

Au-dessus des montagnes

Philippe Drompt, Gymnase français de Bienne

Pendant le cours de formation continue de 2015, la « physique des phénomènes atmosphériques », j'ai discuté avec quelques collègues de la possibilité d'envoyer un ballon type météo dans la stratosphère. J'ai ainsi proposé à des élèves cette activité pour leur travail de maturité. Cinq ont montré de l'intérêt et, après avoir fait quelques recherches, j'ai pris contact avec swiss-strato¹ qui a gentiment accepté de nous aider dans cette entreprise. Elle nous a fourni la logistique nécessaire, à savoir le ballon, l'hélium, une première nacelle de repérage en ligne ainsi que son savoir-faire pour le lâcher. Merci à David, c'était vraiment précieux !

Les élèves se sont donc lancés dans le projet d'envoyer, presque aux portes de l'espace, un engin autonome capable d'effectuer des relevés scientifiques, de prendre des images du sol ainsi que du ciel. Il s'agit ici d'une réelle aventure dans laquelle chaque instrument est choisi, calibré et testé dans des conditions extrêmes.

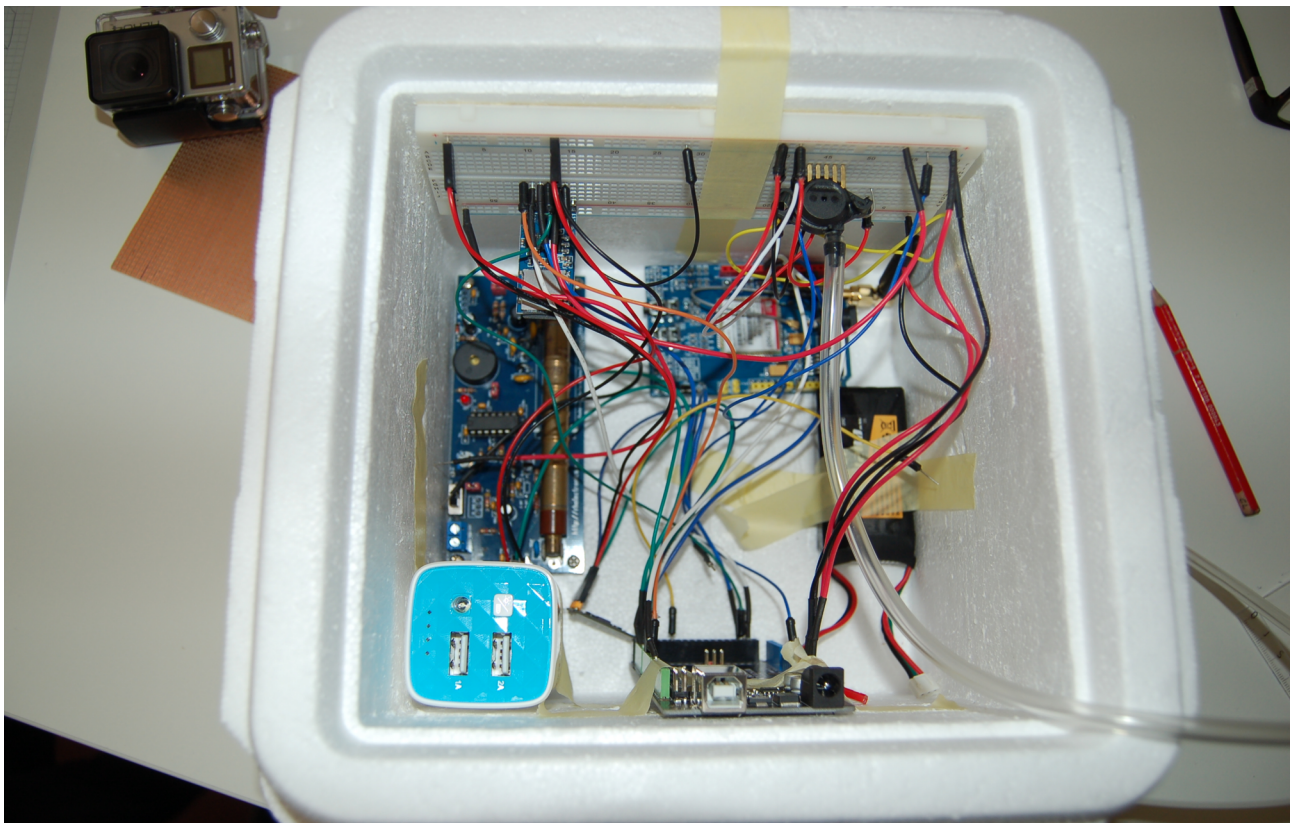


Figure 1 DSC 007

L'appareillage est, dans un premier temps, testé et maîtrisé par l'élève concerné, puis monté en collaboration. Afin d'assurer le suivi du groupe et le respect des échéances, j'ai établi un diagramme de Gantt. Les tâches étaient réparties ainsi :

¹ www.swiss-strato.ch vol Strato-11

- Un élève fait le lien en assurant la programmation d'une carte Arduino qui stocke les différentes mesures sur une puce SD. Son travail est également d'assurer la compatibilité et la simultanéité des mesures. Il s'occupe également du module GSM qui doit nous permettre de retrouver la nacelle.
- Un autre est responsable de la navigation (du gps embarqué), de la prévision de la trajectoire du ballon et de l'évaluation (simulation) de la vitesse de montée et de chute du ballon. Il détermine donc la durée du vol.
- Un autre mesure la radioactivité.
- Un autre s'intéresse au champ magnétique terrestre, à son intensité en fonction de l'altitude et à son orientation par rapport à la verticale.
- Un dernier effectue les mesures de température (intérieure à la nacelle et extérieure) ainsi que celle de la pression au moyen de deux capteurs différents.

Chaque élève a établi des protocoles afin de calibrer les capteurs dont il est responsable et a effectué un travail préalable afin de connaître leurs caractéristiques et de savoir à quel genre de résultat il doit s'attendre.

Le matériel embarqué dans la nacelle

- Un détecteur de radioactivité et son électronique particulière²
- Un capteur de pression³
- Un ensemble comprenant un gyroscope 3 axes, un détecteur de champ magnétique 3 axes, un accéléromètre 3 axes, un capteur de pression et de température⁴
- Un capteur de température pour l'extérieur⁵
- Un GPS modifié pour mesurer les hautes altitudes⁶
- Un module GSM⁷
- Deux batteries dont une de forte capacité
- Deux caméras⁸
- Un microcontrôleur Arduino MEGA complété par un enregistreur sur carte SD⁹

Le vol

Le 22 juin 2016, après passablement de stress et de travail dans l'urgence, l'équipe est prête et le ballon peut être gonflé à l'hélium. Il mesure alors environ deux mètres de diamètre.

² Tube SBM 20 électronique DIY Geiger counter kit trouvé sur ebay

³ MPX5100AP à éviter

⁴ 10 DOF Memes IMU Sensor de dfrobot.com

⁵ DS18B20+

⁶ Ublox NEO-6M sur ebay

⁷ Sim 900 GPRS GSM trouvé sur ebay

⁸ Une GoPro et un modèle bon marché

⁹ Trouvé chez dfrobot.com



Figure 2 DSC 00049

Son diamètre, en raison de la diminution de la pression atmosphérique, augmente au fur et à mesure de la montée, et atteint la dimension respectable de dix mètres lorsqu'il arrive dans la stratosphère. Evidemment, le latex dont il est constitué ne résiste pas à cette extension et il éclate.

Le ballon s'est promené entre Bienne, lieu du décollage et Arch où il s'est posé.

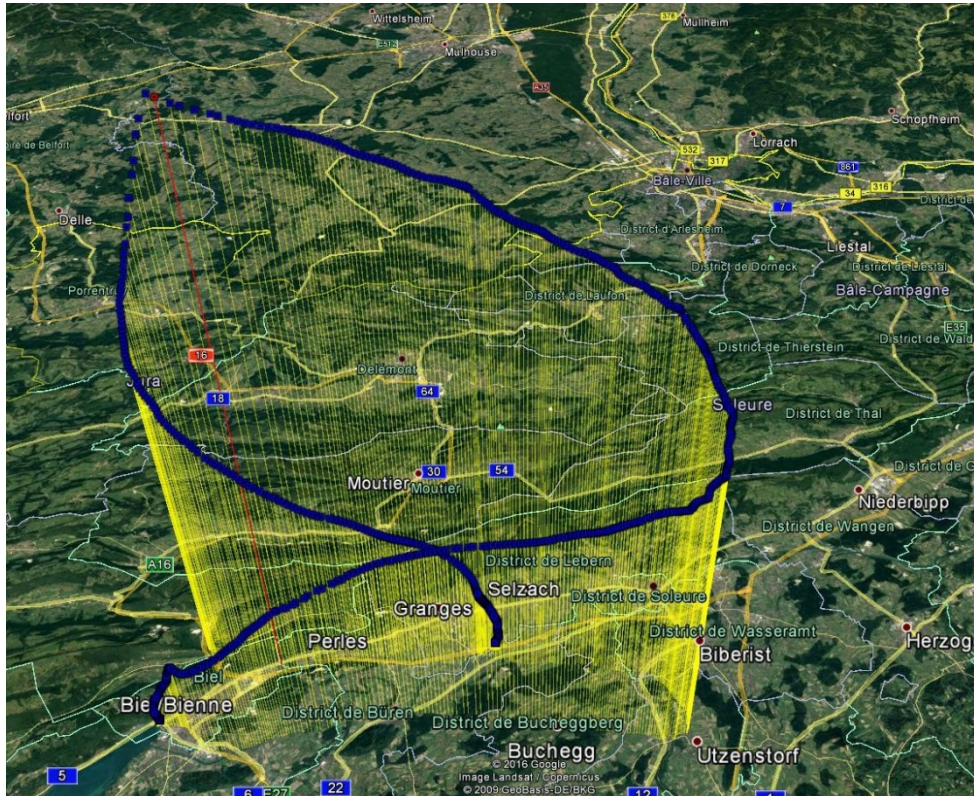


Figure 3 trajectoire2

Voici quelques mesures originales enregistrées lors de ce vol :

Les déplacements du ballon :

altitude au cours du temps

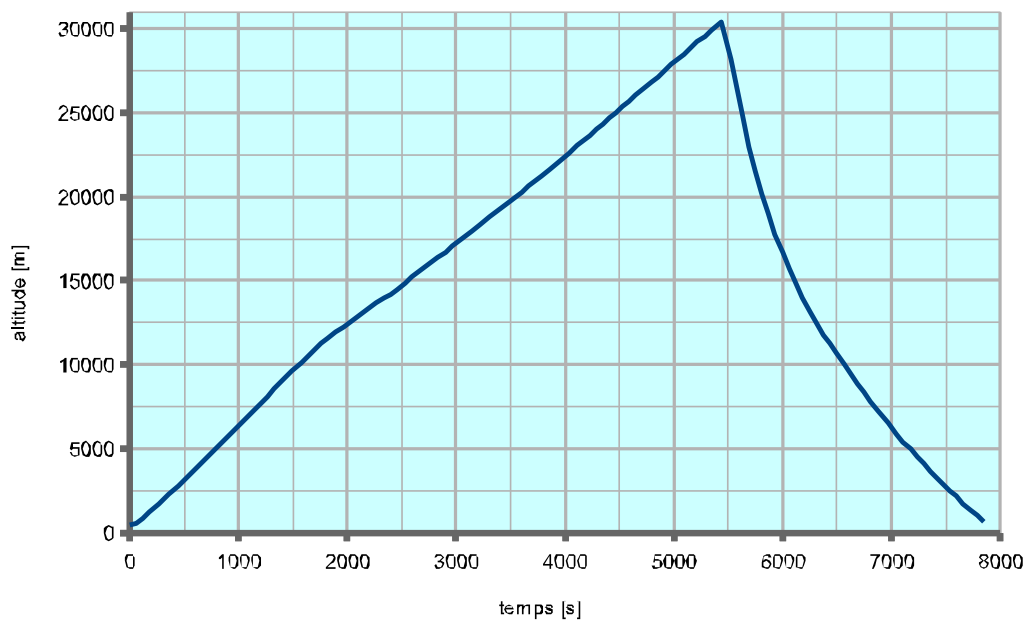


Figure 4 altitude

On constate que la vitesse de montée du ballon est constante. Dans la troposphère, c'est-à-dire jusque vers 12'000 m d'altitude, elle est de 6,2 m/s. Ensuite, dans la stratosphère, elle n'est plus que de 5,2 m/s. La troposphère est le siège de courants de convection. La stratosphère, considérée dans le sens vertical, ne présente pas une diminution de température, elle est donc plus stable.

Avant le lâcher, la vitesse de montée du ballon a été simulée en considérant les forces qui agissent et un frottement turbulent. L'expérience préalable a été menée en faisant tomber un ballon de taille plus modeste et en mesurant sa vitesse de chute.

Lors de la chute, sur le graphique, on voit bien que le parachute n'est pas très efficace au début du mouvement. En effet, la nacelle tombe à une vitesse de 27 m/s et, au-dessous de 20'000 m, le parachute ralentit un peu cette chute qui sera à peu près régulière, à partir de 10'000 m, à la vitesse de 7,3 m/s.

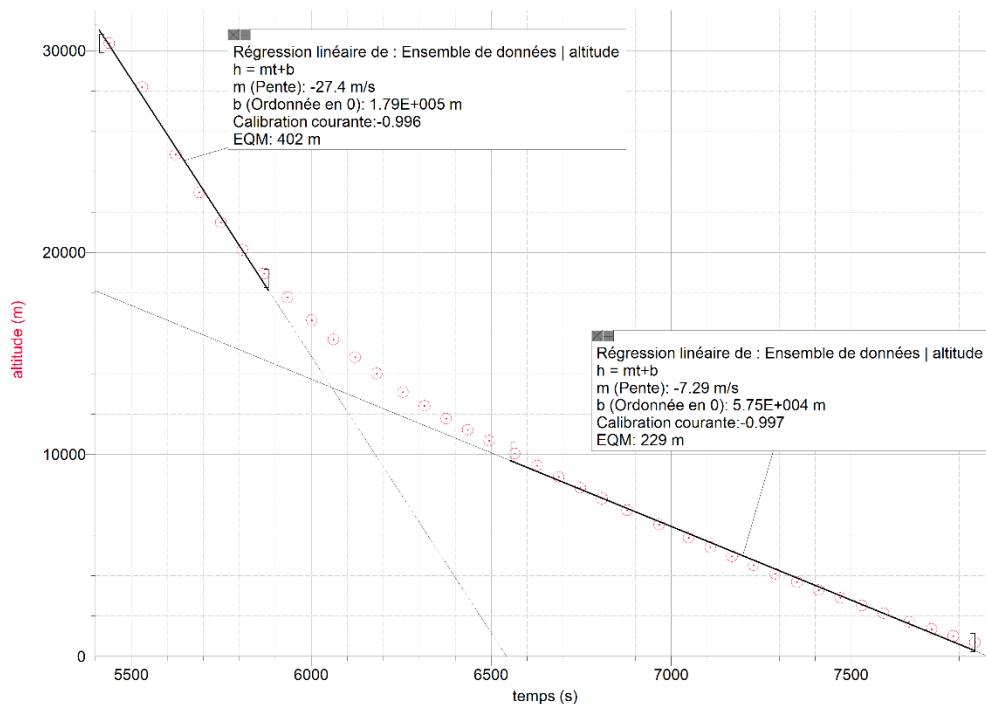


Figure 5 regression altitude

Le parachute ne s'est pas complètement déployé, il était gêné par les restes de latex du ballon qui l'accompagnait.



Figure 6 DSC-0049

Les vitesses horizontales du ballon étaient très faibles près du sol. Elles ont augmenté à partir de 4'000 m pour atteindre un maximum de 10 m/s vers 10'000 m¹⁰. Plus haut, elles étaient plutôt de l'ordre de 2-3 m/s.

La pression

En considérant l'accroissement de pression avec l'altitude, fonction du poids de l'air :

$$\Delta P = -\frac{\rho_{air}\Delta h S g}{S}$$

On obtient : $\Delta P = -\rho_{air}g\Delta h$

Soit :

$$dP = -\rho_{air}g dh$$

La loi des gaz parfaits $PV = nRT$ tenant compte que $m = nM$, on obtient :

$$\rho_{air} = \frac{PM}{RT}$$

En utilisant la loi précédente,

$$\frac{dP}{P} = -\frac{Mg}{RT} dh$$

Et donc, après intégration :

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = -\int_0^h \frac{Mg}{RT} dh$$

Ainsi :

$$P = P_0 \exp\left(-\int_0^h \frac{Mg}{RT} dh\right)$$

Le problème est que g dépend légèrement de h . Si on la considère constante, l'approximation est très acceptable. En revanche, T varie tout de même avec la hauteur. Si on considère un modèle

¹⁰ Une analyse du jetstream, même assez faible au-dessus de l'Europe est envisageable.

simplifié, en acceptant que $T=250$ K, soit environ la température moyenne rencontrée sur le trajet, on obtient un résultat assez satisfaisant.

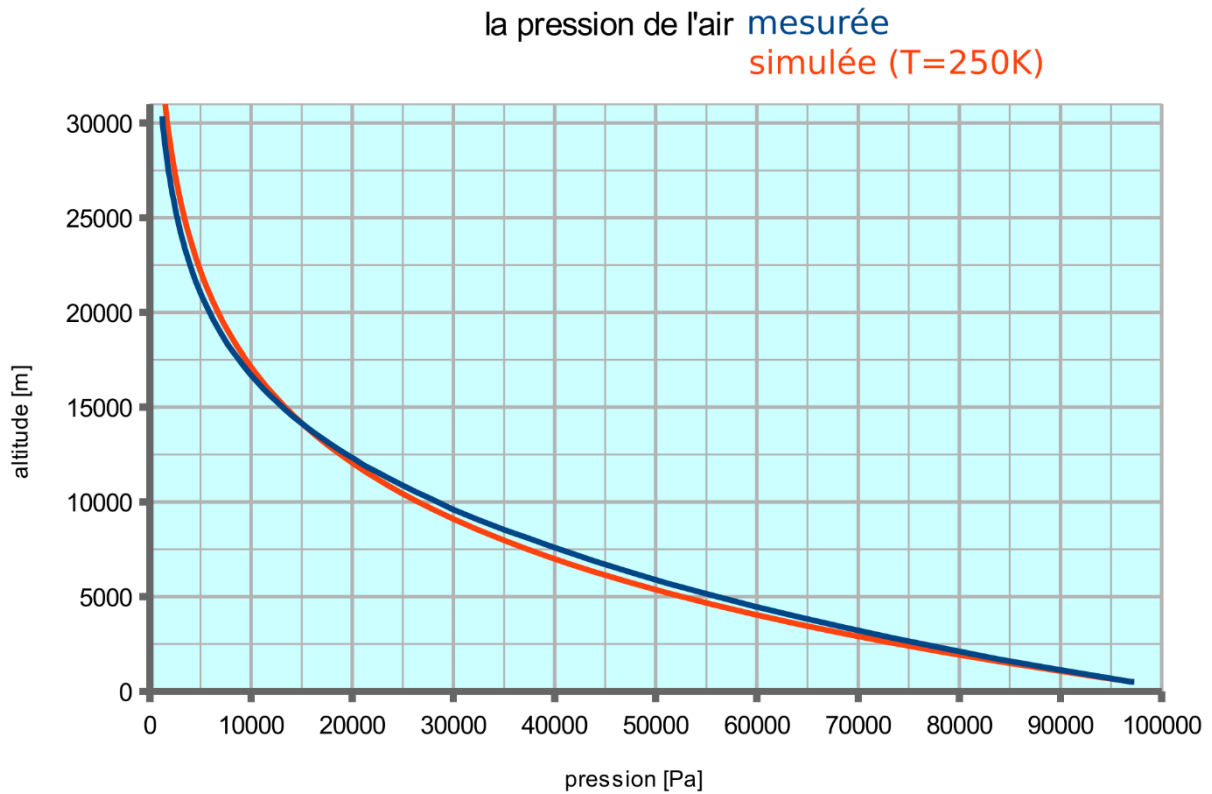


Figure 7 pression_avec_simulation_250K

La loi tracée est donc :

$$P = P_0 e^{-\frac{Mg}{RT}h}$$

Température et radioactivité

Radioactivité et température extérieure

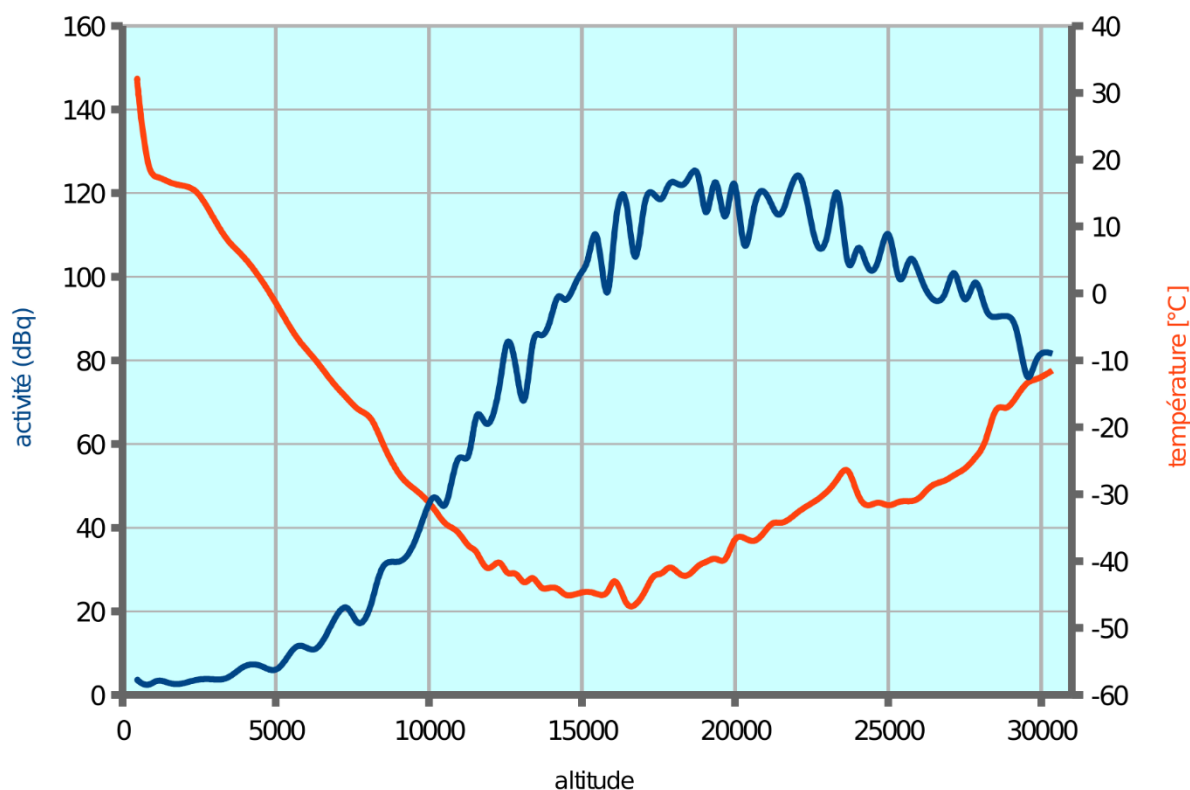


Figure 8 radioactivité_et_température

Comme on peut le voir sur le graphique, la température atteint le minimum de -48°C vers 17'000 m. En fait elle décroît linéairement dans la troposphère à raison de $0,6^{\circ}\text{C}$ par 100 m. Ensuite, elle est relativement stable jusque vers 20'000 m et puis elle augmente dans la stratosphère.

Le maximum de radiation observé (maximum de Pfortzer) est connu depuis le début du 20^e siècle. En effet, à haute altitude le rayonnement est constitué de protons et noyaux primaires. Ils commencent à produire, en descendant dans l'atmosphère, des pions secondaires, ce qui augmente le flux de particules chargées. Comme ils perdent de l'énergie, ils sont finalement stoppés et cessent de produire des pions. Ces derniers, en descendant, se désintègrent ou sont absorbés. Ainsi, le flux, après être passé par le maximum, diminue¹¹.

Les mesures prises sur le champ magnétique ne sont pas probantes. Le détecteur a vraisemblablement été influencé par le capteur de radiation et a donné des résultats très dispersés. Clairement, un meilleur calibrage du système de mesure aurait permis d'obtenir des informations et de tirer des conclusions intéressantes. Lors d'un prochain lâcher, nous testerons probablement un modèle différent de capteur¹².

La fin du voyage

On aperçoit, sur l'image suivante, un morceau du ballon qui se détache du ciel devenu noir. On distingue les lacs de Neuchâtel, Thoune et Brienz ainsi que le Léman. Si la couverture nuageuse était moins dense sur le sud des Alpes, on pourrait apercevoir la mer !

¹¹ Cosmic Ray Physics, S. Hayakawa, John Wiley & Sons, feb 25 1970

¹² Peut-être un CMPS11



Figure 9 eclatement-2016-06-25-10h51m51s47

Conclusion

La richesse des données obtenues est telle que plusieurs travaux de maturité sur ce thème se justifie parfaitement. L'engagement sous forme d'équipe est très motivant, mais oblige à un respect scrupuleux des délais. En dehors de l'exploitation des données scientifiques, ce type de travail, par les images obtenues, fait parler de lui dans les médias. C'est ainsi l'occasion de valoriser des élèves et, pour le public, de reconnaître leur motivation.

Avec cet expérience, les parents, les collègues ont l'opportunité d'aborder, sans crainte, des thèmes de physique et peuvent se familiariser avec des représentations graphiques de modèles.

Lancez-vous et lâchez-en !