta = 3^\circ$ et Cosmos 2082 Rocket $m = 2,1$ et $\zeta = 1^\circ$. En cliquant sur la carte nous agrandissons la zone du ciel choisie. Nous avons ainsi accès à une carte détaillée (fig. 1).

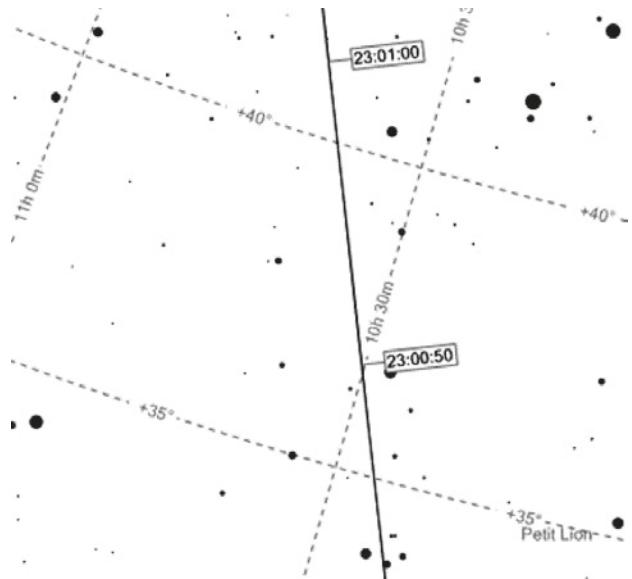


Fig.1. Cosmos 2082 Rocket - Détails du passage du 14 avril 2020, culmination à 23 h 01 m 05 s. Source Heavens Above.

Nous constatons que la vitesse angulaire ω_0 vue par l'observateur terrestre est de l'ordre de $0,5^\circ.s^{-1}$ soit $8,7.10^{-3} \text{ rad.s}^{-1}$. Pour gagner en précision nous devons réaliser le cliché lorsque le satellite passe de part et d'autre de sa distance zénithale la plus faible (voir la figure 4 du paragraphe 3). Reste à faire un compromis entre le temps d'exposition sans filé d'étoile et une taille du champ adaptée pour obtenir au moins une trace exploitable. Un champ ni trop grand, la mesure serait peu précise, ni trop petit, le satellite sortirait du cadrage. Le Canon 60Da utilisé ici dispose d'une matrice de 5184×3456 pixels dont chaque photosite

mesure $4,29 \mu\text{m}$. L'angle vu par un photosite avec un objectif de focale $f = 100 \text{ mm}$ est donc de $4,29 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$ et le champ de l'image est de $12,7^\circ \times 8,5^\circ$.

Le temps de pose maximale sans filé (2) peut-être estimé par la règle des 500, $t_{\max,s} = 500/f(\text{mm})$.

Reste à attendre le moment dit, focaliser à l'infini, viser le zénith avec un trépied et un niveau à bulle puis à déclencher avec un intervallomètre des poses toutes les 5 s. Lors du dépouillement, l'un des clichés est exploitable car en 5 s la trace recouvre environ le tiers du petit côté du capteur.

Pour la mesure de ω_0 , j'ai utilisé deux outils en ligne. Astrometry.net (3) qui permet de récupérer (automatiquement !) au format FITS une nouvelle image dont l'en-tête contiendra les paramètres de calibration astrométrique en coordonnées J2000. (figure 2). Puis Aladin (4), qui permettra quant à lui avec l'outil de mesure des distances de calculer ω_0 .



Fig.2. Image récupérée après calibration astronomique sur Astrometry.net. La trace laissée par Cosmos 2082 Rocket a été accentuée.

Mesurons donc l'angle sous lequel un observateur terrestre voit la trace laissée par le passage de Cosmos 2082 Rocket. Il est de $\theta_0 = 2,453^\circ$ pour une pose de 5 s (figure 3).

On calcule $\omega_0 = 8,5626 \cdot 10^{-3} \text{ rad.s}^{-1}$.

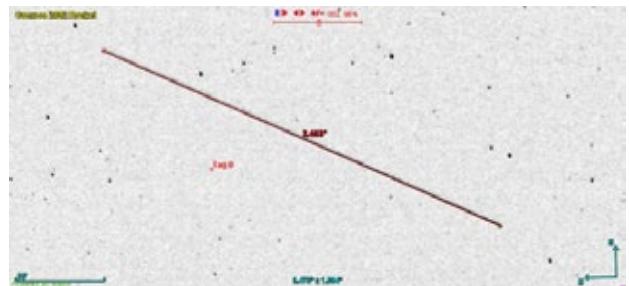


Fig.3. L'image de la figure 2 est téléchargée dans Aladin. Zoom sur la trace laissée par Cosmos 2082 Rocket ; Tag0 correspond à la position du zénith, dont les coordonnées ont été récupérées avec le logiciel Carte du Ciel à l'heure et au lieu de la photographie. L'outil de mesure des distances est utilisé sur la trace du satellite.

Modélisation et calculs

Seule la relation finale entre la distance h en kilomètre et la vitesse angulaire ω_0 en rad.s^{-1} est donnée aux élèves :

$$h \approx \frac{v}{\omega_0} - \frac{v^2}{2R\omega_0^2} = \frac{7,1905}{\omega_0} - \frac{0,00491}{\omega_0^2}$$

Les calculs amenant à cette relation sont trop complexes pour des élèves de lycée et sont proposés sur le site en complément numérique. D'autres méthodes sont proposées dans l'encadré en fin d'article.

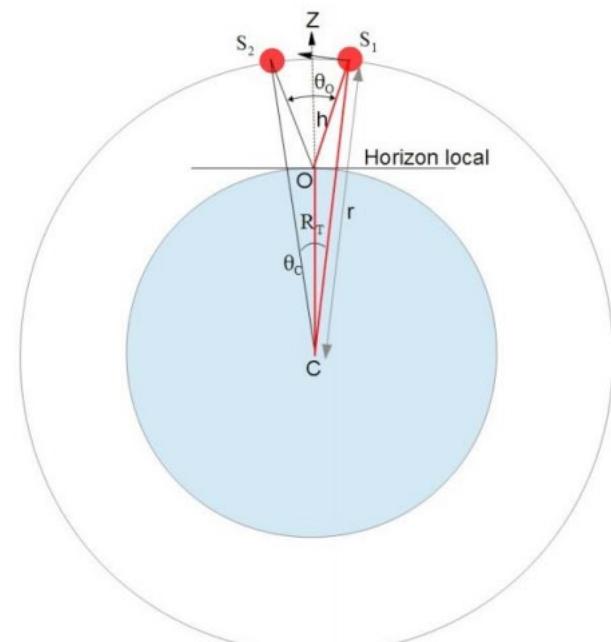


Fig.4. Modèle géométrique du phénomène observé. La figure est faite dans le plan de l'orbite du satellite. Ce plan contient l'observateur car le satellite passe au zénith. Source Pascal Descamps, IMCCE Observatoire de Paris.

Avec les valeurs mesurées précédemment, nous calculons :

$$\omega_0 = \frac{2,543^\circ}{5 \text{ s}} = 8,5626 \cdot 10^{-3} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{et } h = \frac{7,1905}{\omega_0} - \frac{0,00491}{\omega_0^2} = 856,8 \text{ km}$$

Dans les calculs amenant à la relation (calculs non notés ici), nous avons fait deux hypothèses qui sont bien vérifiées : l'angle mesuré θ_0 est petit et la distance h du satellite à l'observateur est petite devant le rayon terrestre R . Notons que plus la valeur h est grande et moins le résultat est précis. Nous pouvons aussi estimer l'erreur faite sur la mesure de la vitesse angulaire à partir du résultat de l'astrométrie renvoyé par Astrometry.net : 8,99 arcsec/pixel (valeur inférieure à celle pouvant être calculée dans le protocole suite à un réglage du téléobjectif à une valeur de focale supérieure à 100 mm). De plus nous avons bien respecté une condition importante lors de la construction de notre modèle : l'observation est bien menée avec une trace laissée par le satellite autour du zénith (voir figure 4).

Pour finir une recherche sur le site de Calsky.com (5) nous indique que Cosmos 2082 Rocket (corps de fusée d'origine russe, cylindre de dimensions : 10,4 m \times 3,9 m) culminait à une distance de 854 km. L'erreur relative est inférieure à 0,5 %.

(1) <https://www.heavens-above.com/>

(2) Pour une meilleure estimation du temps de pose maxima, voir ce lien de la Société Astronomique du Havre.

<https://www.sahavre.fr/tutoriels/astrophoto/34-regle-npf-temps-de-pose-pour-eviter-le-file-d-etoiles>

(3) <http://nova.astrometry.net/upload>

(4) <https://aladin.u-strasbg.fr/>

(5) <https://calsky.com/>

Passage d'un satellite au zénith (orbite circulaire)

Proposition de calcul accessible aux lycéens

1. On utilise la 3^e loi de Kepler généralisée où G est la constante de gravitation et M_T la masse de la Terre (et en négligeant la masse du satellite) :

$$a^3 / T^2 = G \times M_T / (4\pi^2) \approx 1,01 \times 10^{13} \quad [1]$$

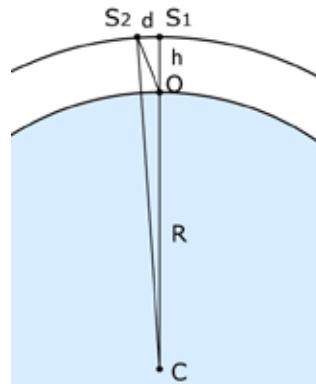
2. On appelle d la distance parcourue par le satellite entre sa position au zénith S_1 et sa position 1 seconde plus tard S_2 .

ω_0 est la vitesse angulaire mesurée par l'observateur en radian par seconde,

ω_c la vitesse angulaire vue depuis le centre de la Terre,

h l'altitude du satellite et a la distance du satellite au centre de la Terre :

$a = h + R$ avec R rayon de la Terre.



On a alors : $\omega_0 \approx \frac{d}{h}$ et $\omega_c = \frac{d}{a}$

On élimine d , ce qui donne $\omega_0 = \frac{a\omega_c}{h}$

On remplace ω_c par $2\pi / T$ où T est la période du satellite.

D'où $\omega_0 = \frac{2\pi a}{Th}$ ou encore $T = \frac{2\pi a}{\omega_0 h}$

On remplace T par cette valeur dans l'équation [1]

a^3 / T^2 devient $\frac{ah^2\omega_0^2}{4\pi^2}$

L'équation [1] devient alors $ah^2 \approx \frac{1,02 \cdot 10^{13}}{\omega_0^2}$

Si on prend la valeur de ω_0 trouvée ($8,5626 \times 10^{-3}$), cela donne $a \times h^2 = 5,49 \times 10^{18}$

ou encore $(h + 6\ 370\ 000) \times h^2 = 5,49 \times 10^{18}$ [2]

C'est une équation de degré 3.

On peut la simplifier en changeant d'unité, avec h en km, cela donne :

$$(h + 6\ 370) \times h^2 = 5,49 \times 10^9$$

3. Comment résoudre cette équation du 3^e degré ?

Méthode 1 : graphiquement

On étudie la fonction $f(h) = (h + 6\ 370) \times h^2$. On vérifie ainsi qu'il n'existe qu'une solution positive dont on peut trouver une valeur approximative en traçant la représentation graphique de f entre 0 et 1 000 par exemple.

Méthode 2 : par approximation, avec un tableau

On sait que l'altitude cherchée est entre 1 et 1 000 km. On calcule $(h + 6\ 370) \times h^2$

pour 1 000 valeurs, de 1 à 1 000 et on trouve, pour $h = 871$, $f(h) = 5,4933 \times 10^9$

Méthode 3 : avec un solveur

On trouve sur internet des solveurs d'équations du 3^e degré

(par exemple <https://calculis.net/resoudre-equation-troisieme-degre>)

L'équation $(h + 6\ 370) \times h^2 = 5,49 \times 10^9$ s'écrit $h^3 + 6\ 370 h^2 - 5,49 \times 10^9 = 0$

On rentre les coefficients 1, 6370, 0 et -5.49E9 et on obtient une seule solution positive

$$h \approx 870,75 \text{ km}$$

VIE ASSOCIATIVE

HS 13 : Croyances et idées fausses en astronomie

Le hors série n° 13 des Cahiers Clairaut va sortir très prochainement ! Il sera disponible au plus tard le vendredi 13 novembre 2020... Vous le trouverez sur le site de vente du CLEA (clea-astro.eu puis ventes).

Au sommaire :

Chapitre 1 La Terre, forme et dimensions

- Quelle est la forme de la Terre ?
- Quelles sont les dimensions de la Terre ?
- Les platiastes
- Compléments

Chapitre 2 Idées fausses sur des phénomènes astronomiques

- Conceptions initiales
- Les phases de la Lune
- Saisons et distance du Soleil
- La Lune est-elle plus grosse à son lever ?
- Mars aussi grosse que la Lune ?
- Idées incorrectes à propos de l'impesanteur
- Quelques autres conceptions erronées

Chapitre 3 Croyances, idées reçues et complotisme

- L'astronomie, un domaine réservé aux hommes ?
- La physique du bon sens
- Naissances et pleine Lune
- Lune et végétation
- Astrologie
- Les extraterrestres
- Les fins du monde
- Les Américains sont-ils allés sur la Lune ?
- Créationnisme et astronomie

Chapitre 4 Information et biais cognitifs

- L'information scientifique
- Lecture d'images
- Influence des réseaux sociaux
- Croyances et biais cognitifs en astronomie
- Cartographie des controverses

Les rencontres du ciel et de l'espace

À l'heure où nous écrivons ces lignes, les Rencontres du ciel et de l'espace organisées par l'AFA à la Cité des sciences et de l'industrie à Paris devraient avoir lieu du vendredi 13 au dimanche 15 novembre 2020, du moins si la situation sanitaire ne s'aggrave pas.

Le CLEA y participera de différentes manières :

- avec un stand pour présenter nos productions, en particulier le HS13 (stand partagé avec la SAF) ;
- avec une intervention de Frédéric Pitout, « Quelle place et quels rôles pour l'astronomie dans l'éducation ? » vendredi 13 novembre à 16 h.
- avec une intervention « Croyances et fausses idées en astronomie » de Jean-Luc Fouquet et Pierre Causeret, vendredi 13 novembre à 17 h.

Frédéric Pitout interviendra également samedi 14 novembre sur le thème « Quatre siècles de recherche pour comprendre les aurores polaires ».

Solutions des mots croisés page 9

Horizontalement

- Particule.
- Île. Untel.
- Électron.
- Lô. Spot.
- Rossi. ITH.
- Ep. Mégère.
- Ailier. ET.
- Unix. OS.
- GeV. Muons.
- Éléments.
- Rs. DVD. al (années-lumière).

Verticalement

- Pierre Auger.
- All. Opinels.
- Réels. Live.
- Cosmix. MD.
- IUT. IEE. MeV.
- CNRS. Ground.
- Utopie. Sot.
- Lenôtre. NSA.
- El (exalitre soit 10^{18} L). Thétis (à ne pas confondre avec Téthys).

École d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débuter ou vous perfectionner en astronomie ?

Vous avez envie de développer vos savoir-faire pédagogiques au contact de collègues expérimentés ?

Venez participer au col Bayard, à une école d'été d'astronomie, dans un cadre majestueux.



Exposés accessibles à tous, ateliers pratiques et observations du ciel : toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements et vidéo sur :

<http://clea-astro.eu/aLaUne/EcolesdEtedAstronomie>

Les productions du CLEA

En plus du bulletin de liaison entre les abonnés que sont les Cahiers Clairaut, le CLEA a réalisé diverses productions.

Fruit d'expérimentations, d'échanges, de mises au point et de réflexions pédagogiques d'astronomes et d'enseignants d'écoles, de collèges, de lycées, ces productions se présentent sous différentes formes :

Fiches pédagogiques

Ce sont des hors-série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de recherche pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, mathématique et astronomie, le Soleil, ...

HS10 Mathématiques et astronomie (2012)

HS11 Les constellations (2014)

HS12 L'astronomie à l'école (2016)

HS13 Croyances et idées fausses en astronomie (2020)

HS14 Le Soleil (2018)

Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

Repérage dans l'espace et le temps, le mouvement des astres, la lumière messagère des astres, vie et mort des étoiles, univers extragalactique et cosmologique, ...

Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

Maquettes

Astrolabes, cartes du ciel, fuseaux horaires, lunoscopes, nocturlabes, zodiaques ou lot des six maquettes.

Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : <http://ventes.clea-astro.eu/>

Le formulaire de commande est sur le site.

Le site web

Une information toujours actualisée

<http://www.clea-astro.eu>



LES CAHIERS CLAIRAUT

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 156 - Décembre 2016 9 €



Publiés quatre fois par an, aux équinoxes et aux solstices, les Cahiers Clairaut offrent des rubriques très variées :

Articles de fond
Réflexions
Reportages
Textes (extraits, citations, analyses)
Pédagogie de la maternelle au supérieur
TP et exercices
Curiosités
Histoire de l'astronomie
Réalisations d'instruments et de maquettes
Observations
Informatique
Les Potins de la Voie Lactée

COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :

<http://www.clea-astro.eu>

Siège social :

CLEA
Case courrier 7018
Université Paris Diderot - Paris 7
Bâtiment Sophie Germain
IREM de Paris
8, place Aurélie Nemours
75205 Paris cedex 13

École d'Été d'Astronomie :

daniele-imbault@laposte.net

Cahiers Clairaut :

christianlarcher3@gmail.com

Ventes des productions :

<http://ventes.clea-astro.eu/>

Site web :

contact@clea-astro.eu

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2020 :	10 €
Abonnement CC pour 2020 :	30 €
Adhésion + abonnement CC :	35 €
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	40 €

Les adhésions, abonnements et achats peuvent se faire directement en ligne sur le site : <http://ventes.clea-astro.eu/>

Directeur de la Publication : Frédéric Pitout

Rédacteur de publication : Christian Larcher

Imprimerie Grapho12, 12200 Villefranche de Rouergue

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979

Numéro CPPAP : 0315 G 89368

Prix au numéro : 9 €

Revue trimestrielle : numéro 171 automne 2020

