



Rapport de stage 2^{ème} année

Etudes de la calibration d'un calorimètre en
physique des hautes énergies

Agez Annabelle

Sommaire

Introduction

I. Présentation générale.

1. **But de l'expérience D0.**
2. **Le calorimètre.**
3. **Les Préamplificateurs de Charges (PAC).**
4. **La calibration.**

II. Etude des variations de la calibration par rapport à la physique.

1. Calibration.

a) Valeurs de référence.

- comparaison entre simulation et mesure.
- dispersion entre PA de même type.

b) Effet de la variation de la capacité détecteur (C_D).

c) Effet de la variation de l'impédance d'entrée du P.A.C. (Z_{in}).

d) Cas d'une voie en cours circuit.

2. Signal physique.

a) Valeurs de référence.

- Comparaison simulation mesure.
- Dispersion entre PA de même type.

b) Effet de la variation de capacité détecteur (C_D).

c) Effet de la variation de l'impédance d'entrée du P.A.C. (Z_{in}).

d) Cas d'une voie en cours circuit.

III. Analyse des résultats.

1. **Comparaison entre la calibration et le signal physique.**
2. **Proposition d'une méthode pour la calibration.**

Annexes

Conclusion

Introduction

Le L.A.L (Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire) est un laboratoire spécialisé dans physique des hautes énergies. Il a la particularité de posséder son propre service d'électronique. Son rôle est de concevoir une électronique capable de répondre aux performances des nouveaux détecteurs.

Ainsi le LAL. travaille avec plusieurs laboratoires en collaboration avec Fermilab (USA) sur l'expérience D0. Ils sont chargés de la calibration de l'électronique du calorimètre.

Durant mon stage dans ce service, j'ai participé à cette expérience. Mon travail portait sur la caractérisation de la calibration réalisée, et sur la recherche d'une méthode possible d'utilisation optimale de cette calibration.

Après une brève introduction sur l'expérience D0, vous trouverez le détail des mesures effectuées, et les conclusions déduites.

I. Présentation générale.

1. L'expérience D0.

Cette expérience a pour objectif de découvrir de nouvelles particules comme le Boson de Higgs prévu par le modèle standard mais aussi de vérifier la validité de nouveaux modèles théoriques (ex: la supersymétrie). Son but est aussi d'augmenter la statistique des particules récemment découvertes comme le quark top, mis en évidence par D0 lors du RUN 1.

Pour cela, on crée ces particules par collision de faisceaux proton-antiproton dans le détecteur.

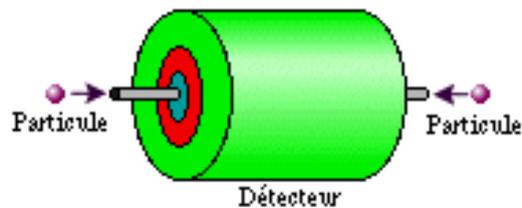


Figure 1 : Collision de faisceaux dans un détecteur

La signature des sous-particules obtenues par désintégration sera détectée par plusieurs détecteurs. D0 est constitué de différents détecteurs : strips, calorimètres EM, calorimètres hadronique... Chaque détecteur ayant un rôle différent : le calorimètre mesure l'énergie, les strips mesurent la position du vertex...

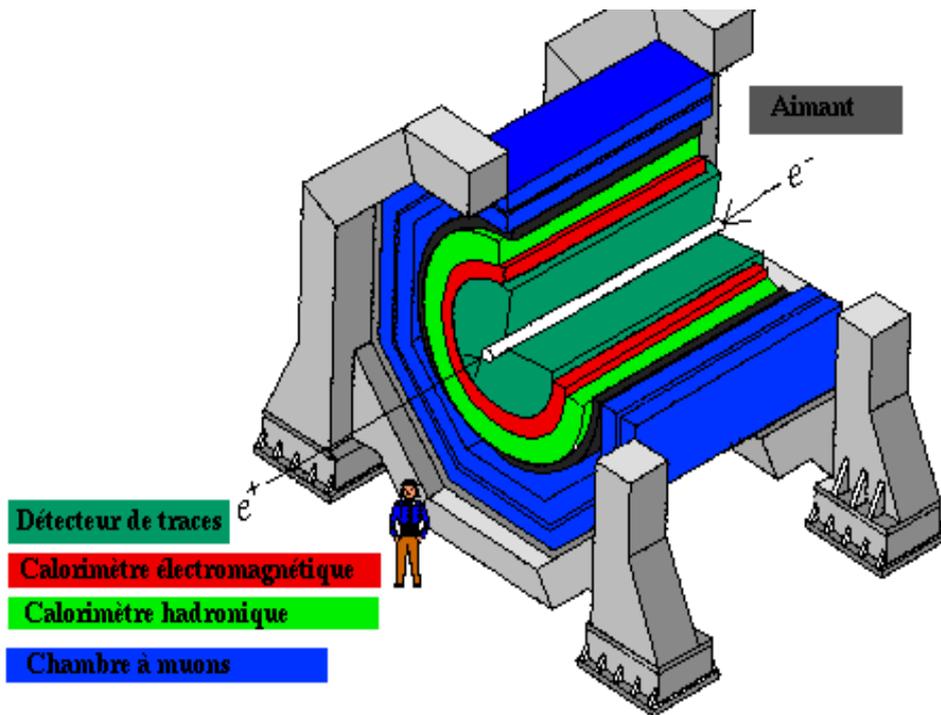


Figure 2 : Coupe d'un détecteur moderne

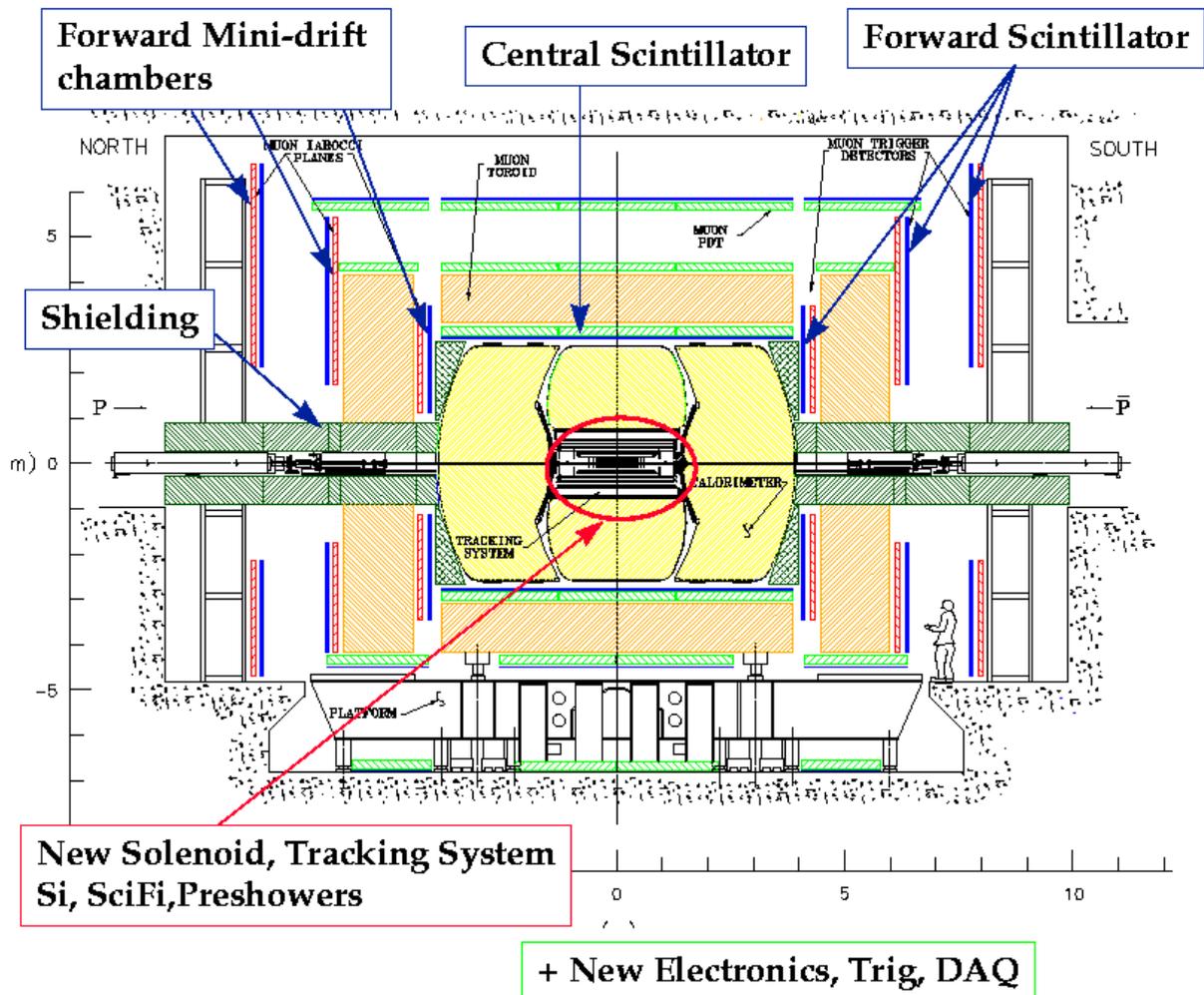


Figure 3 : Le détecteur D0

2. Le calorimètre.

Le calorimètre EM est un détecteur important de D0. Il mesure l'énergie des particules électromagnétiques telles que les photons, les électrons, les Pions... Le calorimètre est constitué de plusieurs couches d'absorbeur et de liquides nobles (plomb et argon en général). La particule émise perd une partie de son énergie dans le plomb qui initialise la gerbe EM, puis elle ionise l'argon.

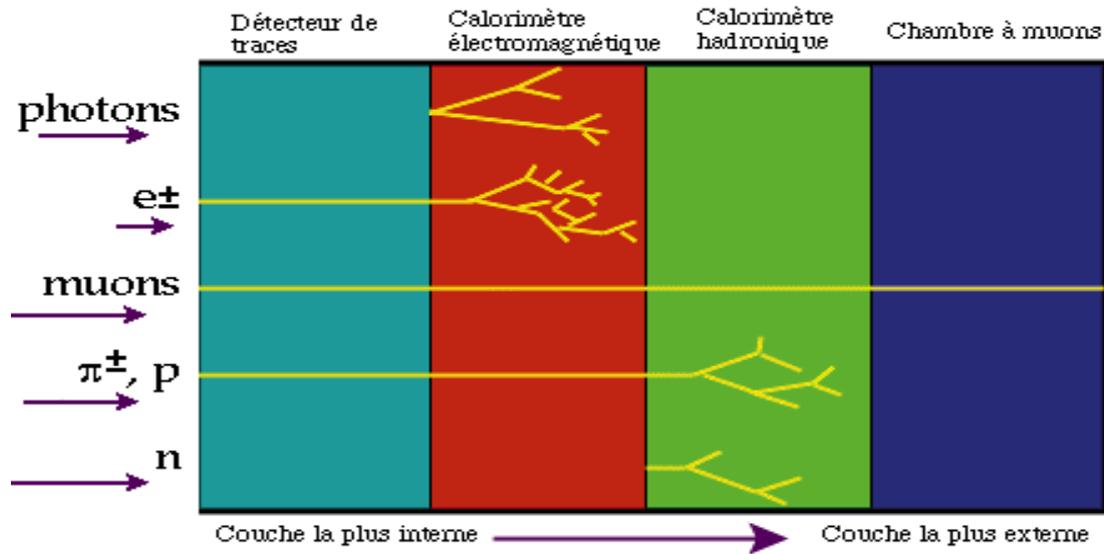


Figure 4 : Initialisation de la gerbe EM dans différents détecteurs.

Dans chaque cellule, se crée alors sous l'effet d'un champ électrique un courant dont la charge est proportionnelle à l'énergie déposée. A partir de là, on est capable de remonter à l'énergie de la particule émise et de reconstituer sa trace.

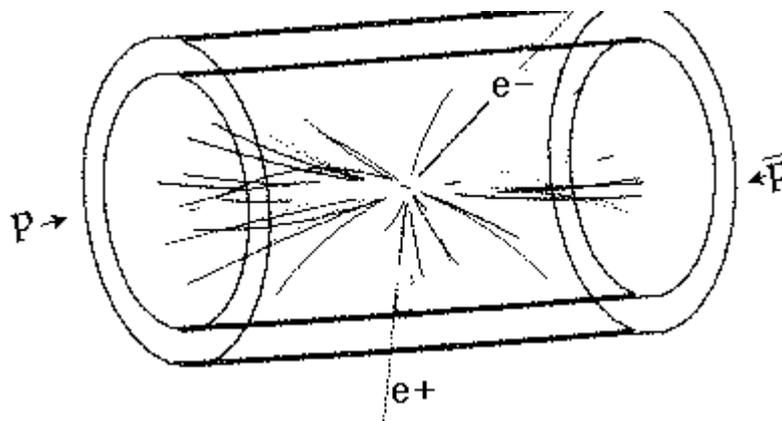


Figure 5 : Trace d'une particule dans le détecteur.

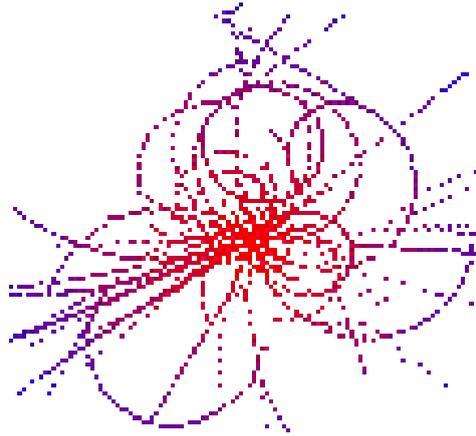


Figure 6 : Trace d'une particule.

Chaque cellule du calorimètre est donc reliée à une chaîne:

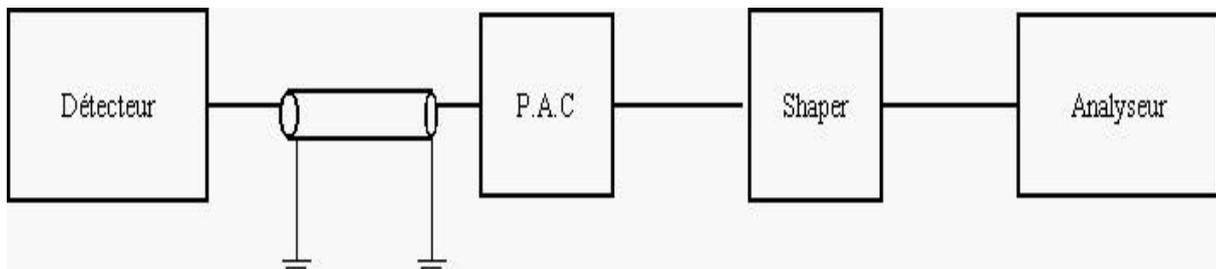


Figure 7 : Chaîne de mesure.

La charge est amplifiée par un préamplificateur de charge (PAC), puis le signal est mis en forme afin d'optimiser le rapport signal sur bruit. Enfin le signal est numérisé puis traité par informatique.

Si on veut être capable à partir de ce signal de remonter à l'énergie déposée par la particule, une calibration de l'ensemble de la chaîne est nécessaire pour toutes les voies de lecture du calorimètre. Mais avant de parler calibration, attardons-nous sur les préamplificateurs.

3. Les Préamplificateurs de Charges (PAC).

Chaque cellule du calorimètre EM peut être modélisée électriquement comme une capacité en parallèle avec une source de courant. Or, les variations de la capacité détecteur produit des déviations du signal de sortie. La capacité détecteur C_D est avec le câble d'impédance Z_0 , un pôle pour le signal. Or il a été décidé d'avoir le même temps de montée du signal après filtrage c'est pourquoi une compensation de pôle zéro a été prévue dans les PAC. Ceux ci sont donc regroupés en différentes espèces selon la valeur de C_d et donc selon compensation appliquée (cf. annexe 1). De plus on remarque d'après ce tableau que ces espèces de PA sont classées en deux groupes: les PA haut gain et les PA bas gain aux caractéristiques suivantes:

Haut gain

$$g_m = -0.66667$$

$$R_{inj} = 20\text{k}\Omega$$

$$R_{par} = 425\Omega$$

$$C_f = 5\text{pF}$$

$$C_p = 10\text{pF}$$

Bas gain

$$g_m = -0.733333$$

$$R_{inj} = 10\text{k}\Omega$$

$$R_{par} = 424\Omega$$

$$C_f = 10\text{pF}$$

$$C_p = 22\text{pF}$$

Le schéma du PAC est en annexe 2.

4. La calibration.

On remarque après cette description de l'expérience que deux possibilités se présentent pour la calibration :

- une calibration froide où le signal est injecté au plus près de la cellule dans l'argon.
- une calibration chaude où le signal est injecté près du PAC, à l'extérieur du cryostat.

Dans notre cas, une calibration à froid implique l'insertion d'un câble au travers du cryostat. Or lors du RUN 1, on avait choisi une calibration chaude. Cette dernière présente donc à priori moins de difficultés techniques de mises en oeuvre mais l'inconvénient est qu'une partie du signal de calibration se réfléchira dans le câble. On ne pourra donc pas reproduire exactement le cheminement du signal de physique.

Le LAL est chargé de la calibration. Ils ont réalisé un générateur d'impulsion selon le principe suivant:

Comme on ne peut imiter un signal physique (triangulaire) on choisit d'imiter les variations de ce signal en fonction de certains paramètres importants.

Le circuit réalisé est :

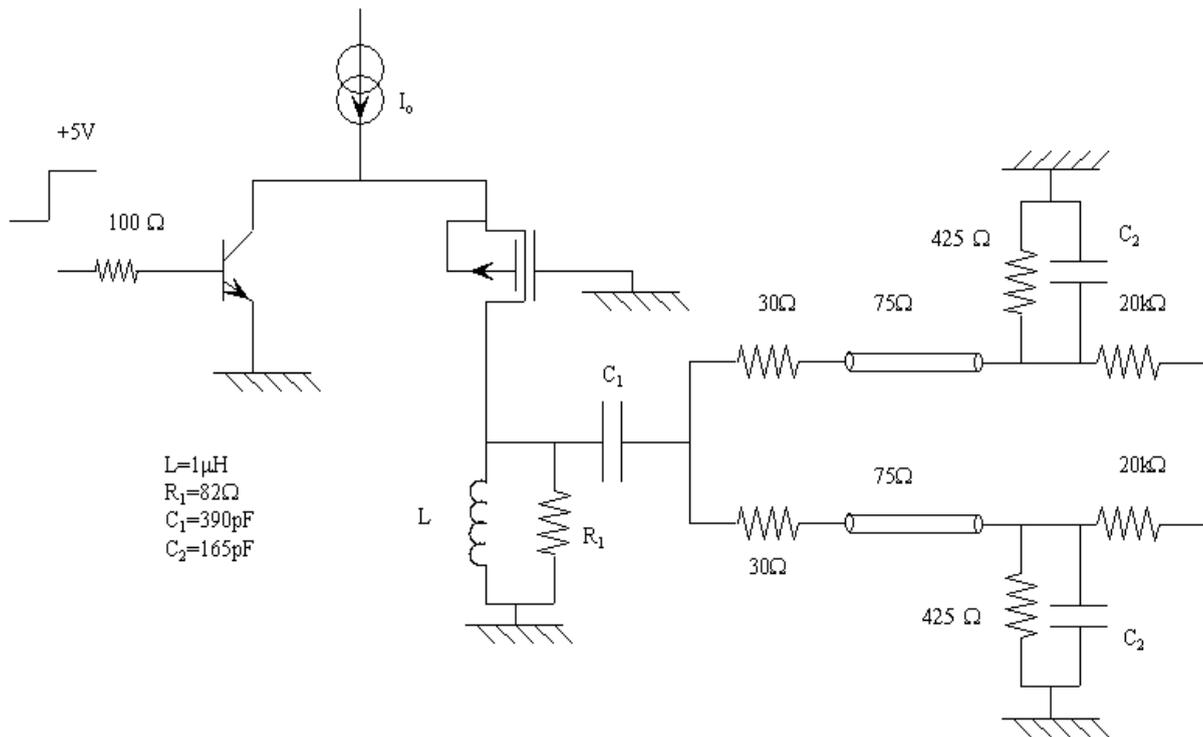


Figure 7 : schéma du switch.

Ce circuit a été optimisé suivant le principe évoqué ci-dessus. Cette optimisation a été faite sur le PA de type A.

Chaque générateur d'impulsion est relié à deux voies. La résistance de 425 Ohms (R_{par}) représente l'impédance d'entrée des autres voies vue par ce switch. Son fonctionnement est simple. Le transistor 1 est bloqué tant qu'il n'y a pas de signal. Le transistor 2 est passant (polarisé par I_b) et charge l'inductance. Dès qu'il y a un signal de commande, le transistor 1 est passant, le transistor 2 se bloque, et l'inductance se décharge dans le réseau RC.

II. Etude des variations de la calibration par rapport à la physique.

Il est important d'étudier la sensibilité du signal pour la variation des paramètres suivant:

- la longueur du câble
- la capacité détecteur
- l'impédance d'entrée du préampli
- le court-circuit d'une voie.

Avant de faire les mesures, on simule le circuit à l'aide du logiciel AWB.

Le schéma simplifié utilisé lors des simulations est en annexe 3. Sur ce schéma, on peut suivre l'évolution du signal.

Ces simulations nous permettent d'avoir une idée des variations du signal.

Les mesures ont toutes été effectuées avec un câble apportant un délai de 40 ns et avec une valeur de I_0 de 50 mA. Le temps mesuré est le temps entre 5% et 100% de la valeur du signal (Peaking time).

1. Calibration.

a) Valeurs de référence.

- Comparaison entre simulation et mesure

Type	Simulation		Mesure	
	$t_{\max}(\text{ns})$	$V_{\max}(\text{V})$	$t_p(\text{ns})$	$V_{\max}(\text{V})$
A	304ns	-6.74V	309ns	-6.33V
C	329ns	-6.34V	354ns	-5.79V
D	333ns	-6.12V	360ns	-5.52V
E	294ns	-6.75V	301ns	-6.27V
F	306ns	-6.64V	327ns	-6.12V
G	313ns	-6.5V	329ns	-5.93V

t_p : Peaking time, temps entre 5% et 100% du signal.

La forme du signal est identique quelque soit le type de PAC pour la simulation et la mesure. Sauf pour le préamplificateur D, il est plus sensible à la réflexion du câble (Cf. annexe 4a et 4b). Cela est dû à la forte capacité détecteur auquel il est lié et donc à une compensation pôle zéro plus importante.

On remarque que les valeurs du minimum diffèrent entre la mesure et la simulation.

La différence entre les temps vient du fait qu'ils ne représentent pas la même chose. En simulation c'est le temps du maximum, en mesure c'est le temps entre 5% et 100% de la valeur du signal. Cependant on se serait attendu à avoir un t_p plus faible que t_{\max} , ce qui n'est pas le cas ici.

La différence entre les valeurs de V_{\max} peut avoir plusieurs origines :

- la charge que l'on injecte est plus faible lors de la mesure
- l'atténuation du câble et sa résistance linéique
- la valeur de C_d lors des mesures

On se propose de vérifier les différentes hypothèses.

1) Calcul de la charge que l'on injecte.

Pour effectuer ce calcul, il suffit d'intégrer le courant. On trouve :

- pour la mesure : 15.5 pC
- pour la simulation : 16.5 pC

Le rapport des charges injectées en entrée est: 0.94

En conclusion, la différence entre la mesure et la simulation provient essentiellement pour les types A, E, F de la différence entre les charges injectées. Pour les types C, D, G, PA à forte capacité détecteur, il faut ajouter à cette explication le fait que lors des mesures, les capacités C_D utilisées ne sont pas les mêmes qu'en simulation.

Ces mesures n'ont été faites qu'avec un PA de chaque type. Mais en fait, pour les types A et F, on avait à notre disposition plusieurs PA de la même espèce. Il était intéressant de regarder la dispersion possible entre les PA de même type.

-Dispersion entre PA de même type.

Type A

Type	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
t_p (ns)	310ns	303ns	307ns	305ns	316ns	315ns	305ns
V_{max} (V)	-6.27V	-6.08V	-6.21V	-6.17V	-6.34V	-6.21V	-6.31V
δ (%)	+0.48	-2.6	-0.5	-1.2	+1.6	-0.5	+1.1

La variation en % est obtenue à partir de la valeur moyenne ici égale à -6.24V.

Type F

Type	F1	F2	F3	F4
t_p (ns)	329ns	323ns	330ns	330ns
V_{max} (V)	-6.1V	-6.14V	-6.2V	-6.14V
δ (%)	-1.2	-0.5	+0.4	-0.5

La variation en % est obtenue à partir de la valeur moyenne ici égale à -6.17V.

On remarque que pour les types A il existe une forte dispersion du minimum pour un même set up. Cela pourrait avoir pour origine une variation de l'impédance d'entrée des PA. En effet, cette dernière est inversement proportionnelle au gain g_m du transistor d'entrée du PA. Or g_m dans notre cas est lui même proportionnel à la racine carré du courant. Il existe donc une incertitude sur la valeur de Z_{in} .

Après avoir mesuré les valeurs de références de V_{max} et de t_{max} , on regarde quelles sont les variations du maximum lorsque l'un des paramètres change.

b) *Effet de la variation de +/- 10% de la capacité détecteur(C_D).*

Type	Simulation				Mesure			
	C_d (pF)	t_{max} (ns)	V_{max} (V)	δ (%)	C_d (pF)	t_p (ns)	V_{max} (V)	δ (%)
A	458	314	-6.72	-0.3	458	313	-6.19	-0.7

	374	305	-6.74	0	389	307	-6.22	-0.2
C	2400	342	-6.22	-1.9	2466	374	-5.56	-2.3
	1964	321	-6.44	+1.6	1962	360	-5.81	+2.1
D	4431	367	-5.75	-6.1	4788	403	-4.85	-12.2
	3625	333	-6.22	+1.6	3723	361	-5.73	+3.8
E	443	314	-6.73	-0.3	459	307	-6.14	-0.7
	363	315	-6.76	+0.1	358	301	-6.17	-0.2
F	969	316	-6.61	-0.5	945	334	-6.01	-0.9
	793	309	-6.66	+0.3	804	323	-6.11	+0.6
G	1604	333	-6.45	-0.8	1603	336	-5.84	-1
	1312	316	-6.56	+0.9	1318	321	-5.87	+0.8

Les variations de la simulation correspondent approximativement à ceux de la mesure excepté pour les PA de type C et D.

Malgré cela, on peut remarquer que les variations restent les mêmes et que les PA de type C et D sont plus sensibles à une variation de C_d (annexe 5). Cette sensibilité pourra poser problème lors de la calibration.

c) *Effet de la variation de +/- 10% de l'impédance d'entrée (Z_{in}).*

Pour obtenir une impédance d'entrée de 27 Ohms, on a placé en parallèle une résistance de 300 Ohms. L'inconvénient de cette méthode est que l'on perd 10% du signal dans la masse. La valeur mesurée doit donc être divisé par 0.9 pour être comparée à une diminution réelle de Z_{in} .

De même, pour avoir une résistance de 33 Ohms, on place en série une résistance de 3 Ohms. Cette méthode c'est révélée difficile à mettre en oeuvre dans la réalité. Il se peut que les mesures effectuées pour $Z_{in}=33$ Ohms, soient incorrectes. Il est donc préférable dans ce cas de se reporter aux valeurs données par la simulation.

Voici le relevé des valeurs:

Type	$Z_{in}(\Omega)$	Simulation			Mesure		
		$t_{max}(ns)$	$V_{max}(V)$	$\delta(\%)$	$t_p (ns)$	$V_{max}(V)$	$\delta(\%)$
A	27	298	-6.855	+1.7	301	-6.29	+0.9
	33	323	-6.67	-0.9	292	-6.33	+1.6
C	27	321	-6.567	+3.6	345	-5.89	+3.4
	33	351	-6.18	-2.6			
D	27	337	-6.367	+4	362	-5.83	+4.4
	33	357	-5.85	-4.5	351	-5.48	-0.8
E	27	298	-6.867	+1.7	394	-6.23	+0.9
	33	330	-6.69	-1			
F	27	308	-6.789	+2.2	318	-6.14	+1.2
	33	332	-6.55	-1.4			

G	27	313	-6.70	+3	319	-5.04	+2.3
	33	342	-6.38	-1.9	337	-5.85	-1

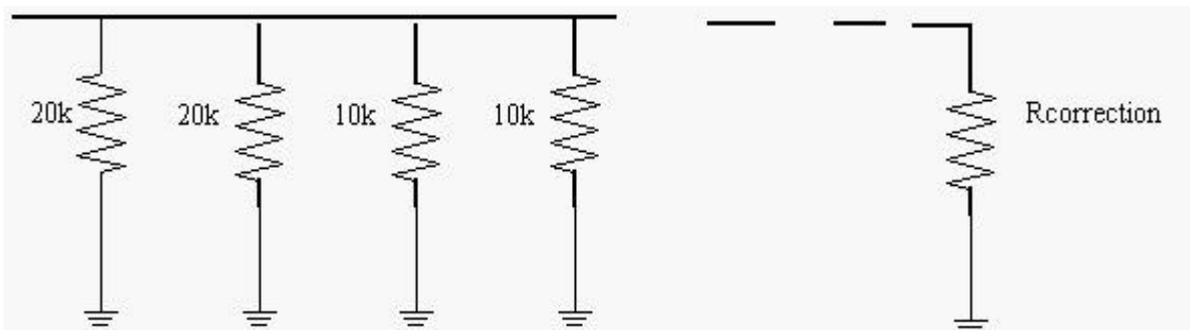
D'après ce tableau, les variations lors de la simulation et de la mesure ont le même ordre de grandeur.

Dans le cas du PA de type A, les résultats (δ) sont contradictoires. On suppose ici qu'une erreur de mesure a été faite, de même pour le PA de type D, où pour $Z_{in}=33$ Ohms, la variation est trop faible.

d) *Cas d'une voie en court circuit.*

Pour simuler une voie en court circuit, on fait varier la résistance R_{par} . Cette résistance représente l'impédance des autres voies regroupées vu par le PA. Cette résistance a pour valeur $R_{par}=425\Omega$ pour les PA haut gain tels que les types A, C, D, et $R_{par}=434\Omega$ pour les PA bas gain tels que les types E, F, G.

R_{par} représente en fait les R_{inj} des voies de calibration mises en parallèle, suivi d'une résistance corrective pour avoir une valeur de 425Ω . On rappelle que R_{inj} vaut $20k\Omega$ pour les PA haut gain et $10k\Omega$ pour les bas gain.



Si c'est la voie d'un PA de haut gain qui est en court circuit, $R_{par}=434\Omega$ ou 443Ω .

Si c'est un PA bas gain, alors $R_{par}=443\Omega$ ou 453Ω .

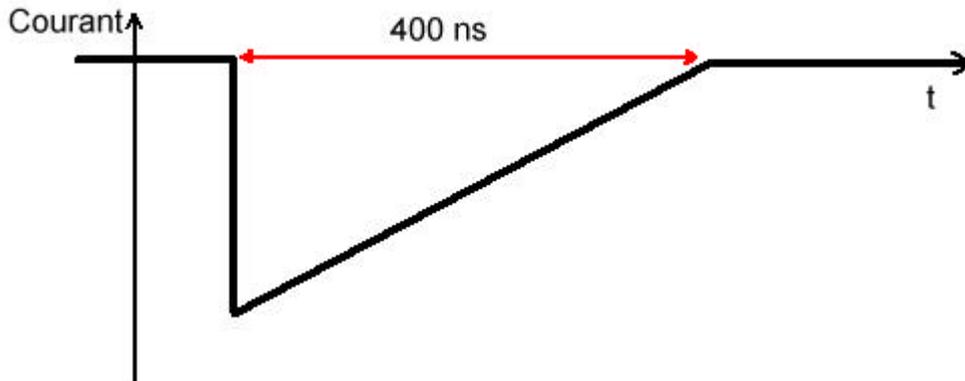
Mais lors de la simulation comme de la mesure, il n'y a pas eu de changements flagrants. l'effet d'une voie morte est négligeable pour la calibration des autres voies.

Après ces mesures, on connaît donc le gain des différentes chaînes avec précision, et l'on sait comment varie celui-ci en fonction des paramètres C_d et Z_{in} .

Maintenant, il reste à voir si cette calibration réagit de la même façon que le signal physique. On refait donc les mêmes mesures en injectant le signal physique.

2. Signal physique.

Un signal triangulaire est généré par le générateur de signal, il est injecté dans un circuit constitué d'une résistance, on obtient ainsi un courant de la forme suivante :



a) Valeurs de référence.

Pour le signal physique, les valeurs du maximum sont les suivantes:

Type	Simulation		Mesure	
	$t_{\max}(\text{ns})$	$V_{\max}(\text{V})$	$t_p(\text{ns})$	$V_{\max}(\text{V})$
A	304	-10	274	-9.26
C	310	-9.83	297	-8.79
D	304	-9.76	310	-8.89
E	305	-5	274	-4.52
F	310	-4.98	284	-4.54
G	313	-4.95	276	-4.48

Simulation et mesure ont le même ordre de grandeur.

On peut faire les mêmes hypothèses que précédemment quant à l'origine de cette différence. Seulement dans ce cas-ci, l'atténuation du câble joue un plus grand rôle, parce que tout le signal passe par le câble et subit donc une atténuation de 0.98.

De même que lors de la calibration, on a réalisé la mesure des valeurs de référence pour les 7 préamplis de type A et les 4 de type F.

Type A

Type	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
$t_p(\text{ns})$	274ns	269ns	275ns	272ns	281ns	279ns	270ns
$V_{\max}(\text{V})$	-9.26	-8.9	-9.08	-9.04	-9.31	-9.1	-9.25
$\delta(\%)$	+1.4	-2.5	-0.6	-1	-1.97	+0.33	+1.3

Le calcul de la variation se fait par rapport à la moyenne de V_{\max} qui est: -9.13V. Il y a toujours une forte dispersion d'un PA à l'autre.

Type F

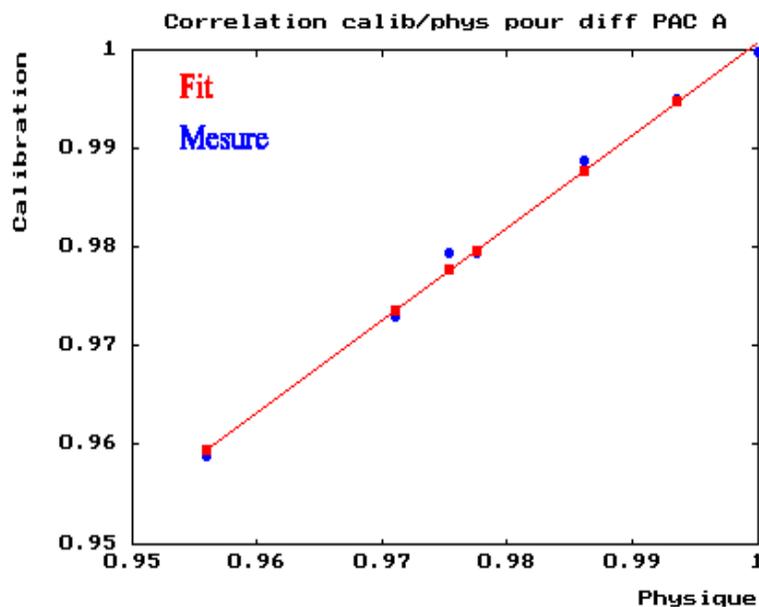
Type	F1	F2	F3	F4
t_p (ns)	284ns	280ns	285ns	285ns
V_{max} (V)	-4.49	-4.52	-4.56	-4.52
δ (%)	-0.7	0	+0.12	0

Le calcul de la variation se fait par rapport à la moyenne de V_{max} qui est: -4.522V.

La dispersion est faible dans ce cas.

Maintenant, il faut voir si ces variations correspondent aux variations relevées lors de la calibration. Pour cela on trace la courbe $V(A_i)$ calibration en fonction de $V(A_i)$ signal physique.

On obtient quasiment une droite:



Après normalisation, la droite a pour équation:

$$y=0.9426*x + 0.058$$

L'écart type est de 0.00092.

La dispersion des PA se retrouve en calibration et en physique. Dans ce cas le signal de calibration varie donc bien comme la physique.

Voyons si c'est le cas lorsque C_D varie.

b) *Effet de la variation de la capacité détecteur (C_d).*

On fait varier C_d , les valeurs du maximum sont alors:

Type	Simulation	Mesure
------	------------	--------

	C_d (pF)	t_{max} (ns)	V_{max} (V)	δ (%)	C_d (pF)	t_p (ns)	V_{max} (V)	δ (%)
A	374	309	-10.01	+0.1	389	273	-9.25	-0.2
	458	307	-10	0	458	275	-9.22	-0.5
C	1964	297	-9.94	+1.1	1962	287	-8.94	+1.7
	2400	319	-9.69	-1.5	2466	304	-8.35	-5
D	3625	297	-9.96	+2	3723	304	-9.15	+2.9
	4431	321	-9.28	-5	4788	330	-8.3	-6.7
E	363	304	-5.01	+0.2	358	273	-4.52	0
	443	309	-5	0	459	275	-4.51	-0.3
F	793	306	-4.99	+0.2	804	281	-4.55	+0.2
	969	313	-4.97	-0.2	945	287	-4.5	-0.9
G	1312	302	-4.98	+0.6	1318	272	-4.49	+0.2
	1604	317	-4.93	-0.5	1603	283	-4.42	-1.4

Les variations en simulation et en mesure sont à peu près identiques. On remarque surtout que pour les types C et D, ces variations sont fortes, cela risque de poser problème lors de la calibration (annexe 5).

On remarque aussi que ces variations sont proches des variations observées avec le signal de calibration lorsque C_d varie. Cela montre bien que notre calibration varie comme le signal physique dans ce cas.

Regardons si cela est vrai pour une variation de Z_{in} .

c) *Effet de la variation de l'impédance d'entrée du PAC (Z_{in}).*

Ici comme lors de la calibration, la réalisation de $Z_{in}=33\Omega$ est difficile à mettre en oeuvre. Il se peut donc que les mesures soient incorrectes dans ce cas. il est donc préférable de se reporter aux valeurs données par la simulation.

Type	$Z_{in}(\Omega)$	Simulation			Mesure		
		t_{max} (ns)	V_{max} (V)	δ (%)	t_p (ns)	V_{max}	δ (%)
A	27	302	-10.189	+1.9	271	-9.02	-2.6
	33	305	-9.92	-0.8	293	-9	-2.9
C	27	300	-10.211	+3.8	284	-8.93	+1.6
	33	318	-9.56	-2.7			
D	27	295	-10.30	+5.5	292	-8.73	-1.8
	33	321	-9.33	-4.5			

E	27	301	-5.089	+1.8	297	-4.56	+1
	33	327	-4.97	-0.6			
F	27	299	-5.10	+2.4	275	-4.56	+0.6
	33	324	-4.92	-1.6			
G	27	302	-5.10	+3	269	-4.54	+1.4
	33	330	-4.86	-1.9	285	-4.35	-3

A l'exception des PA de type A et D, mesure et simulation ont le même sens de variation. On remarque aussi que comme lors de la calibration, ce sont les PA à forte compensation pôle-zéro qui varient le plus en fonction de Z_{in} , c'est à dire les types C, D, G.

d) *Cas d'une voie en court circuit.*

On se retrouve dans les mêmes conditions que lors de la calibration. Aucune variation n'est significative.

III. Analyse des résultats.

1. Comparaison entre calibration et signal physique.

Tableau récapitulatif:

Les valeurs sont celles des mesures effectuées avec un câble de longueur 40 ns et un valeur de I_0 de 50mA.

Type		A	C	D	E	F	G
		d(%)	d(%)	d(%)	d(%)	d(%)	d(%)
Calibration	-10% C_d	-0.2	+2.1	+3.8	-0.2	+0.6	+0.8
	+10% C_d	-0.7	-2.3	-12.2	+0.7	-0.9	-1
	-10% Z_{in}	+0.9	+3.4	+4.4	+0.9	-1.2	+2.3
	+10% Z_{in}	+1.6		-0.8			-1
Physique	-10% C_d	-0.2	+1.7	-2.9	0	+0.2	+0.2
	+10% C_d	-0.5	-5	-6.7	-0.3	-0.9	-1.4
	-10% Z_{in}	-2.6	+1.6	-1.8	+1	+0.5	+0.6
	+10% Z_{in}	-2.9					-3

Dans l'ensemble, physique et calibration ont les mêmes variations en fonction des différents paramètres. Sauf pour les préamplis de type A et D où calibration et physique ont une variation opposée lorsque Z_{in} varie. Mais, au paragraphe B1, on a souligné ce problème.

On observe en général que pour une variation de la capacité détecteur, la calibration et le signal physique réagissent de la même façon. Il en va de même lorsque Z_{in} varie. On peut noter

cependant que la calibration est plus sensible à une variation de Z_{in} que le signal physique et il faudra en tenir compte lors du choix de la méthode de calibration.

En effet il est important de connaître la variation de la calibration face à une variation du paramètre Z_{in} car sa valeur est fixée de manière peu précise et l'on prévoit déjà une dispersion importante. Le paramètre C_D sera connu, il sera mesuré avec une certaine précision avant l'expérience.

2. Proposition de méthode de calibration.

On a pu remarquer avec les mesures précédentes, que les PA de type A, E et F ont leur maximum assez proches, et de plus ils sont peu sensibles aux variations des paramètres.

On peut donc proposer de diviser les PA en deux groupes: A, E, F d'un côté et C, D et G de l'autre et de faire 2 mesures.

Le problème, c'est que dans les mesures précédentes, on n'a pas fait varier la longueur du câble (t_d). Cette valeur est comprise entre 40 ns et 60 ns et on ne peut que simuler cette variation.

Pour un câble de 60 ns le maximum d'un signal généré par le signal de calibration est:

Type	$t_d = 40$ ns		$t_d = 60$ ns	
	t_p (ns)	V_{max} (V)	t_p (ns)	V_{max} (V)
A	304	-6.74	343	-6.57
C	329	-6.34	366	-6.11
D	333	-6.12	386	-5.78
E	314	-6.75	339	-6.58
F	318	-6.64	349	-6.44
G	323	-6.5	358	-6.287

D'après ces simulations, même avec un câble de délai de 60 ns, les temps max pour les PA de types A, E, F restent proches, de même pour les PA de types C, D, G. Une idée naturelle est de faire deux mesures à deux temps différents. Ces temps étant la moyenne des t_{max} :

$$t = (\sum T_{max}(t_d=40ns) + \sum T_{max}(t_d=60ns)) / N$$

On trouve ainsi que $t=328$ ns pour le premier groupe constituer des préamplis A, E, F et $t= 350$ ns pour le second groupe.

Valeur de V à $t= 328$ ns

Type	$t_d = 40$ ns	$t_d = 60$ ns	δ (%)	
A	-6.704V	-6.553V	-0.5	-0.2
E	-6.725V	-6.571V	-0.4	-0.2

F	-6.626V	-6.409V	-0.2	-0.53
---	---------	---------	------	-------

Valeur de V à t = 350 ns

Type	$t_d = 40$ ns	$t_d = 60$ ns	$\delta(\%)$	
C	-6.312V	-6.073V	-0.5	-0.33
D	-6.073V	-5.688V	-0.09	-1.6
G	-6.459V	-6.282V	-0.74	-0.08

On remarque que quelque soit la longueur de câble, on arrive avec ces temps à se placer à moins de 1% du maximum, sauf pour D. Cela permet d'appliquer un coefficient correcteur assez faible. De plus on remarque que ces erreurs pour le type A restent inférieures à la dispersion qu'il y a entre PA de même type.

Maintenant, il faut voir si dans le cas où un des paramètres varie, il n'y a pas augmentation importante de cet écart.

On fait varier C_d de +/- 10% et on mesure V à t=318ns et t=350ns.

Mesure à t=328ns

Type	$t_d=40$ ns		$\delta(\%)$		$t_d=60$ ns		$\delta(\%)$	
	-10% C_d	+10% C_d			-10% C_d	+10% C_d		
A	-6.71V	-6.702V	-0.5	-0.32	-6.561V	-6.634V	-0.2	-0.6
E	-6.733V	-6.720V	-0.5	-0.24	-6.585V	-6.546V	-0.2	-0.31
F	-6.644V	-6.612V	-0.22	-0.08	-6.444V	-6.639V	-0.4	-0.8

Mesure à t=350ns

Type	$t_d=40$ ns		$\delta(\%)$		$t_d=60$ ns		$\delta(\%)$	
	-10% C_d	+10% C_d			-10% C_d	+10% C_d		
C	-6.369V	-6.212V	-1.1	-0.2	-6.190V	-5.915V	-0.06	-0.9
D	-6.194V	-5.743V	-0.5	-0.2	-5.872V	-5.260V	-0.8	-3.8
G	-6.480V	-6.423V	-1.2	-0.5	-6.343V	-6.210V	0	-0.12

Pour la mesure à t=328 ns, l'écart par rapport au maximum reste inférieur à 1%. Par contre, le deuxième groupe étant plus sensible à une variation de C_D , l'écart par rapport au maximum augmente et passe au-dessus de 1%. Le plus grand écart étant obtenu par le PA de type D.

Pour le premier groupe, les mesures restent correctes, et on peut envisager de faire une calibration à ce temps.

Par contre pour le second groupe de PA, l'erreur est assez grande. Si on refuse d'avoir un écart aussi important, il faut envisager de faire deux ou trois mesures (une pour chaque type de PA). Reste cependant à vérifier que lorsque Z_m varie, on reste toujours dans les normes que l'on s'est fixées.

Conclusion

Ce travail sur la calibration de D0 m'a permis une approche théorique et pratique de l'instrumentation au travers de simulations et de mesures. J'ai pu ainsi acquérir des méthodes de travail et me familiariser avec certains appareils et logiciels :

- l'analyseur d'impédance
- le générateur de signal
- le logiciel de simulation AWB
- le logiciel de traitement du signal CRB développé par le LAL,

et cela tout en mettant mes connaissances en électronique en application. J'ai pu ainsi apprécier le travail en laboratoire de recherche et découvrir les possibilités offertes aux ingénieurs par le CNRS.

