

**“Les accélérateurs cosmiques au lycée”  
COSMIX**

Mars 2013

**Benoit Lott, [lott@cenbg.in2p3.fr](mailto:lott@cenbg.in2p3.fr)  
Denis Dumora, [dumora@cenbg.in2p3.fr](mailto:dumora@cenbg.in2p3.fr)  
Romain Rousseau, [rousseau@cenbg.in2p3.fr](mailto:rousseau@cenbg.in2p3.fr)**

**Centre d’Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan  
IN2P3/CNRS - Université de Bordeaux 1**

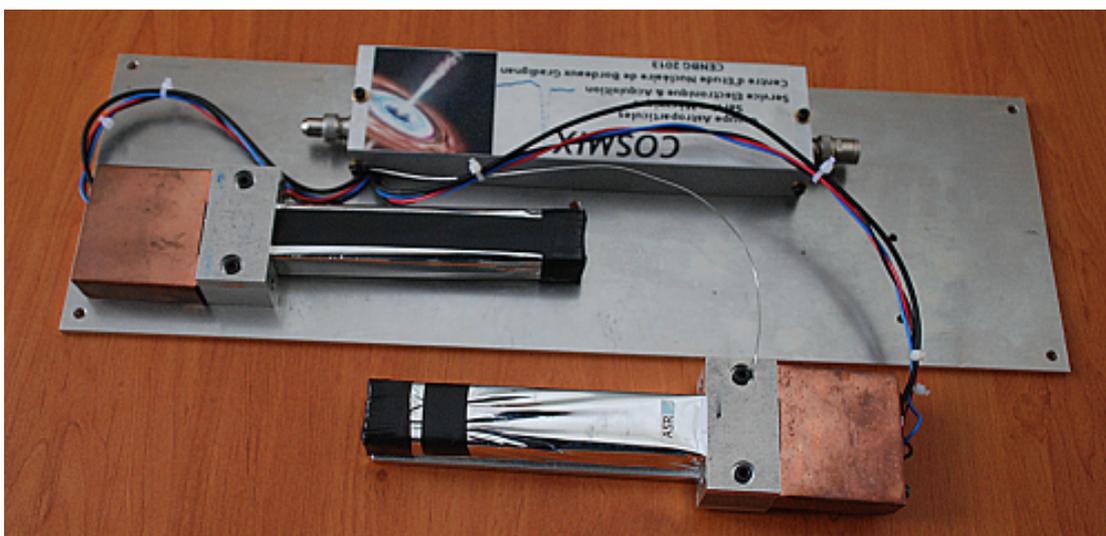
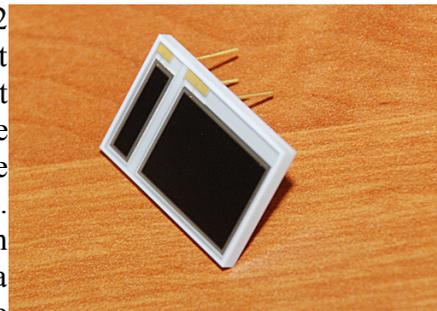
## Le détecteur de muons

Le projet Cosmix vise à mettre à disposition des professeurs de lycée des détecteurs de muons du rayonnement cosmique très simple d'utilisation. Ces détecteurs mettent à profit le « recyclage » de barreaux de scintillateur d'iodure de Césium (CsI) et leur électronique associée, utilisés précédemment pour des tests avant le lancement du télescope spatial à rayons gamma Fermi-LAT en 2008. Ces barreaux sont exactement similaires à ceux équipant le calorimètre du Fermi-LAT, mesurant l'énergie des rayons gamma. Le détecteur est robuste, léger, facilement transportable dans une petite mallette et ne nécessite qu'un câble USB pour son alimentation.

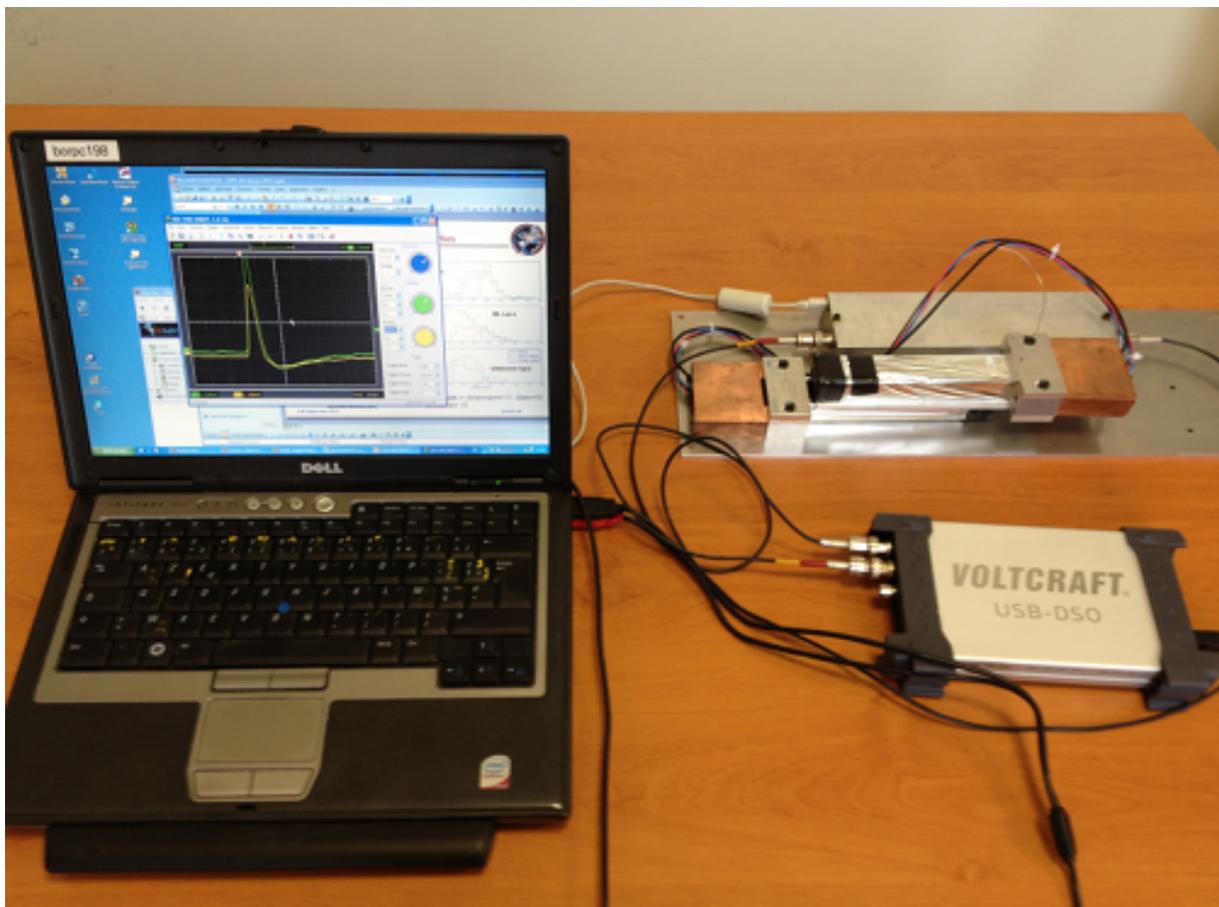
Au passage d'une particule chargée, un scintillateur produit de la lumière visible, qui peut être convertie en impulsion électrique par un photomultiplicateur ou une photodiode, comme ici.



La figure ci-dessus présente un barreau nu (dimensions 32 cm x 3 cm x 2 cm, poids ~1kg) du Fermi-LAT. On aperçoit les 4 broches dorées placées aux extrémités correspondant aux connecteurs des photodiodes de Silicium. Chaque photodiode est en fait double, comme montré ci-contre (seule la partie de grande surface est utilisée dans Cosmix). La charge électrique collectée est convertie en une impulsion en tension par des préamplificateurs placés au contact de la photodiode. Cette impulsion est amplifiée et mise en forme par des amplificateurs. Afin de pouvoir disposer de deux détecteurs indépendants, le barreau a été coupé en deux, comme montré ci-dessous. Les boîtiers cuivrés contiennent les préamplificateurs alors que les amplificateurs sont logés dans le boîtier en aluminium. Les signaux correspondant à chacun des deux demi-barreaux sont disponibles sur des sorties BNC.



L'alimentation de l'ensemble se fait grâce à un simple câble micro-USB (5V). La figure ci-contre montre l'entrée USB pour l'alimentation. La consommation est de 150 mA. Le dispositif est sans aucun réglage et inusable. Dans l'utilisation que nous en avons au CENBG (photo ci-dessous), nous visualisons les signaux sur un PC portable à l'aide d'un petit oscilloscope numérique (cout : 300 euros) également alimenté par USB, ce qui rend le dispositif absolument transportable et utilisable sans le secteur (et donc opérationnel en voiture, en montagne, en avion...). Cependant n'importe quel oscilloscope très élémentaire de lycée permet de visualiser ces signaux.



## Utilisation

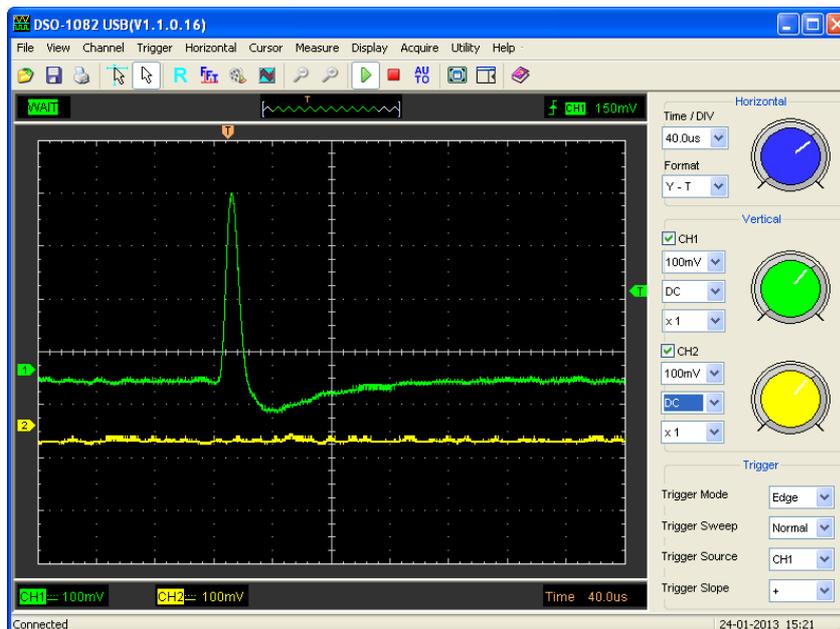
Pour une incidence verticale, les muons atmosphériques (qui ont une énergie moyenne d'environ 4 GeV et un flux de  $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ) déposent une énergie d'environ 12 MeV dans le détecteur (il est à noter que c'est grâce à cette technique de détection des muons au sol que le LAT a été calibré<sup>1</sup> avant son vol). Ce dépôt d'énergie correspond à des impulsions de plusieurs centaines de mV. Cette amplitude est largement supérieure à celles provenant

<sup>1</sup> Dans ce cas, la calibration consistait à établir la correspondance entre l'amplitude des signaux électroniques enregistrée par le système d'acquisition des données et le dépôt d'énergie (en MeV) dans le détecteur.

d'autres sources de rayonnement de la radioactivité naturelle ou du bruit propre du détecteur, ce qui rend le détecteur *exempt de tout bruit de fond significatif*.

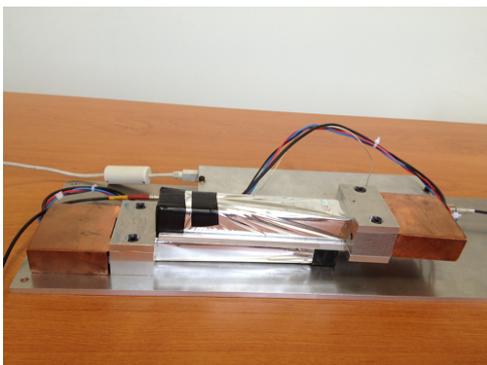
**Détecteurs éloignés (quelques cm).** Chaque détecteur compte indépendamment à environ 50 coups/min pour un seuil de déclenchement de l'oscilloscope de 100 mV, ce qui est compatible avec le taux de  $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  donné dans la littérature). Les taux de comptage des deux détecteurs sont quasiment identiques pour le même seuil de déclenchement de l'oscilloscope. La distribution angulaire des muons étant proportionnelle à  $\cos^2\theta$ , où  $\theta$  est l'angle de leur trajectoire par rapport à la verticale, quasiment aucun muon ne traverse les deux barreaux simultanément, et il y a très peu de coïncidences. En fait, la majorité de celles-ci sont dues à l'existence de gerbes atmosphériques où deux particules *différentes* sont détectées par les deux barreaux.

### Configuration « barreaux éloignés »



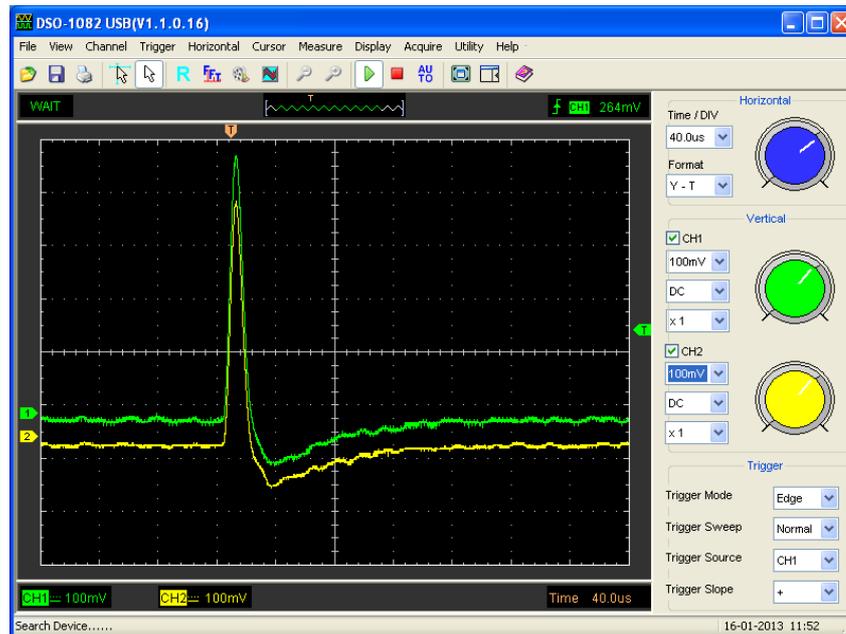
Capture d'écran d'un oscilloscope montrant la non-coïncidence des signaux provenant de deux barreaux éloignés.

### Détecteurs superposés



Si l'on superpose les deux demi-barreaux, les coïncidences deviennent très fréquentes, de l'ordre de 40% ( $\sim 20$  coïncidences/min), prouvant que la majorité des muons sont bien verticaux. Le taux de coïncidence décroît si l'on diminue le recouvrement entre les deux détecteurs soit longitudinalement soit transversalement.

## Configuration « barreaux superposés »



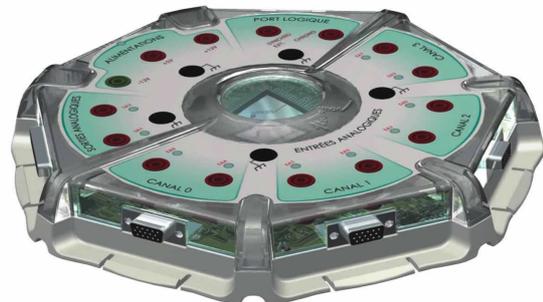
Capture d'écran d'un oscilloscope montrant la coïncidence des signaux provenant de deux barreaux superposés.

## Les rayons cosmiques en utilisant le matériel du Lycée

La visualisation des signaux analogiques issus de COSMIX peut se faire aisément à l'aide d'un oscilloscope du Lycée. Les réglages caractéristiques pour obtenir une représentation correcte à l'écran (20 $\mu$ s/carreau pour la base de temps et 100mV/carreau pour le gain des voies) sont accessibles aux centrales d'acquisition de données modernes que l'on peut trouver au Lycée.

### Matériel

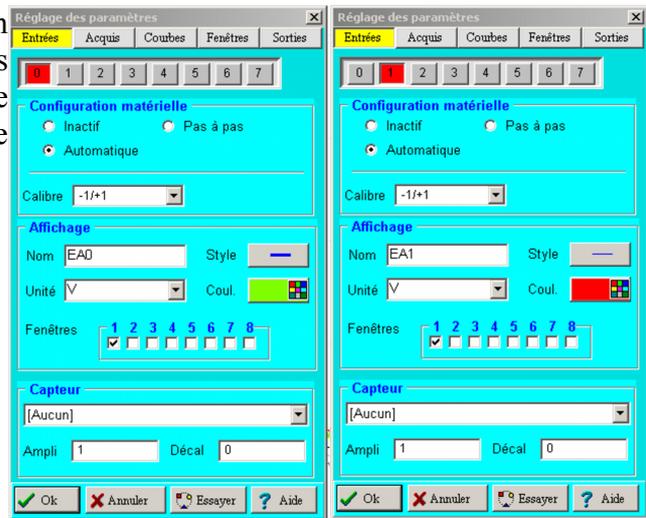
Les données suivantes ont été prises à l'aide d'une centrale Eurosmart Sysam-Sp5 associée au logiciel Synchronie 2003, matériel mis d'ordinaire à la disposition des étudiants du Master Métiers de l'Enseignement en Sciences Physiques de l'Université Bordeaux I.



Les deux sorties analogiques de COSMIX doivent être connectées à l'aide d'un câble BNC-banane aux entrées analogiques EA0 et de la centrale d'acquisition.

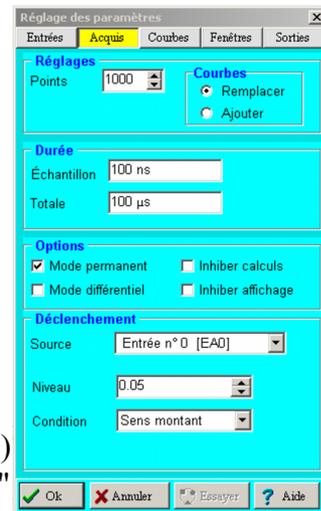
## Réglage des paramètres de Synchronie 2003

**Entrées** . Chaque voie est configurée en mode automatique. Les signaux analogiques ayant pour la plupart d'entre eux une amplitude inférieure à 500mV, un choix de calibre -1V/+1V est judicieux.



### Acquisition (fonctionnement type oscilloscope).

- Réglage
  - Points : 1000
  - Courbe : Remplacer
- Durée
  - Échantillon : 100ns
  - (soit une durée totale de 100µs)
- Options
  - Mode permanent
- Déclenchement
  - Source : Entrée n°0 : EA0
  - Niveau : 100mv (minimum proposé par le logiciel) convient, mais il est possible de rentrer "à la main" un seuil de 50mV (0.05) qui donnera un meilleur rendu à l'écran
  - Condition : Sens montant



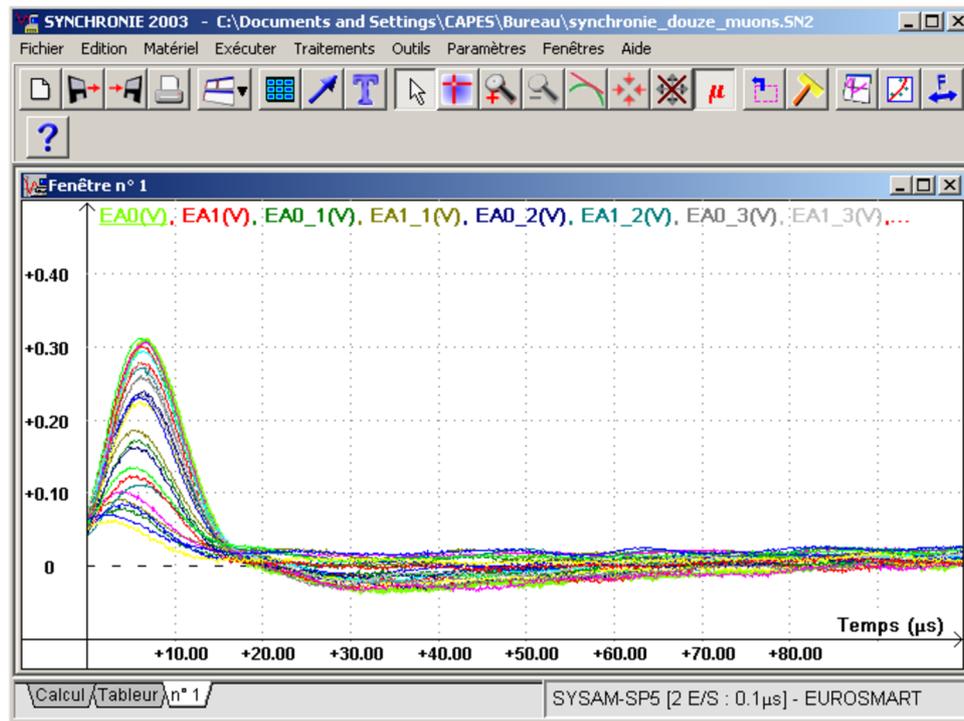
### Fenêtre.

Régler la configuration de l'échelle des ordonnées sur **MANUELLE** :

- Minimum : -100m
- Maximum : 500m



Lancer l'acquisition (F10) ...

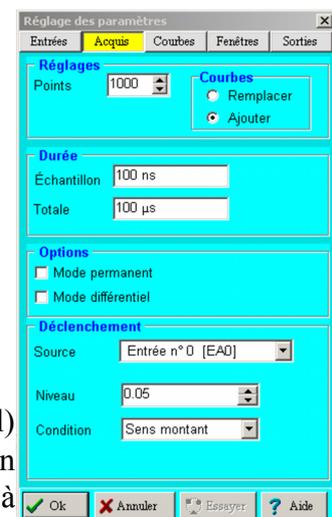


**Sauvegarder les signaux de plusieurs muons**

**Entrées .** Même configuration que précédemment

**Acquisition (fonctionnement une seule acquisition + ajouter).**

- Réglage
  - Points : 1000
  - Courbe : **Ajouter**
- Durée
  - Echantillon : 100ns
  - (soit une durée totale de 100µs)
- Options
  - Pas d'option sélectionnée
- Déclenchement
  - Source : Entrée n°0 : EA0
  - Niveau : 100mv (minimum proposé par le logiciel) convient, mais il est possible de rentrer "à la main" un seuil de 50mV (0.05) qui donnera un meilleur rendu à l'écran
  - Condition : Sens montant



Lancer l'acquisition (F10) ...



```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Tue Mar 12 11:05:01 2013
Lecture d'un fichier tableau Synchronie 2003
@author: dumora
"""
from pylab import *

def change2usdecimalsep(s):
    return '.'.join(s.split(','))

fichier = open("synchronie_cinq_muons.txt","r")

titre = fichier.readline()
config = fichier.readline()
noms_variables = fichier.readline()[:-2].split(";")
unites_colonnes = fichier.readline()[:-2].split(";")
dt_colonnes = [float(s.split('=')[1]) for s in fichier.readline()[:-2].split(";")]

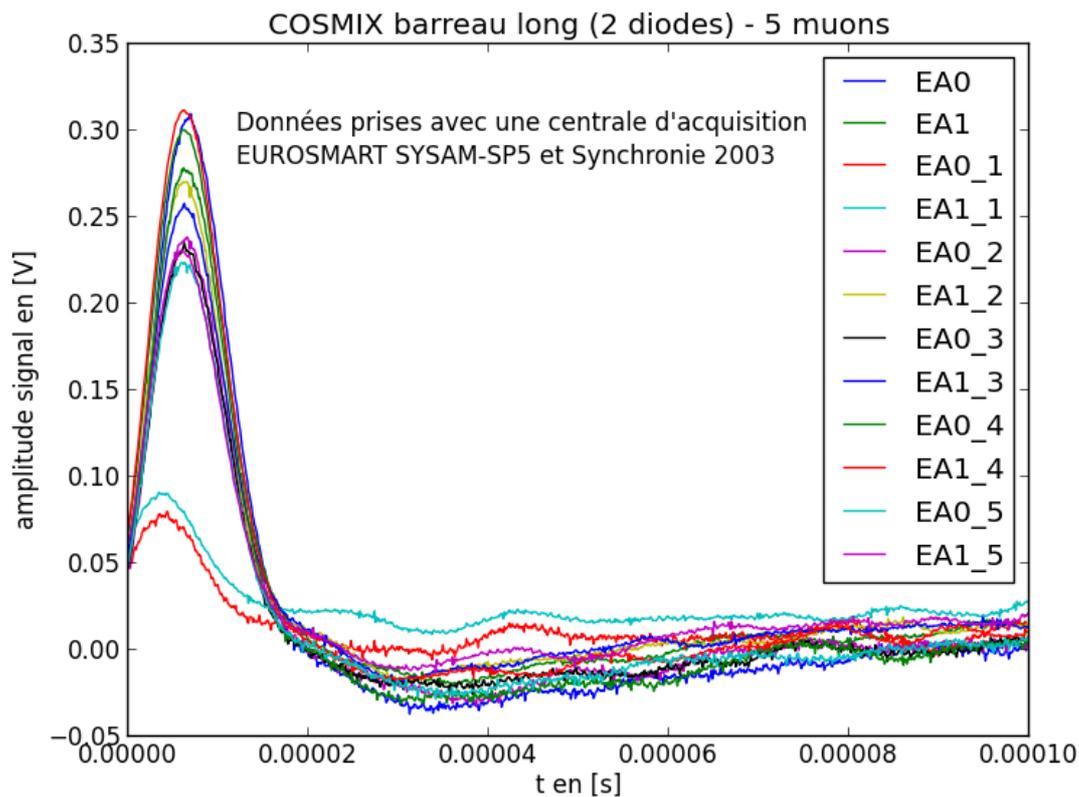
donnees = []

for i,n in enumerate(noms_variables):
    donnees += [{"Nom":n,"Unites":unites_colonnes[i],"Dt":dt_colonnes[i],"donnees":
    []}]

for line in fichier.readlines():
    l = change2usdecimalsep(line[:-2])
    data = l.split(';')
    for i,d in enumerate(data):
        donnees[i][i+"donnees"] += [float(d)]

for i in range(1,len(donnees)):
    plot(donnees[0][i+"donnees"],donnees[i][i+"donnees"],label=donnees[i][i+"Nom"])
title('COSMIX barreau long (2 diodes) - 5 muons')
text(0.000012,0.3,ur"Données prises avec une centrale d'acquisition")
text(0.000012,0.28,ur"EUROSMART SYSAM-SP5 et Synchronie 2003")
xlabel('t en [s]')
ylabel('amplitude signal en [V]')
legend()
show()

```



## Compter les muons

Depuis le 14 mars 2013, COSMIX a pris une nouvelle forme et s'est enrichi de nouvelles possibilités de mesures.

Le détecteur est désormais solidarisé de sa mallette de transport à l'aide de puissants Velcro, ce qui rend le dispositif transportable dans de meilleures conditions de sécurité.



La platine supportant le détecteur a été élargie afin de pouvoir recevoir les nouveaux composants permettant de mettre en œuvre le comptage d'événements.

**La présence de ce nouveau dispositif ne modifie en rien la possibilité d'observer les signaux analogiques issus du détecteur, les connecteurs BNC sont toujours accessibles.**

## Discriminateur



Le comptage se fait à partir de signaux logiques produits par deux discriminateurs (un par voie) dont leur seuil a été réglé à 100mV, c'est à dire que chaque discriminateur génère un signal logique (TTL, tension carrée à +5V) à partir du moment où le signal analogique franchit le seuil de 100mV.

Si les deux signaux logiques sont en coïncidence temporelle, un troisième signal logique est produit.

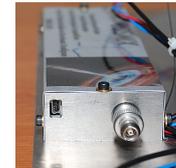
## Module de comptage

L'acquisition des trois signaux logiques sortant du discriminateur se fait à l'aide d'une carte Arduino à laquelle est associé un afficheur LCD. Une sauvegarde des données peut aussi être effectuée sur une carte SD.



### Attention,

- L'alimentation de l'ensemble du dispositif se fait par l'intermédiaire du connecteur USB de la carte Arduino (celui-ci) doit impérativement être branché.
- Il est cependant possible si l'on ne veut avoir accès qu'aux signaux analogiques de sortie du détecteur d'alimenter directement le module de mise en forme des signaux par le connecteur USB situé sur le côté du boîtier



### Deux modes de comptage

Le dispositif permet de configurer deux modes de comptage, l'un à durée illimitée ("dit infini"), l'autre à durée finie programmée à l'avance.

### Configuration et pilotage de l'acquisition

La configuration et le pilotage de l'acquisition se fait par l'intermédiaire des 5 boutons de commande présents en dessous de l'afficheur LCD.

L'appui sur le bouton **Selection** permet de passer du menu **Acquisition** au menu **Configuration**.



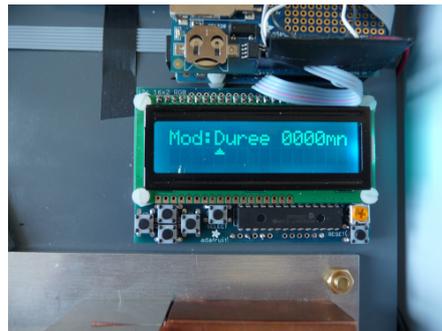
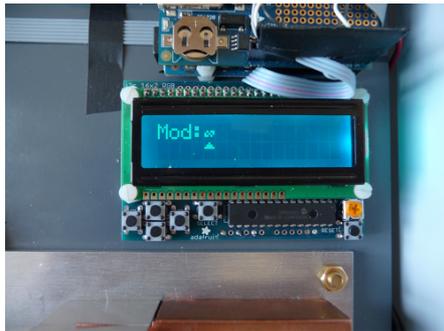
Le rôle de chacun des 4 boutons de direction change avec le menu sélectionné.

### Sélectionner le mode de comptage

Le mode de comptage à l'allumage est le mode **infini**.

La sélection du menu mode de comptage se fait en appuyant sur le bouton **Sélection**.

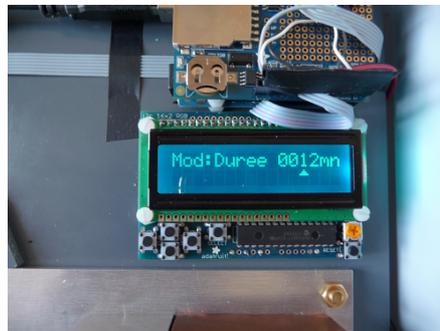
Lorsque le menu **Configuration** est actif, la couleur du fond de l'afficheur est **cyan**. Et la ligne supérieure de celui-ci doit afficher **Mod :**



La configuration, se fait à l'aide des boutons **Haut** et **Bas** pour changer de valeur, à l'aide des boutons **Gauche** et **Droite** si le mode Durée est sélectionné pour accéder au réglage de la durée.

Sur la ligne inférieure de l'afficheur, le signe ▲ indique soit le paramètre modifié par une pression sur **Haut** et **Bas**, le mode ou la décade de durée.

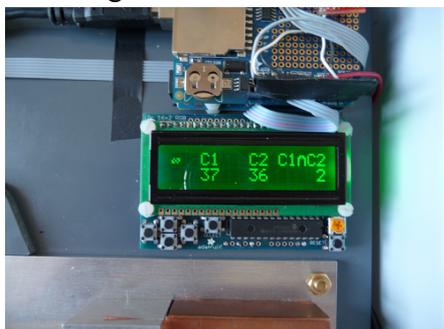
**Remarque** : la durée est définie en minutes (de 1 à 9999).



### Acquisition des comptages

Lorsque le menu **Acquisition** est actif, la ligne supérieure de l'afficheur indique, le mode de comptage (∞ ou D pour durée) ainsi que le nom des voies de comptage (C1 pour la voie 1, C2 pour la voie 2 de C1∩C2 pour la coïncidence). La ligne inférieure donne la valeur des compteurs.

Par exemple à l'allumage, le mode par défaut est ∞ et le comptage démarre automatiquement, l'affichage est alors



Le **début de comptage** ou l'**arrêt manuel** de celui-ci se fait en appuyant sur le bouton **Droite**.

Le bouton **Gauche** sert à la **remise à zéro** des compteurs.

### Comptage à durée infinie (mode par défaut à l'allumage)

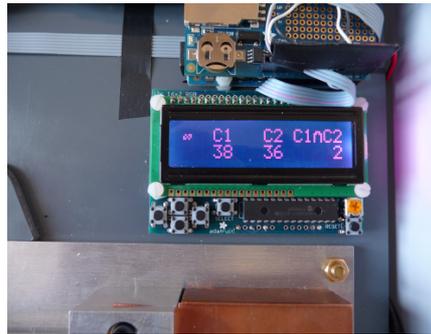
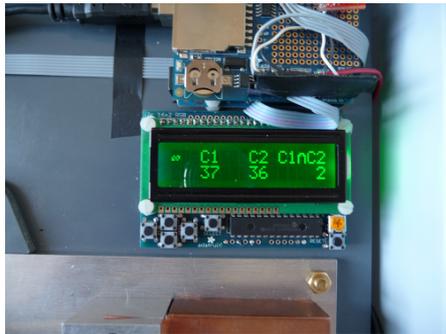
Dans ce mode, le comptage démarre lorsque le bouton **Gauche** est pressé, l'acquisition se fait jusqu'à que le bouton **Gauche** soit enfoncé de nouveau.

### Comptage à durée finie

Dans ce mode, le comptage démarre lorsque le bouton **Gauche** est pressé, l'acquisition se fait pendant la durée définie dans le menu **Sélection**.

**Attention, lancer une nouvelle acquisition ne remet pas les compteurs à zéro. Ceux-ci doivent être initialisés en appuyant sur la touche Gauche.**

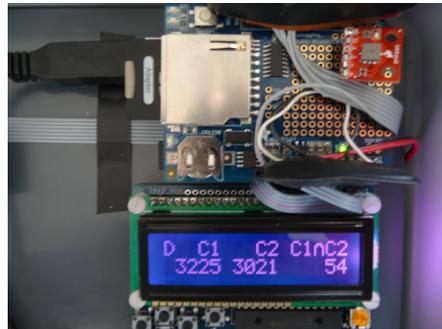
**Au départ de l'acquisition la couleur de l'afficheur passe au **vert**, elle passe au **violet** quand l'acquisition est terminée.**



### Quelques résultats caractéristiques

#### Barreaux séparés.

Le taux de comptage observé est d'environ 0.9Hz (~55 coups/minute) pour chaque voie. Le taux de coïncidences est aux alentours de 2 %.



#### Barreaux superposés.

Le taux de comptage observé est d'environ 0.9Hz (~55 coups/minute) pour chaque voie. Le taux de coïncidences est aux alentours de 40 %.



### Sauvegarde sur carte SD

Lorsque une carte SD est introduite dans le logement prévu à cet effet, les données vont pouvoir être sauvegardées automatiquement dans le fichier nommé **COSMIX.TXT**. Le format de sauvegarde est de type CSV (Coma Separated Variables). Ce fichier est directement

lisibles par un tableur. Il peut aussi être lu par un programme afin d'exploiter les données au delà du simple comptage (études statistiques par exemple).

A chaque nouvelle acquisition (démarrage par bouton **Droite**),  
une ligne '----- Nouvelle Acquisition -----' est ajoutée au fichier  
une seconde ligne donnant le mode d'acquisition et éventuellement la durée de l'acquisition est ajoutée.  
Suivent alors les données sous le format

Année, mois, jour, heure, minutes, secondes, température, pression,  
compteur1, compteur 2, coïncidence

2013,3,15,14,43,38,0,0,56,59,2

2013,3,15,14,43,38,0,0,56,59,2

2013,3,15,14,43,38,0,0,57,59,2

Données

2013,3,15,14,43,38,0,0,58,59,2

Acquisition précédente

2013,3,15,14,43,39,0,0,59,59,2

2013,3,15,14,43,39,0,0,61,59,2

2013,3,15,14,43,39,0,0,61,59,2

----- Nouvelle Acquisition -----

Nouvelle acquisition

Mod:Duree 0003mn

Mode d'acquisition

2013,3,15,14,44,15,0,0,1,1,0

Données

2013,3,15,14,44,16,0,0,2,1,0

2013,3,15,14,44,16,0,0,3,1,0

2013,3,15,14,44,17,0,0,5,1,0

2013,3,15,14,44,17,0,0,5,1,0

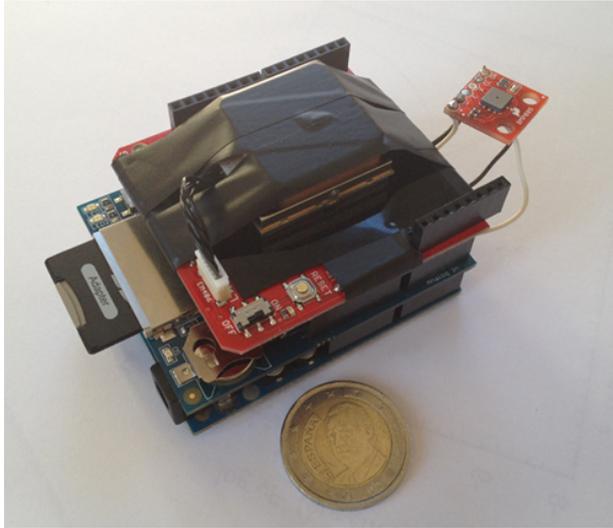
2013,3,15,14,44,17,0,0,5,2,0

2013,3,15,14,44,20,0,0,6,2,0

**Remarque :** Pour l'instant, les données de température et de pression sont laissées à 0.

## Exemple de mesure de la variation du taux de muons atmosphériques avec l'altitude

Un compteur d'impulsions sera ajouté pour compter le nombre de particules vues sur les

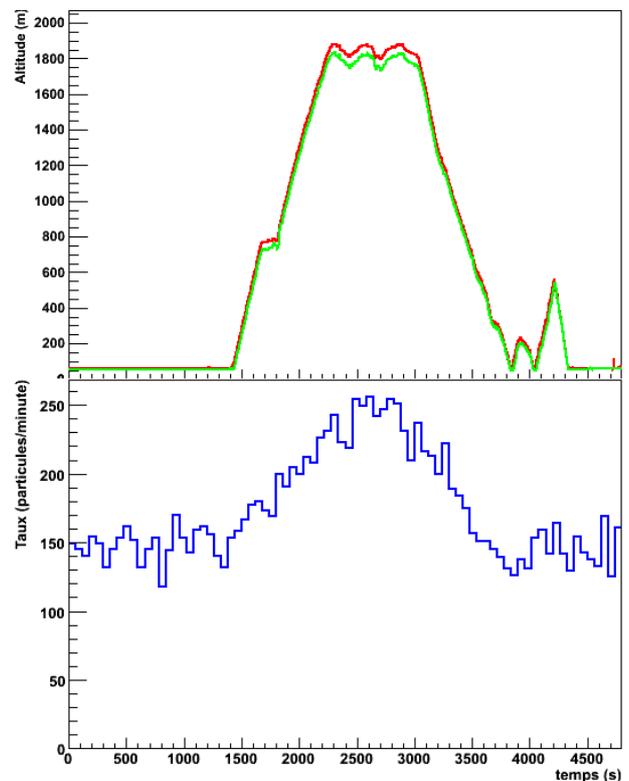


voies simples (chacun des barreaux) et la coïncidence. Des discriminateurs (produisant un signal logique quand les signaux analogiques excèdent un seuil, qui sera fixé à 100 mV) seront intégrés à l'électronique. Un prototype équipé d'un petit système d'acquisition basé sur micro-contrôleur Arduino, incluant un baromètre, une horloge, un GPS et un stockage de données sur une carte mémoire microSD a été testé avec succès.

La figure ci-contre montre le « système d'acquisition », constitué de 3 platines superposées, la pièce de 2 euros donnant l'échelle. Celle du bas correspond au

microcontrôleur Arduino, celle du milieu est dédiée au stockage de données et au support du baromètre (dépassant à droite) et celle du dessus au GPS (le module GPS est caché sous la bande adhésive noire). Une carte microSD de 2Gb peut enregistrer l'équivalent de plusieurs mois de données. Le coût d'un tel dispositif, qui est autonome dans la prise de données (sans être connecté à un ordinateur) est d'environ 100 euros.

Le prototype a été placé dans un avion de tourisme pour un vol d'environ 15 minutes à 6000 pieds (1800m) au sud de Bordeaux. Le profil du vol est illustré dans le panneau du haut de la figure ci-contre, où les altitudes provenant de la pression donnée par le baromètre, convertie en considérant une atmosphère standard, ainsi que du GPS sont représentées en rouge et vert respectivement (Les 2 pics à la fin du vol correspondent à des tours de piste, sans rapport avec l'expérience). L'accord entre les deux mesures est remarquable étant donné la calibration grossière du baromètre et des hypothèses faites sur l'atmosphère. La variation correspondante du taux de muons détectés dans un barreau entier est représentée dans le panneau du bas. Il y a une claire augmentation du taux corrélée à l'altitude de presque un facteur 2, le taux passant de 140 particules/minute à l'altitude de l'aéroport de départ (60m) à environ 250 particules/minute à 1800 m.



Le taux mesuré en fonction de l'altitude est montré dans la figure ci-contre, chaque point correspondant à une minute de données. La ligne noire représente un ajustement linéaire :

$$\text{taux} = \alpha \times \text{altitude} + \text{taux}_0$$

où la pente  $\alpha$  est trouvée égale à  $\alpha = 0.052 \pm 0.003$  particules/minute/mètre et le taux au niveau de la mer est  $\text{taux}_0 = 139 \pm 2$  particules/minute.

