

Notice de fonctionnement électronique du cosmodétecteur CosmoDCL

Christophe Lagoute, lycée Bellevue Toulouse

5 juillet 2010

[Site internet du projet <http://ch.lagoute.free.fr/CosmoDCL>]

[Texte adapté de C. Lagoute, BUP, **911** (1), 143 (2009)]

I. Fonctionnement du circuit

L'électronique de détection comporte un premier étage de discrimination à seuils réglables et de mise en forme du signal, un circuit logique de combinaison pour la détection en coïncidence, et un étage de sortie vers le compteur de l'interface NI-USB6008 ainsi qu'une DEL et un buzzer de détection (Fig. 1). Pour rafraîchir ou approfondir ses connaissances d'électronique, nous conseillons un ouvrage d'électronique fondamentale analogique et numérique à l'attention des physiciens [1].

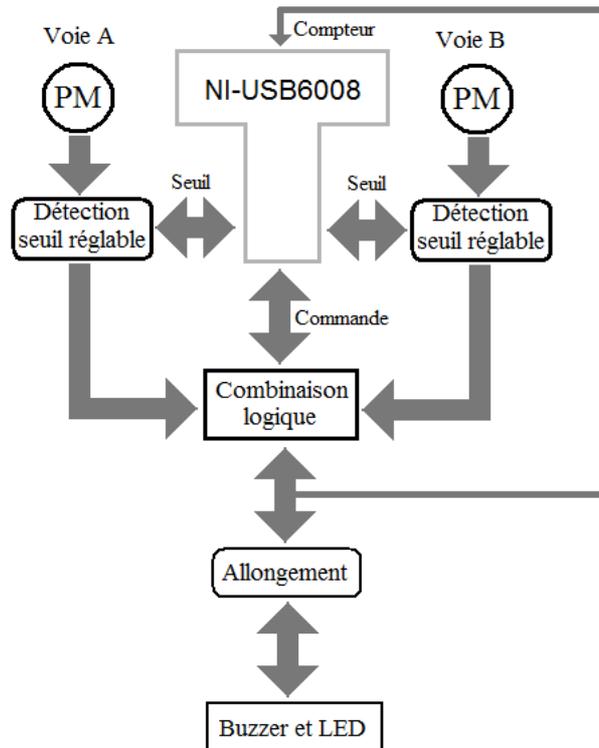


FIG. 1 – *Fonctionnement du circuit*

II. Contrôle des signaux de sortie des photomultiplicateurs

En sortie des photomultiplicateurs (PM), les signaux électriques créés par les particules rapides traversant le scintillateur, se présentent sous la forme d'impulsions de tension négatives $-u_{PM}(t) < 0$,

d'amplitude comprise typiquement entre -200 mV et -2 V . Sur un oscilloscope standard de bande passante 60 MHz , on observe une durée maximale des impulsions de 10 ns (Fig. 2). Les impulsions en sortie du PM sont en réalité moins étalées dans le temps (environ 1 ns). L'étalement observé n'est dû qu'à la bande passante limitée de l'oscilloscope. Un instrument de plus large bande passante (200 MHz par exemple) permet d'observer des impulsions plus brèves, de quelques nanosecondes.

L'impédance caractéristique de sortie du PM étant de $50\ \Omega$, on évite la distorsion des impulsions en adaptant les impédances d'entrées du discriminateur par une résistance de $50\ \Omega$. En l'absence de cette adaptation, les impulsions décroissent exponentiellement avec une durée caractéristique de quelques dizaines de microsecondes.

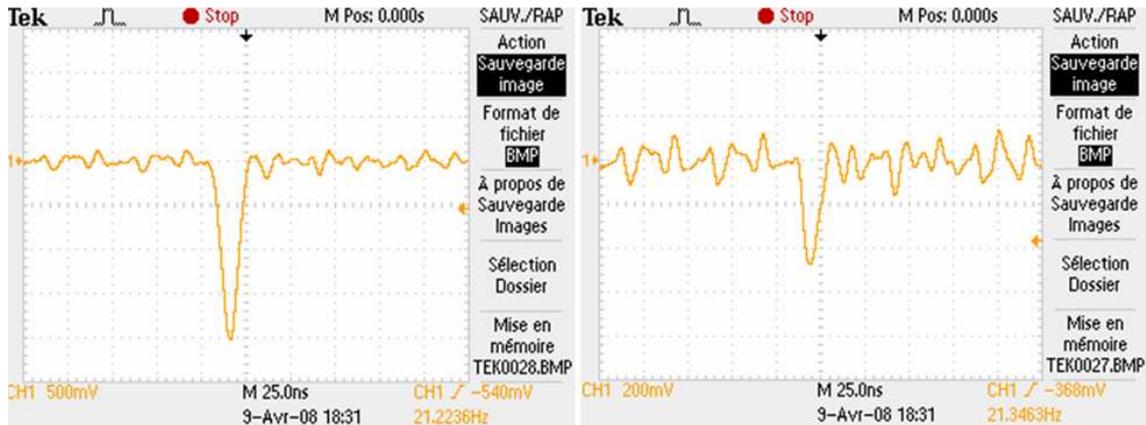


FIG. 2 – Signaux en sortie d'un PM

III. Alimentation du discriminateur

L'alimentation 5 V du circuit est fournie par l'interface NI-USB6008 entre les bornes USB32 (masse) et USB31 (5 V). On désignera dans la suite les bornes numérotées x de l'interface NI-USB6008 par l'indication $\text{USB } x$.

IV. Discriminateur

IV.1. Composants de base

Les composants de base du discriminateur sont : le comparateur rapide AD8561, de durée de montée $3,8\text{ ns}$, qui est utilisé pour mettre en forme les signaux d'entrée et de sortie, et les circuits logiques CMOS de la série rapide 74F, dont les temps de réponse sont de quelques nanosecondes.

IV.2. Description du discriminateur

L'entrée des voies A et B du discriminateur se compose des étages électroniques suivants (Fig. 3) : une résistance $R_1 = 50\ \Omega$ d'adaptation d'impédance, des condensateurs C_1 et C_2 (C_3 et C_4 pour la voie B) de capacités 100 nF qui découplent les signaux variables sortis du PM des tensions stationnaires du circuit, un diviseur de tension constitué par les résistors $R_5 = R_6 = 12\text{ k}\Omega$ (R_7 , R_8 pour la voie B) et $R_3 = 10\text{ k}\Omega$ (R_4 pour la voie B), le comparateur AD8561 et son circuit d'allongement des signaux. Le diviseur est mis sous tension grâce à la sortie USB15 de l'interface.

Afin d'analyser le fonctionnement de ce circuit, appliquons le théorème de superposition. Considérons les sources stationnaires d'une part, et celle variable que constitue le PM, d'autre part ; on obtient alors respectivement les deux circuits représentés sur la figure 4.

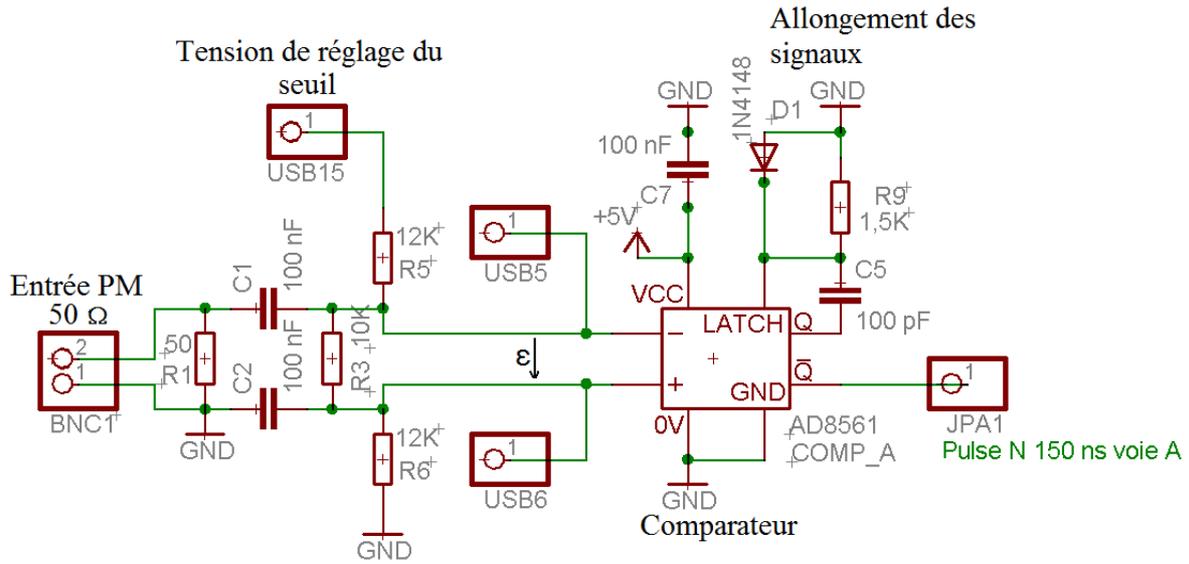


FIG. 3 – Discriminateur

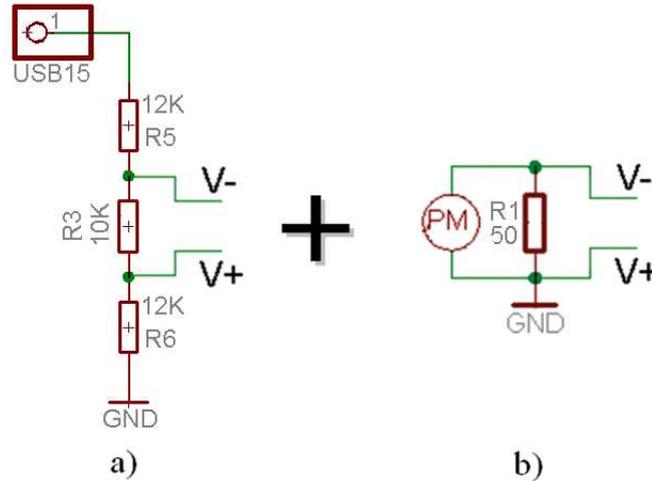


FIG. 4 – Circuits équivalents a) Régime stationnaire b) Régime variable

i) On passive les sources variables (Fig. 4a) : les condensateurs C_1 et C_2 se comportant comme des coupe-circuits, les courants d'entrée du comparateur, de l'ordre du μA , étant négligeables, les potentiels V_+ et V_- des entrées du comparateur sont donnés par les relations habituelles des diviseurs de tension :

$$V_+ = \frac{R_6}{R_6 + R_3 + R_5} U_{15} \quad \text{et} \quad V_- = \frac{R_6 + R_3}{R_6 + R_3 + R_5} U_{15} \quad \text{d'où} \quad V_+ - V_- = -\frac{R_3}{R_6 + R_3 + R_5} U_{15} = -U_s$$

U_{15} étant la tension de réglage du seuil comprise délivrée par la borne USB15 (USB14 pour la voie B), réglable à l'aide du logiciel de pilotage du cosmodétecteur. Puisque $U_s > 0$, la tension appliquée à l'entrée du comparateur est négative. En l'absence de signal du PM, le comparateur est en saturation basse (0V) sur sa sortie Q et haute (5V) sur son complémentaire \bar{Q} . Le condensateur C_7 (C_8 sur la voie B) de 100 nF filtre les parasites sur les entrées d'alimentation VCC et 0V du composant. L'entrée GND doit être relié à la masse ;

ii) On passive les sources stationnaires (Fig. 4b) : le résistor R_5 se retrouve relié à la masse. La fréquence caractéristique de variation d'une impulsion de tension $u_{PM}(t)$ issue du PM est assez élevée pour que les condensateurs se comportent comme des courts-circuits. En effet, comme les impulsions ont une durée typique de 10 ns, la fréquence caractéristique vaut 10^8 Hz, d'où une

réactance $1/C\omega = 1/(100 \times 10^{-9} \times 2 \times \pi \times 10^8) = 0,03 \Omega$ négligeable devant les impédances du circuit. L'entrée du comparateur reçoit alors directement l'impulsion de tension du PM changée de signe : $V_+ - V_- = u_{PM}(t)$.

Le résistor R_6 est alors en court-circuit, tandis que R_1 se retrouve en parallèle sur R_3 et R_5 . La résistance équivalente R' de ces trois résistors vaut :

$$R' = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{50} + \frac{1}{10\,000} + \frac{1}{12\,000} \right)^{-1} \approx 49,5 \Omega \approx R_1$$

L'impédance d'entrée reste adaptée à celle de sortie du PM.

La tension ϵ à l'entrée du comparateur est alors la superposition des tensions $-U_s$ et $u_{PM}(t)$ (Fig. 4) :

$$\epsilon = V_+ - V_- = -U_s + u_{PM}(t)$$

La sortie \overline{Q} bascule de l'état haut à l'état bas lorsque ϵ devient positif, c'est-à-dire si l'amplitude de l'impulsion est suffisante : $u_{PM}(t) > U_s$. Si le seuil n'est pas atteint, la sortie Q du comparateur reste à l'état bas et \overline{Q} , à l'état haut.

IV.3. Mesure des seuils

L'interface NI-USB6008 possédant des entrées analogiques différentielles, le logiciel de pilotage affiche les tensions de seuils des voies A et B, respectivement mesurées entre USB5-USB6 pour la voie A et USB2-USB3 pour la voie B.

IV.4. Allongement des signaux

Les impulsions de durée inférieure à 100 ns sont trop brèves pour pouvoir déclencher le compteur de l'interface NI-USB6501, aussi est-il nécessaire de les porter au moins à 120 ns. Pour cela, on utilise le verrou de sortie (LATCH) du composant AD8561. Tant qu'une tension u_v dite de verrouillage, supérieure à un seuil limite $U_v \approx 0,6 \text{ V}$, est appliquée sur l'entrée LATCH du composant, ce dernier conserve son état de sortie, quel que soit l'état des entrées.

On réalise la temporisation en verrouillant la sortie grâce à un circuit RC , précisément R_9C_5 ($R_{10}C_6$ pour la voie B) comportant une diode D_1 (D_2 pour la voie B), ainsi qu'on peut le voir sur la figure 3. Étudions le fonctionnement de ce circuit RC de verrouillage (Fig. 5a).

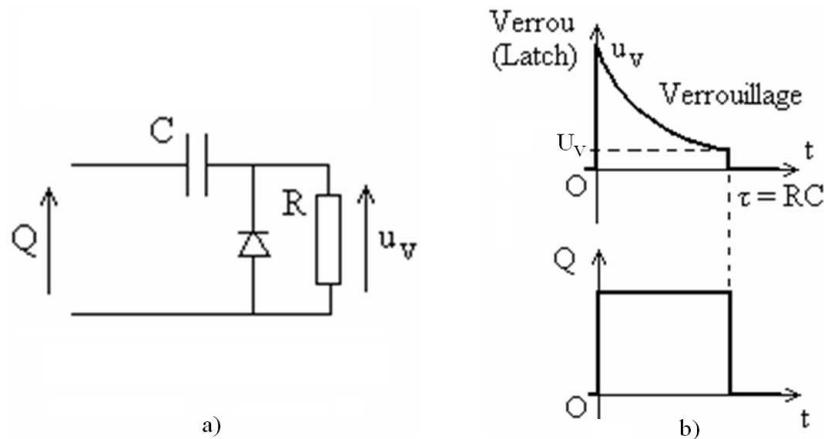


FIG. 5 – Circuit RC de verrouillage a) Montage b) Tension de sortie

En l'absence d'impulsion en entrée, la sortie Q étant à l'état bas, la tension de verrouillage u_v est nulle. Lorsqu'une impulsion se présente à l'entrée, le front montant est celui d'un échelon de tension appliqué au circuit RC : le courant, et donc la tension u_v aux bornes du résistor, est discontinu. La

décroissance est exponentielle, de durée caractéristique $\tau = RC$ (Fig. 5b). Tandis que le condensateur se charge, la diode demeure bloquée ; elle ne joue donc à ce stade, aucun rôle. Tant que la tension u_v appliquée sur le verrou est supérieure au seuil U_v , la sortie Q reste verrouillée sur sa valeur haute (5 V). Lorsque le seuil est atteint, l'impulsion d'entrée étant achevée, la sortie non verrouillée retombe à sa valeur basse (potentiel nul) : le condensateur se décharge rapidement à travers la diode devenue passante.

Comme le compteur déclenche sur les fronts descendants, on récupère des impulsions allongées négatives sur la sortie \bar{Q} . En prenant comme valeur $R = R_9 = 1,5\text{k}\Omega$ et $C = C_5 = 100\text{pF}$, on obtient en pratique des durées entre 100 ns et 150 ns (Fig. 6) suffisantes pour déclencher le compteur.

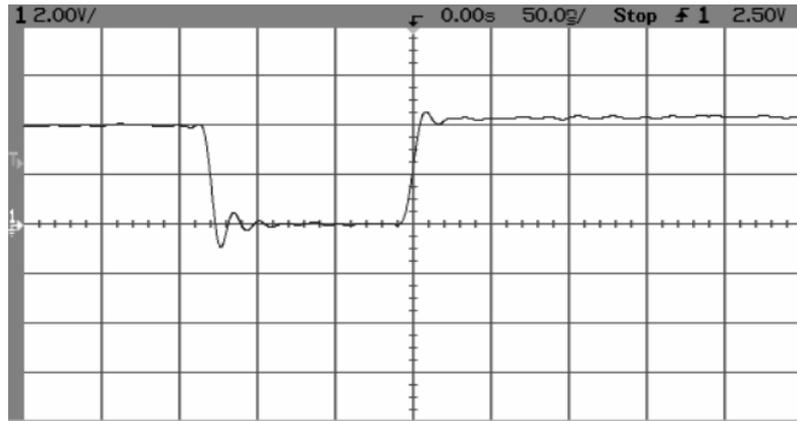


FIG. 6 – Impulsions allongées en sortie du comparateur AD8561

V. Combinaison des signaux

Les blocs de détection A et B fournissent sur les sorties \bar{Q} des comparateurs des impulsions négatives de durée supérieure à 100 ns. À l'aide d'un circuit logique paramétré par deux bits de commande s_0 (USB25) et s_1 (USB26), on envoie vers le compteur, selon le choix opéré dans le logiciel de pilotage, l'une des trois combinaisons suivantes :

- i) Les signaux issus de la voie A ;
- ii) Les signaux issus de la voie B ;
- iii) Les signaux A et B, afin d'opérer une détection en coïncidence.

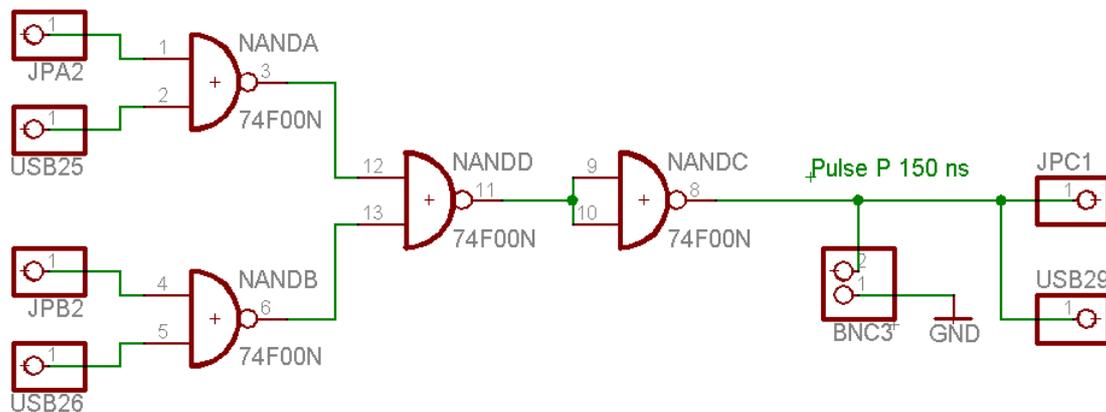


FIG. 7 – Combinaison logique des signaux A et B

Le circuit logique est constitué par 4 portes NAND (Fig. 7). Les entrées sont les impulsions négatives \bar{A} et \bar{B} . Comme on peut le voir sur la table de vérité du circuit (Tab. 1), en combinant

| s_0 | s_1 | NANDA | NANDB | NANDD | NANDC |
|-------|-------|-------|-------|----------------|--------|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | B | \overline{B} | B |
| 1 | 0 | A | 1 | \overline{A} | A |
| 1 | 1 | A | B | $A\&B$ | $A\&B$ |

TAB. 1 – Valeurs en sortie des portes NAND

s_0s_1 , on obtient en sortie la voie A pour 10, la voie B pour 01 et A&B pour 11. Le signal de sortie est donc formé d’impulsions positives d’environ 150 ns.

VI. Sortie compteur

Le signal en sortie de NANDC est entré sur le compteur de l’interface NI-USB6008 (USB29). Une sortie BNC (précisément BNC3) est prévue sur le boîtier électronique, permettant de le visualiser sur un oscilloscope.

VII. Sorties DEL et buzzer

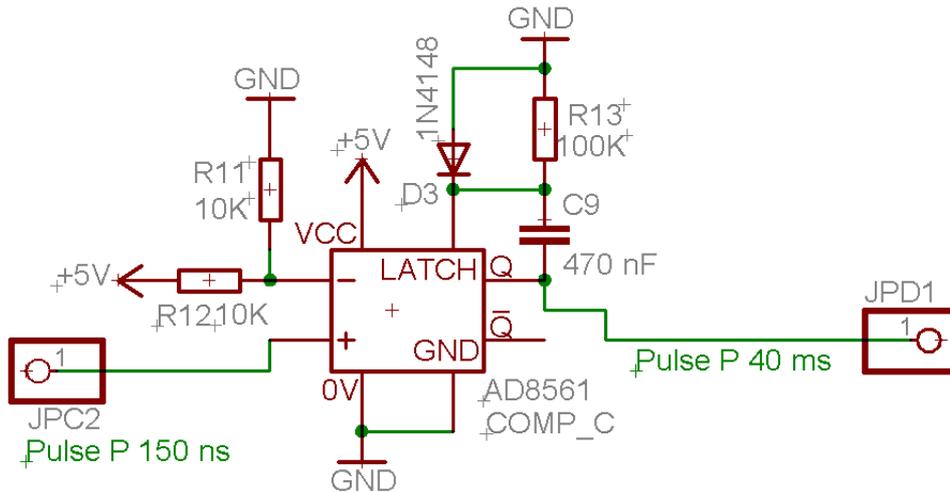


FIG. 8 – Allongement à 33 ms

Lorsqu’une particule est détectée, il est intéressant de produire un petit flash lumineux à l’aide d’une DEL ainsi qu’un bref signal audio avec un buzzer à oscillateur intégré. Au préalable, il faut ajouter un circuit de temporisation supplémentaire qui allonge cette fois considérablement les impulsions afin de les rendre perceptibles (Fig. 8).

Sur l’entrée – du comparateur, on reconnaît un pont diviseur qui permet d’imposer le potentiel $V_- = 2,5\text{ V}$, les résistances étant identiques. Puisque des impulsions positives sont appliquées sur l’entrée +, la sortie Q , en absence de verrouillage, basculerait sur le front montant à l’état haut, et sur le front descendant à l’état bas. On retrouverait les mêmes impulsions en sortie qu’en entrée et le système n’aurait aucune utilité.

En prenant $R_{13} = 100\text{ k}\Omega$ et $C_9 = 470\text{ nF}$, et en choisissant la sortie Q de l’AD8561, on génère des impulsions positives d’environ 40 ms.

Le circuit amplificateur à transistor 2N1711 représenté sur la figure 9, permet à la DEL (de résistance de protection 100Ω) et au buzzer de fonctionner.

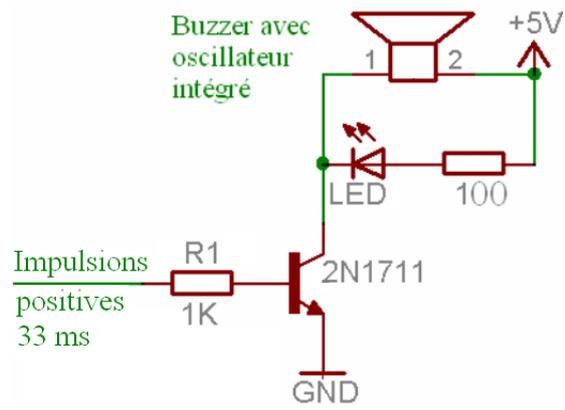


FIG. 9 – Buzzer et DEL

Bibliographie

- [1] J-Ph. Pérez et al., *Électronique* (Dunod, 2006)