

Jean SANCHEZ

I.U.T. d'Annecy, département : Mesures Physiques
Option : Techniques Instrumentales
Université de Savoie



Tuteur de stage : Mr. André Bétemps

Instrumentation d'un spectromètre de masse sous Labview

C.E.R.N., Genève (Suisse)

Département « Accelerators and Beams », groupe « Areas, Targets and Beams »

Section « Lasers et Photocathodes »

Maître de stage : Mr. Eric Chevallay

Promotion : Marie Curie

Stage final de DUT Mesures Physiques, Avril – Juin 2005



Je tiens à remercier Guy Suberlucq ainsi que Eric Chevallay qui m'ont permis de faire mon stage au CERN d'une part, mais qui m'ont aussi fait découvrir et apprécier la vie d'un laboratoire de recherche. Ils ont pris le temps de me guider dans les domaines attendant à mon sujet de stage, et même au delà. De plus, ils m'ont montré et détaillé de nombreuses choses dans le laboratoire où je travaillais, car celui-ci mettait en application une grande partie des enseignements que j'ai reçu lors de ma formation en DUT Mesures Physiques. De fait ils ont pu m'expliquer de nombreuses expériences dans de nombreux domaines, tant au sein du laboratoire que du CERN en général.

SOMMAIRE

1) <u>Introduction</u>	p. 3
2) <u>Présentation du C.E.R.N.</u>	p. 3
a) Le C.E.R.N.	p. 3
i) L'organisme	p. 3
ii) Que cherche-t-on au C.E.R.N. ?	p. 4
b) Le L.H.C.	p. 5
c) Le CLIC	p. 6
d) Le laboratoire de Photoémission	p. 7
e) Caractéristiques des photocathodes	p. 8
3) <u>Présentation du système de mesure</u>	p. 9
a) Le système de mesure	p. 9
b) Les jauges TPG300	p. 10
c) Le spectromètre de masse	p. 10
4) <u>Instrumentation du système</u>	p. 12
a) Les jauges TPG300	p. 12
b) Le spectromètre de masse Balzers QMG 112A	p. 14
i) Description de l'interface utilisateur	p. 16
ii) Détails du diagramme de l'interface utilisateur	p. 24
(1) Interface générale	p. 24
(2) Détail du mode d'acquisition : SPECTRE	p. 25
(3) Détail du sous-vi de prise de mesure du courant ionique	p. 26
(4) Mode de prise de mesure HELIUM	p. 27
(5) Divers	p. 28
5) <u>Conclusion</u>	p. 30
6) <u>Annexes</u>	p. 31

1) Introduction

Le C.E.R.N. est le plus grand laboratoire de physique des particules du monde. C'est un organisme de recherche international à la pointe de la technologie.

Dans le cadre de recherches sur la source d'électrons d'un accélérateur de particules de prochaine génération (le CLIC), mon stage m'a amené à réaliser l'instrumentation d'un spectromètre de masse afin d'analyser les gaz présents dans une enceinte sous ultravide. Dans cette enceinte sont élaborés des dépôts de couches minces pour réaliser des photocathodes. La durée de vie de ces photocathodes étant limitée par la contamination de divers gaz résiduels, le laboratoire qui réalise ces photocathodes souhaiterait connaître plus précisément ceux-ci et leurs pressions partielles, durant les différents stades de fabrication. Ces photocathodes éclairées par un laser émettront un faisceau d'électrons qui constituera la source d'électrons de ce futur accélérateur.

2) Présentation du C.E.R.N.

a) Le C.E.R.N.

i) L'organisme



Le C.E.R.N. est l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire, le plus grand centre de physique des particules du monde. Ici les physiciens viennent explorer ce dont la matière est faite et quelles forces assurent sa cohésion.

Le C.E.R.N. existe avant tout pour fournir à ces chercheurs les outils nécessaires pour leurs expériences. Ces outils, d'une taille et d'un coût considérable, sont principalement des grands instruments qui accélèrent les particules jusqu'à une vitesse proche de celle de la lumière et des détecteurs pour mesurer leurs interactions.

Pour la physique des particules, même les plus grands pays européens ne pouvaient à eux seuls construire un laboratoire aussi important que le C.E.R.N., et les ressources humaines nécessaires à son fonctionnement ne pouvaient être trouvées dans une seule nation.

Fondé en 1954, le laboratoire a été l'une des premières entreprises communes à l'échelle européenne et il comprend maintenant 20 états membres (dont la France). Le C.E.R.N. a été fondé grâce aux efforts conjoints de 12 états européens. Aujourd'hui, grâce à cette initiative, la plupart des pays européens ont la chance de pouvoir participer aux expériences de physique les plus avancées au niveau mondial sans dépenser une part inacceptable de leur budget national de recherche scientifique. L'année dernière les 50 ans du C.E.R.N. ont été célébrés.

Le site initial des laboratoires se trouve à Meyrin, une petite ville proche de l'aéroport de Genève à la frontière franco-suisse. Actuellement c'est sur ce site que se trouve une grande partie des laboratoires de recherche du C.E.R.N. Depuis sa création un grand accélérateur de particules circulaire de 27 kilomètres de circonférence a été construit à 100 mètres sous terre. Les laboratoires et les différentes expériences du C.E.R.N. étant établies des deux cotés de la frontière franco-suisse, l'organisme dispose d'un statut international ce qui fait que tout ce qui dépend du C.E.R.N. n'est ni français ni suisse en particulier.

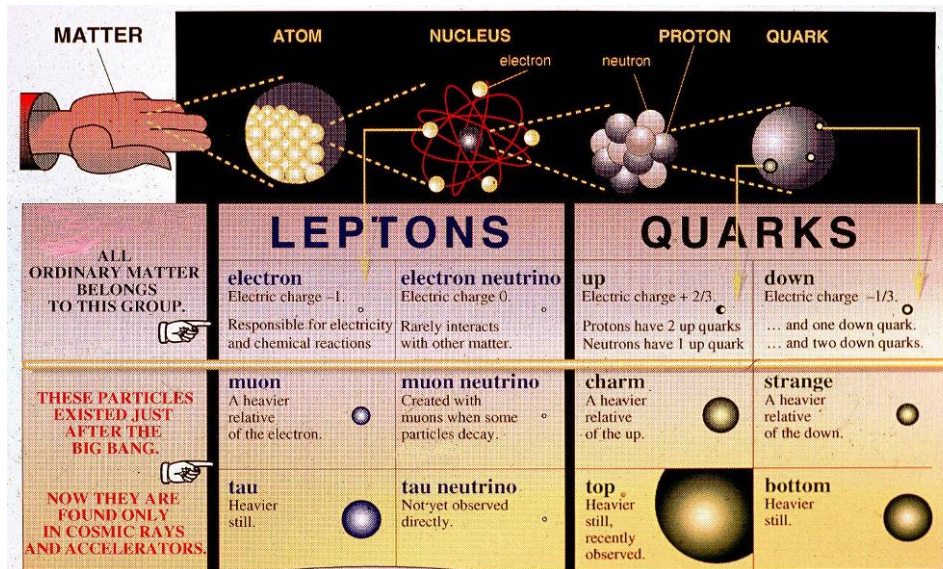
Depuis sa création le CERN a permis de nombreuses découvertes et innovations comme : les particules W et Z (prix Nobel 1983), la première observation d'antihydrogène (1995), le World Wide Web (1990) ou encore de LHC (2007).

ii) Que cherche-t-on au C.E.R.N. ?

Les scientifiques ont découvert que toute la matière de l'Univers est faite d'un petit nombre de constituants de base appelés particules élémentaires, régis par quelques forces fondamentales.

Certaines de ces particules sont stables et forment la matière normale, les autres n'existent qu'une fraction de seconde et se désintègrent en particules stables. Toutes ont coexistées pour un bref instant après le Big Bang.

Depuis lors, seule l'énorme concentration d'énergie qui peut être atteinte dans un accélérateur au C.E.R.N. peut les faire renaître. Ainsi, étudier les collisions de particules revient à "regarder dans le passé", en recréant l'environnement présent à l'origine de l'Univers.



Ensemble des particules élémentaires constituant la matière

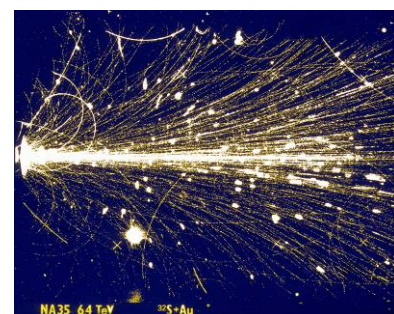
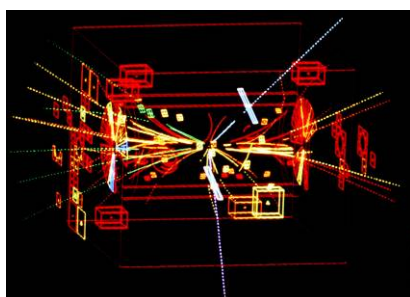
Dans quel but ? Comprendre la formation des étoiles, de la terre, de tout ce qui nous entoure et, finalement de nous-mêmes...

La mission du C.E.R.N. est de donner aux physiciens des particules les moyens de réaliser leurs expériences. Pour « voir » au cœur des particules il faut les casser, pour cela on peut les faire rentrer en collision soit avec une cible fixe, soit avec une autre particule en mouvement.



Collision entre particules

Collision sur cible fixe



Avec les détecteurs précédents on a aussi pu déterminer l'origine de différentes forces : en particulier celle de la force faible au C.E.R.N. (Prix Nobel en 1984 de C. Rubia et S. van der Meer).

Aujourd'hui on compte ainsi quatre forces fondamentales : la force nucléaire forte, la force électrofaible (réunification de la force électromagnétique et de la force nucléaire faible), la gravitation. Seule l'origine de la gravitation reste inconnue, et on pense avoir des moyens suffisant avec l'accélérateur qui est construit actuellement pour tenter de comprendre l'origine de la masse.

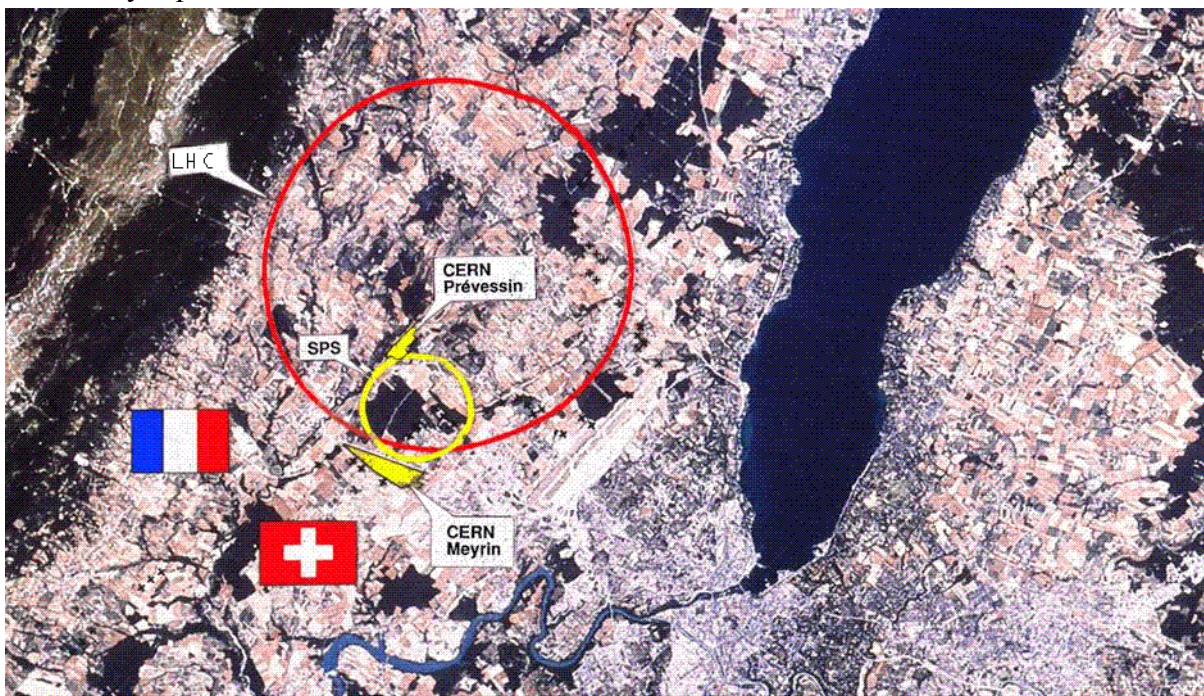
b) Le L.H.C.

Le grand collisionneur de hadrons, Large Hadron Collider (L.H.C.), est un accélérateur de particules qui sondera la matière plus profondément que jamais auparavant. En 2000, l'ancien accélérateur (Large Electron Positron collider) a été démantelé, puis la construction du L.H.C. a commencée (en 2001) dans les mêmes galeries que les installations précédentes. Bien que l'anneau de 27 kilomètres soit refait à neuf, les quatre détecteurs de collisions précédents seront remplacés par quatre nouveaux (CMS, Atlas, Alice, LHCb). Prévu pour démarrer en 2007, il permettra à terme des collisions de faisceaux de protons à une énergie de 14 TeV dans le centre de masse. Des faisceaux de noyaux de plomb seront également accélérés, entrant en collision avec une énergie de 1150 TeV.

Le L.H.C. est la prochaine étape d'une épopée de découverte commencée il y a un siècle. A cette époque, des scientifiques venaient juste de découvrir toutes sortes de rayons mystérieux, rayons X, rayons cathodiques, rayonnement alpha et bêta. Quelle était leur origine? Etaient-ils faits de la même 'chose', et si oui, de quoi?

Des réponses ont maintenant été apportées à ces questions, nous donnant par là même une bien meilleure compréhension de l'univers. Entre temps, les réponses ont changé notre vie quotidienne en nous apportant la télévision, le transistor, l'imagerie médicale et les ordinateurs.

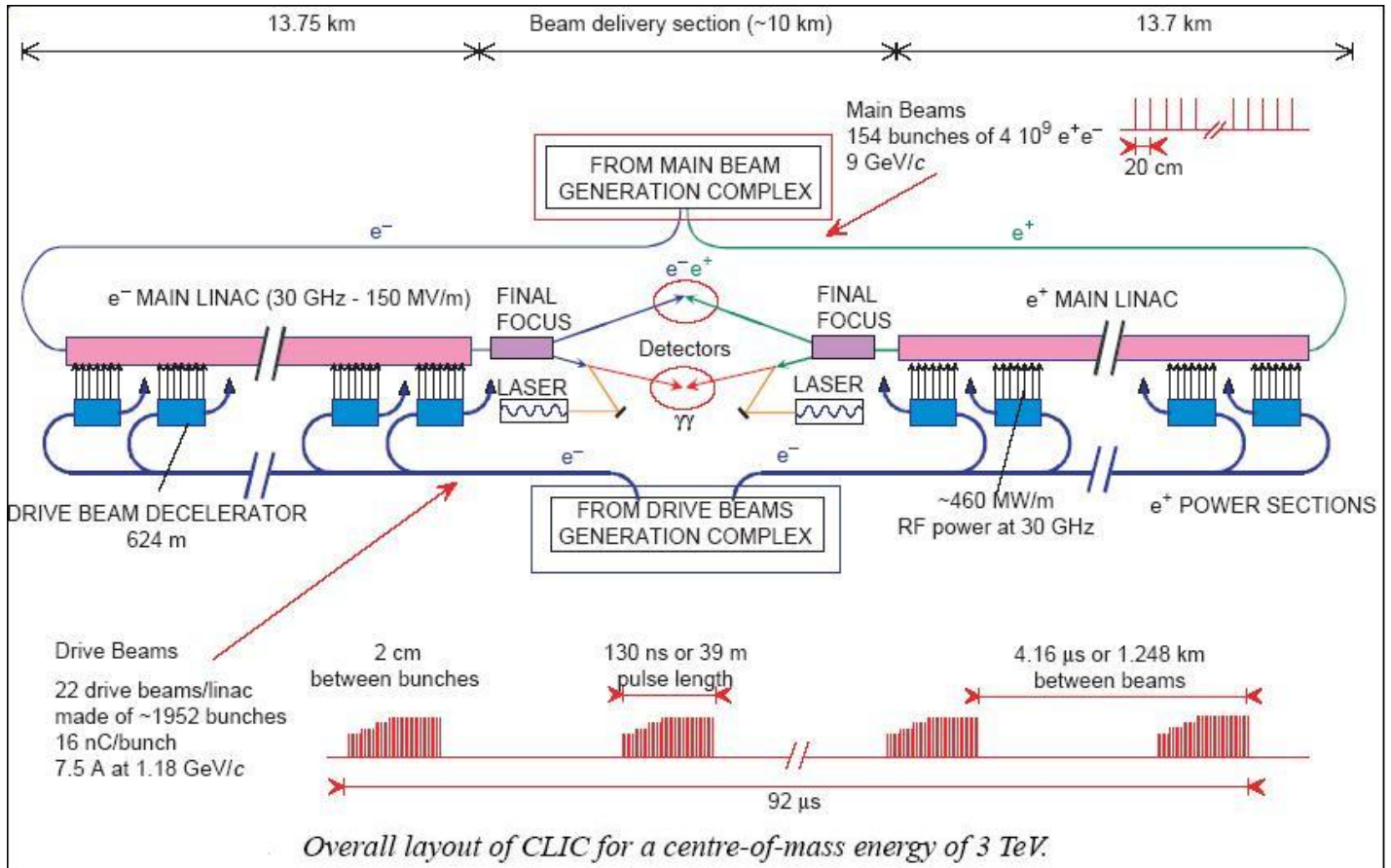
A l'aube du 21ème siècle, nous sommes face à de nouvelles questions et le LHC est conçu pour tenter d'y répondre.



Tracé de l'anneau du L.H.C. (on peut voir l'aéroport de Genève et le lac Léman à droite de l'anneau)

c) Le CLIC

Dans le cadre d'une coopération internationale, des recherches sur la prochaine génération d'accélérateurs de particules sont menées. Actuellement un des projets les plus viables est le CLIC (Compact Linear Collider) qui est un accélérateur de particules (électrons, positrons) linéaire d'environ 40 kilomètres de long.



Ce système permet de nombreuses améliorations par rapport aux accélérateurs actuels. En effet, avec les technologies mises en jeu, on pourrait avoir des puissances au niveau des collisions plus importantes que précédemment, de 0.5 à 5 TeV, en linéaire. Ce qui était impossible à réaliser avec des électrons très « véloces » (et donc durs à diriger) dans un anneau, en grande partie à cause de la perte d'énergie du faisceau par rayonnement synchrotron.

De plus, les cavités d'accélération du faisceau seront plus puissantes que dans le L.H.C., elles seront de l'ordre de 150 MV/m (contre 5 MV/m dans le L.H.C.). Il n'y aura pas de pertes par rayonnement synchrotron car les particules seront accélérées linéairement. Et grâce à un nouveau type de cavités accélératrices, le guidage du faisceau -ainsi que le CLIC- pourront fonctionner à température ambiante. De ce fait les installations n'auront pas besoin d'être assistées par des équipements supraconducteurs nécessitant d'importants besoins en cryogénie. Car actuellement le plus gros laboratoire de cryogénie du monde se trouve au C.E.R.N. pour le refroidissement des aimants supraconducteurs du L.H.C.

d) Le laboratoire de Photoémission

Il fait partie du département « Accélérateurs et faisceaux » (AB), du groupe « Areas, Target and Beams » (ATB), et de la section « Lasers et Photocathodes » (LP).

Dans le cadre d'études faites pour la réalisation future d'un accélérateur de type CLIC, un nouveau type de source d'électrons a été sélectionné. Il s'agit de générer le faisceau d'électrons par photoémission. Cela permettra par rapport aux systèmes actuels d'avoir une source d'électrons plus intense, et de pouvoir utiliser des paquets de longueur temporelle plus courte (quelques picosecondes) que les précédents systèmes. La photocathode produisant ce faisceau d'électrons est insolée par un système laser attendant à la ligne de mesure.

La mission du laboratoire de photoémission où j'ai effectué mon stage est de réaliser puis d'optimiser les photocathodes qui créeront le faisceau du CLIC. Ce laboratoire est aussi l'un des rares au monde à posséder une ligne de mesure complète pour étudier de façon poussée le faisceau d'électrons émis dans le cadre d'une photoémission de puissance.

La réalisation de la surface active des photocathodes se fait sous vide par dépôts de couches minces. Il se trouve que les éléments utilisés pour fabriquer ces couches ne peuvent pas être utilisés à pression atmosphérique. Il est donc nécessaire de fabriquer la photocathode dans l'ultravide. Puis pour l'utiliser on doit rester à très basse pression car certains composants de sa surface active (comme le césium) se polluent d'autant plus vite que la pression est élevée. À partir de 10^{-8} mbar la photocathode est rapidement inutilisable car sa surface active se détériore.



Plug de photocathode dans l'enceinte de préparation

Les chercheurs réalisant ces photocathodes ont observés que la durée de fonctionnement d'une photocathode avant son obsolescence était très variable, de quelques heures à quelques mois. Il y a quelques années, une collaboration européenne a étudié l'effet de divers contaminants sur les photocathodes développées au laboratoire de photoémission. Les principaux contaminants ont été identifiés comme étant l'oxygène, la vapeur d'eau ou le mono et dioxyde de carbone, et ils proviennent aussi bien des produits évaporés que de l'enceinte elle-même. Ces analyses ont été réalisées dans des laboratoires spécialisés, incompatibles avec les impératifs de production et de tests des photocathodes.

C'est pourquoi le laboratoire a ajouté à la chaîne de mesure un spectromètre de masse performant, afin de pouvoir déterminer qualitativement et quantitativement les différentes espèces présentes dans l'enceinte de la photocathode lors du processus de réalisation, et lors de l'utilisation de celle-ci. Le spectromètre de masse choisi est un ancien modèle très précis qui n'est plus fabriqué aujourd'hui. Un autre groupe du C.E.R.N. avait développé il y a plusieurs années une interface d'acquisition Labview de ce spectromètre. Mais, elle avait cependant plusieurs lacunes pour l'utilisation du système étudié ici. De ce fait, le but principal de mon stage a été de développer une interface utilisateur de ce spectromètre de masse sous Labview 7.1. Interface permettant aussi bien l'acquisition de spectres que l'analyse en continu de plusieurs espèces prédéfinies.

e) Caractéristiques des photocathodes

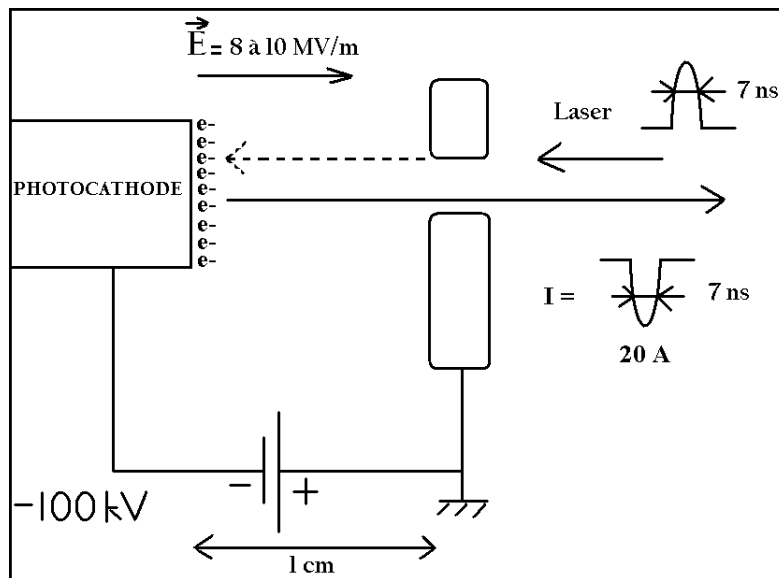
Suite à plusieurs études européennes menées ces dernières années dans le but d'optimiser au mieux les performances de ces photocathodes, de nombreux essais ont été réalisés : aussi bien dans les divers composants des couches minces et leurs rapports stœchiométriques que dans les différents polluants affectant les photocathodes. On cherche toujours à avoir la meilleure efficacité quantique (QE) pour toutes les photocathodes. QE correspond au rapport du nombre d'électrons produits par la photocathode insolée sur le nombre de photons émis par le laser insolant celle-ci. Dans les tests pour mesurer QE on utilise la formule suivante, déduite de l'équation $E = h/\lambda$:

$$QE (\%) = (124 \times Q_{\text{faisceau}} (\text{nC})) / (W_{\text{laser}} (\mu\text{J}) \times \lambda_{\text{laser}} (\text{nm}))$$

Les prochaines photocathodes seront composées de couches minces d'environ 10 nm de tellure et de 10 nm de césium dans le rapport stœchiométrique Cs_2Te . Des essais avaient aussi été réalisés avec de l'antimoine, du sodium et du potassium. Les épaisseurs des couches minces sont particulièrement fines comparées à ce qui est fait en général dans l'industrie. Certains tests ont été réalisés avec succès jusqu'à des épaisseurs de 5 angströms !

Pendant la production des couches minces un laser de faible puissance éclaire à la longueur d'onde d'utilisation (262 nm) la photocathode afin de pouvoir suivre précisément et en direct la formation des couches minces dans les conditions voulues.

Suite à la production des photocathodes, vient la qualification de celles-ci avant de les transférer sur les installations qui les utiliseront. En effet, un module d'essai du CLIC a été installé au CERN afin de tester la viabilité du futur accélérateur. Dans le laboratoire on effectue les tests de qualification selon le schéma suivant :



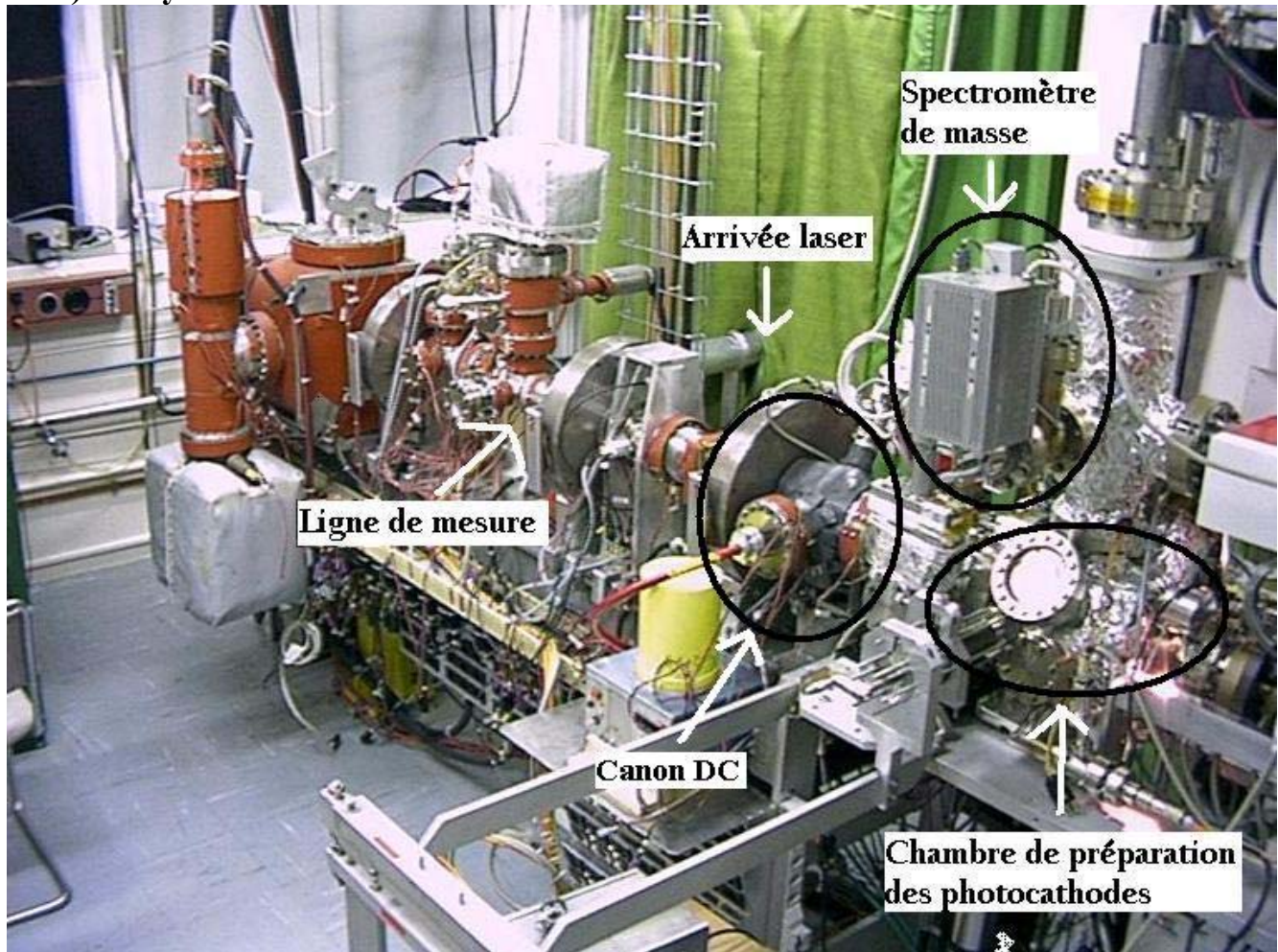
À la fin de ces tests de qualification on a les caractéristiques des différentes photocathodes pour leur utilisation future. On effectue aussi une cartographie précise de QE sur toute la surface des photocathodes.

Les électrons sortant de la photocathode passent du repos à 55% de la vitesse de la lumière sur 1 cm dans le canon DC. C'est l'équivalent de quatre à cinq fois l'intensité de la source d'électrons qui était produite au LEP (accélérateur précédant le LHC), soit $4 \text{ à } 5 \text{ A}$ par paquet d'électrons contre 20 A dans les tests !

Ici le champ électrique accélérant les électrons à la sortie de la photocathode est continu. Cependant dans le module de test CLIC une accélération encore plus puissante du faisceau d'électrons (jusqu'à 100 MV/m) est produite. Un champ électrique alternatif à 3 GHz est appliqué pendant $1,5 \mu\text{s}$ par paquet d'électrons dans une cavité particulière (l'ensemble constitue un canon RF).

3) Présentation du système de mesure

a) Le système de mesure



Tout le système est mis sous vide par plusieurs pompes turbomoléculaires, ioniques et à sublimation de titane. Avant la réalisation des photocathodes le système est étuvé plusieurs jours.

On peut voir sur la photo ci-dessus :

- * **la chambre de préparation** des photocathodes dans laquelle sont effectués les dépôts de couches minces. Les photocathodes sont aussi éclairées par le laser pendant la production.

- * **le spectromètre de masse** Balzers QMG112 A. Ce que l'on voit sur la photo est une partie de l'électronique associée à la tête de mesure. Le spectromètre de masse sera détaillé en 3)b).

- * **l'arrivée du laser** de puissance sert de source de lumière pour la production d'électrons par la photocathode. L'ensemble du système laser se trouve derrière le rideau pour des raisons de sécurité.

- * **la ligne de mesure** commence par un solénoïde au premier disque en métal massif se trouvant près de la chambre de préparation et va jusqu'au fond de la pièce avec tous les équipements en rouge. Cette ligne de mesure est constituée d'électroaimants pour maintenir le faisceau d'électrons dans la chambre à vide, ainsi que de nombreux modules de mesures de ce faisceau.

- * **le canon DC** où siège la photocathode pour les tests de qualification (voir page précédente).

Au début de mon stage, j'ai instrumenté sous Labview un couple de jauge Penning/Piranni qui permet de suivre l'évolution de la pression (basse pressions ($<10^{-3}$ mbar)/haute pressions ($>10^{-3}$ mbar)) dans le temps. Plusieurs de ces couples sont répartis sur l'ensemble de l'installation.

Dans la seconde, et plus importante, partie de mon stage, j'ai du réaliser l'interface utilisateur du spectromètre de masse Balzers QMG112 A attendant à la chambre de préparation des photocathodes.

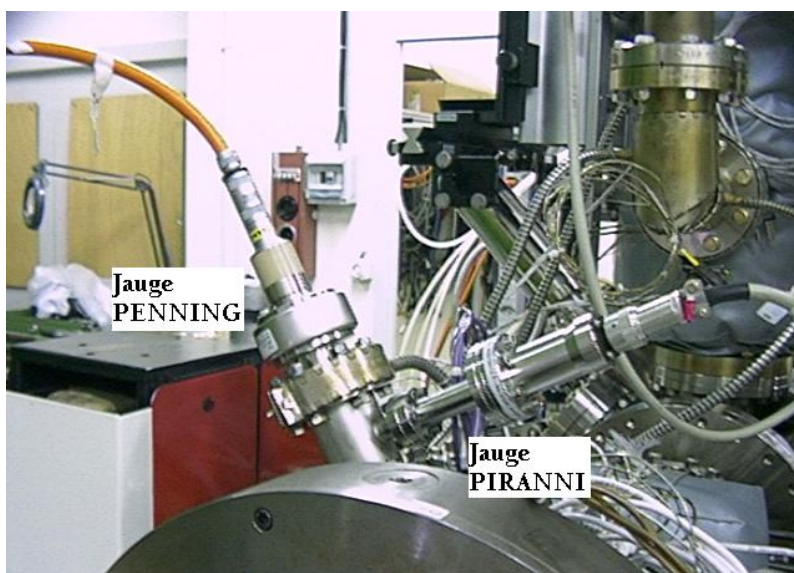
b) Les jauges TPG300

C'est un couple de jauges Penning/Piranni. Ces deux jauges couplées permettent de couvrir une large gamme de pressions : de 1000 à 10^{-11} mbar. Plusieurs de ces couples sont installés sur le système de mesure.

La jauge **Piranni** fonctionne avec un filament très fin, étiré dans un tube, qui est chauffé par un courant : il forme un bras d'un pont de Wheatstone. Les molécules de gaz refroidissent d'autant plus le filament que la pression est élevée. Pour maintenir le filament à température constante, le courant injecté varie : il est donc fonction de la pression. Cette jauge mesure les **hautes pressions**.

La jauge **Penning**, ou cathode froide, fonctionne avec un capteur, qui sous l'effet d'une haute tension, ionise le gaz dans lequel la pression doit être mesurée. Le courant d'ions ainsi créé est soumis à l'effet combiné d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Il est ensuite collecté par une électrode : ce courant électrique est fonction de la pression. Cette jauge mesure les **basses pressions**.

Ces couples de jauges sont reliés à des boîtiers de commandes qui peuvent être commandés par liaison série RS-232.



Jauges Penning/Piranni sur la ligne de mesure



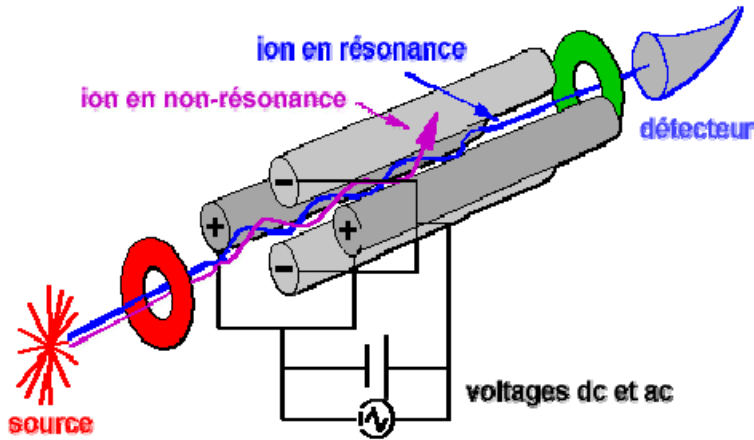
Boîtier de mesure des TPG300

c) Le spectromètre de masse

Le spectromètre, que j'ai instrumenté sous Labview durant mon stage, est un spectromètre de masse quadripolaire de la marque Balzers, modèle QMG112 A qui a été fabriqué en 1984. Bien que très performant, il n'a pas été reproduit depuis car trop coûteux à l'entreprise par rapport au nombre d'unités vendues.

Afin de privilégier la précision des mesures, le laboratoire a choisi ce spectromètre de masse ancien mais performant. Et afin de faciliter la prise de mesure, ainsi que son interprétation j'ai donc réalisé l'interface utilisateur de cet appareil.

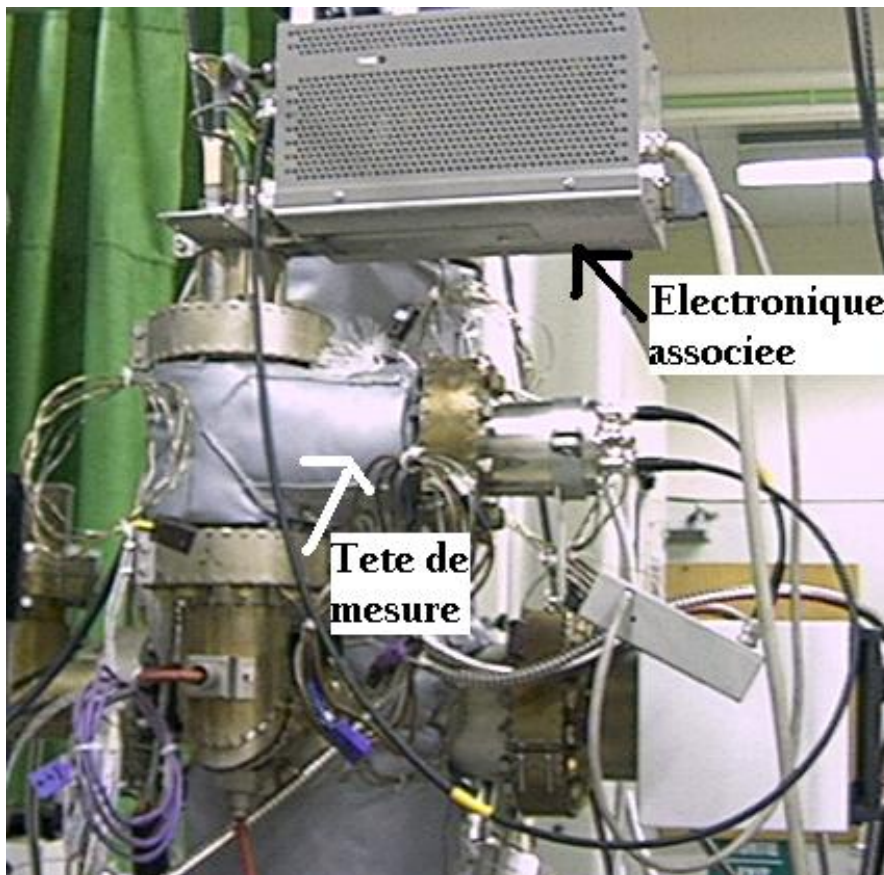
Un spectromètre permet d'obtenir le spectre des masses présentes dans une enceinte de basse pression donnée. Le spectre que l'on obtient représente le courant ionique récupéré par l'appareil en fonction du rapport masse sur charge de ionisation (m/e) des différentes masses atomiques dans l'enceinte. Les différentes espèces présentes dans l'enceinte sont tout d'abord ionisées dans un champ électrique intense à l'entrée de la tête de mesure. La sélection des rapports m/e s'effectue suite à cette ionisation selon le schéma suivant pour un spectromètre de masse quadripolaire :



Des tensions sinusoïdales précises sont envoyées dans les quatre pôles identiques et opposés deux à deux du spectromètre. Ces tensions génèrent des champs magnétiques qui rentrent plus ou moins en résonance avec les différentes « masses », ionisées, présentes dans l'enceinte.

Selon les paramètres fixés seuls les ions d'un rapport m/e précis peut arriver au détecteur. De cette façon, en faisant varier les tensions sur les quadripôles, on peut obtenir le courant ionique de toutes les masses présentes dans l'enceinte en fonction de la sensibilité du spectromètre.

Le spectromètre QMG112 peut détecter les rapports m/e jusqu'à 200, et des courants ioniques jusqu'à 1×10^{-16} A.



Tête de mesure et électronique associée du QMG112

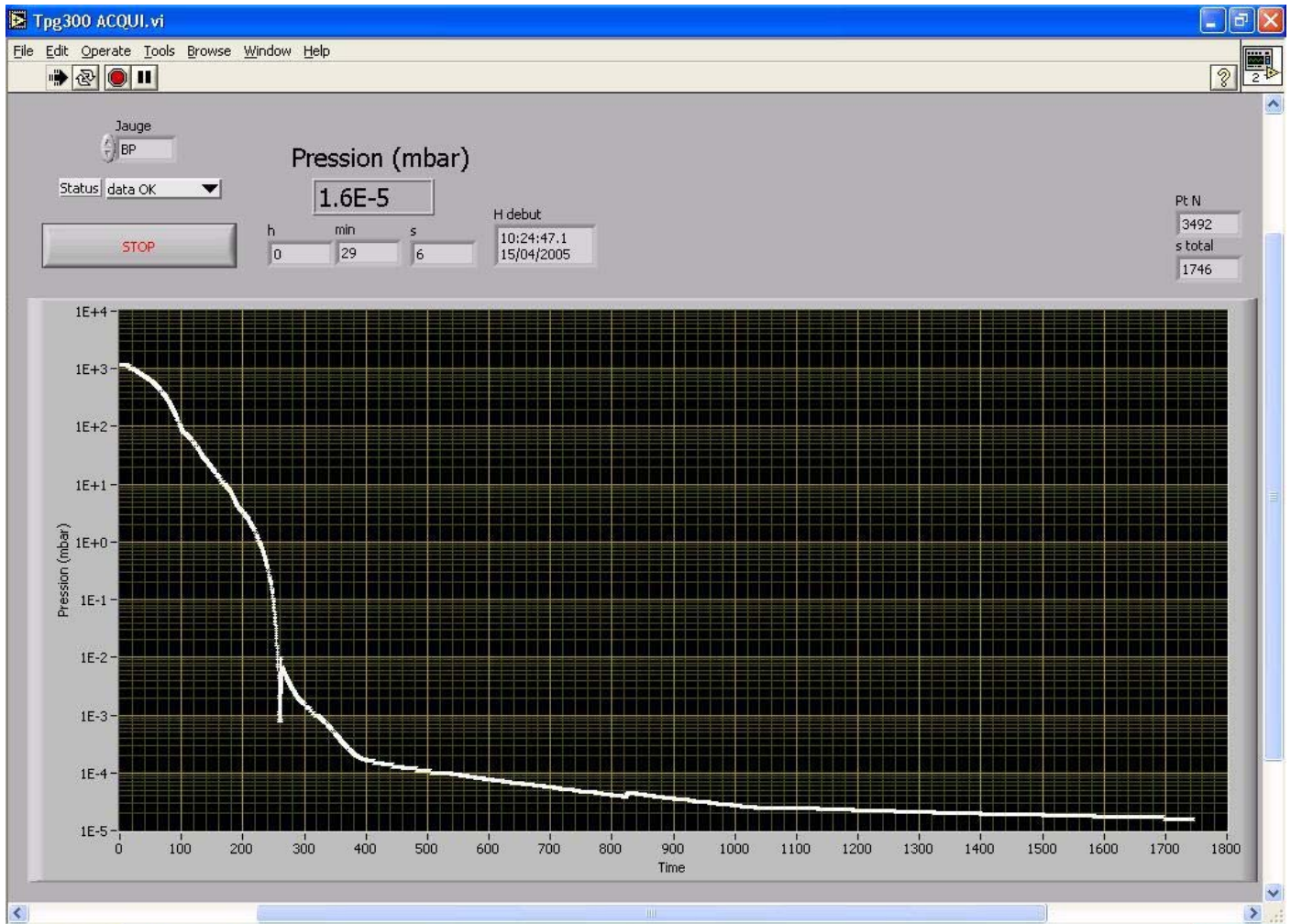
4) Instrumentation du système

a. Les jauges TPG300

(VI = Virtual Instrument, correspondant à un programme ou à un sous programme sous Labview)

Au début de mon stage ne pouvant avoir accès au spectromètre de masse dans les premiers jours, j'ai été amené à réaliser sous Labview 7.1 une interface de mesure de la pression dans le temps avec les jauges TPG300.

Le boîtier de commande des jauges peut être piloté par liaison RS-232. M'aidant de VIs trouvés sur le site du constructeur des jauges, j'ai réactualisé et simplifié ceux-ci afin de les rendre plus adéquats aux besoins présents. Je me suis aussi aidé de la notice des jauges pour comprendre les différents codes d'émission/réception des TPG300 en RS-232.



Face avant du VI de prise de pression des TPG300

Au final l'interface se déroule de la façon suivante. A partir du lancement du VI :

* demande à l'utilisateur s'il veut commencer la mesure en Haute Pression ($HP > 10^{-3}$ mbar) ou en Basse Pression ($BP < 10^{-3}$ mbar) => les jauges ayant leur domaine de mesure en fonction de la pression, cela permet de gagner du temps si l'utilisateur sait déjà dans quel domaine de pression se trouve le système.

* dans tous les cas, le VI commute les jauges automatiquement si la jauge sélectionnée n'est pas dans son domaine de mesure. Cette commutation est déclenchée par le VI suite à la réception d'un code d'erreur émis par le boîtier de contrôle. La commutation aussi est automatique à 10^{-3} mbar.

* Le VI demande aussi le temps (en secondes) entre chaque prise de mesure. Cela permet de ne pas saturer le fichier de mesure enregistré à la fin (en partant du principe que celui-ci sera un fichier Excel « limité » a 65536 valeurs) si on fait des mesures particulièrement longues (un week-end par exemple).

Suite à ces 2 choix, la mesure commence. On peut alors observer sur la face avant :

- (1) **le graphique** de la pression (mbar) en fonction du temps (s). Le temps est en échelle linéaire alors que la pression est en échelle logarithmique.
- (2) **la pression** en temps réel
- (3) **la jauge de mesure** de la pression actuelle (BP ou HP)
- (4) **l'état de la jauge**
- (5) **la date et l'heure** de départ de la prise de mesure
- (6) **le temps écoulé** (en heures, minutes, secondes) depuis le début de la mesure
- (7) **le nombre de points total, et le nombre de secondes total** écoulés depuis le début de la mesure.
- (8) **le bouton d'arrêt du VI**

Lorsque l'utilisateur arrête le programme celui-ci lui demande où il souhaite enregistrer le fichier correspondant à la mesure. Il sera composé des données $P \text{ (mbar)} = f(t(s))$.

On peut remarquer sur le graphe ci-dessus plusieurs choses :

- la commutation entre les jauges HP/BP produit une discontinuité sur la courbe à $10^{-3} / 10^{-2}$ mbar (environ 260 s). En descente de pression on remarque bien que le boîtier commute de la jauge HP à la jauge BP. La jauge HP n'est pas très précise, elle est incluse dans le système pour donner l'ordre de grandeur de la pression. La précision de la jauge BP provoque aussi la discontinuité visible sur la courbe car elle se cale plus précisément sur la pression absolue que la jauge HP.
- l'efficacité de la pompe turbomoléculaire par rapport à celle de la pompe primaire. La pompe primaire est d'abord mise en route et elle fait descendre la pression de 1000 mbar à 1 mbar (3 décades) en environ 220 secondes. Puis la pression étant suffisamment faible la pompe turbomoléculaire se met en marche et pompe elle aussi environ 3 décades (de 1 mbar à 10^{-3} mbar) en environ 80 secondes ! Soit près de 3 fois plus rapidement...
- puis arrivé à un certain seuil de pression (ici 10^{-4} mbar) on voit bien qu'il faut beaucoup plus de temps pour descendre en pression d'une décade. Cela est dû au fait que l'enceinte désorbe et présente un certain taux de fuite équivalent.

b. Le spectromètre de masse Balzers QMG 112A

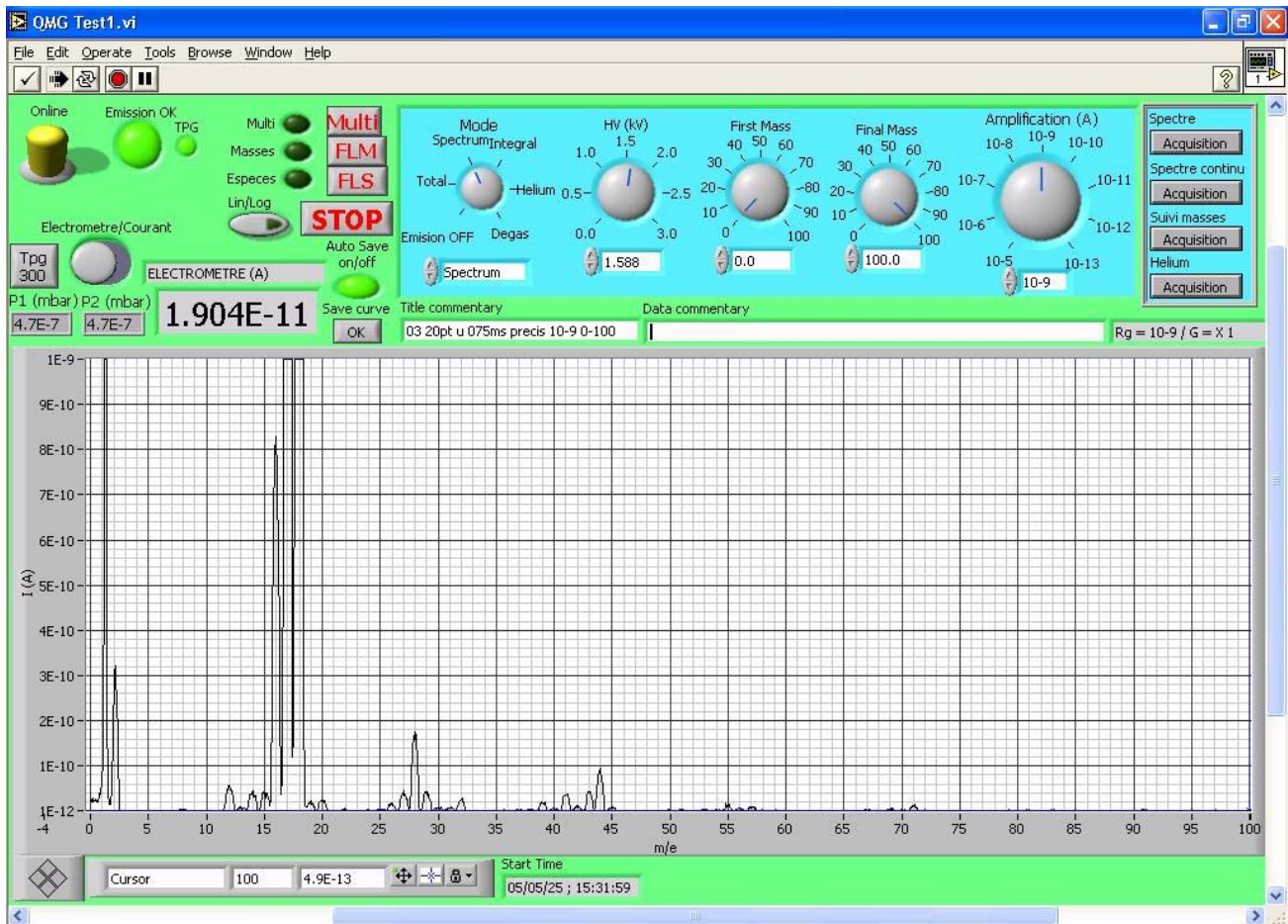


Panneau de commande manuel du QMG112

L'objectif principal du stage était de permettre sous Labview un contrôle du spectromètre de masse offrant les mêmes possibilités que le panneau de commande manuel (photo ci-dessus), ainsi que l'enregistrement et l'analyse des données.

Le contrôle de l'appareil et l'acquisition des données s'est fait avec deux cartes d'acquisitions National Instrument : une DAC et une ADC. Voir annexe A.

Le VI de cette interface utilisateur est relativement complet, et de ce fait très grand et comporte de nombreux sous VIs (plus de 40) pour simplifier le diagramme principal. Ne pouvant pas détailler tout le diagramme et ses sous VIs, j'ai choisi de présenter entièrement la face avant, qui est l'objectif de mon stage. Comme cela TOUTES les possibilités que j'ai pu développées pour ce VI seront détaillées. Ensuite je caractériserai le diagramme en général et quelques points particuliers.



Panneau de commande de l'interface utilisateur du spectromètre de masse sous Labview réalisé pendant mon stage

Le panneau manuel permet de régler **six modes** (en bas, à droite du centre) du spectromètre :

- **EMISSION OFF** : l'appareil est au repos et aucun courant ne le traverse
- **TOTAL** : on peut lire sur l'écran digital la pression, en mbar, mesurée par l'appareil.
- **SPECTRUM** : permet de lire le courant électronique d'une « masse » (d'un rapport m/e en fait) donnée dans l'enceinte. On peut lire cette valeur en statique (sur une masse choisie) ou en continu sur une plage choisie. Auquel cas, il est préférable de brancher une table traçante au boîtier de commande afin de pouvoir garder une trace de l'état du système.
- **INTEGRAL** : mêmes possibilités que le mode SPECTRUM. La différence vient du fait que l'électronique intègre le signal reçu par l'électromètre de la tête de mesure. Ce mode, bien que programmé, n'a pas été utilisé durant mon stage.
- **HELIUM** : l'appareil se règle en mode SPECTRUM sur la masse 4 pour détecter l'hélium moléculaire.
- **DEGAS** : un courant plus important que l'utilisation normale passe dans le filament de ionisation de la tête de mesure pour que celui-ci puisse dégazer. Bien que ces filaments résistent à une utilisation intensive, il y en a deux dans la tête mesure, cela permet d'en avoir un de secours en cas de problème.

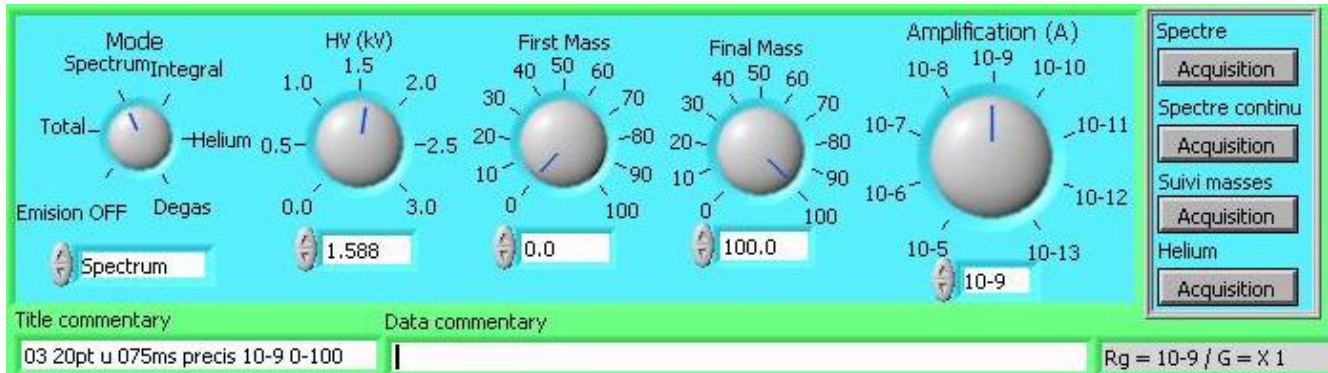
De là on peut détailler les différentes fonctionnalités du panneau de commande manuel :

- **L'affichage en haut à gauche** : il permet de lire, selon les modes, le courant de ionisation (en A), la pression (en mbar) ou le courant d'émission parcourant le filament de ionisation (en mA). On peut aussi régler avec le bouton rotatif trois modes de lecture (de bas en haut) : le courant parcourant le filament, le numéro de masse observé et le courant de l'électromètre. Les unités (A, mA, mbar) s'allument automatiquement en face avant en fonction de la configuration choisie.
- **le jeu de réglages en bas à gauche** :
 - avec le premier bouton rotatif (First mass) on sélectionne la première masse à observer pour un spectre. Si l'on n'acquiert pas de spectre l'électromètre affiche le courant de ionisation du rapport m/e sélectionné sur ce bouton.
 - Le bouton à sa droite (Width) permet de choisir la largeur (en masse) du scan que l'on souhaite effectuer. Sachant que selon l'état choisi (au préalable) du spectromètre de masse, on peut observer les courants des masses 0 à 100 ou 0 à 200.
 - Le troisième bouton (Speed) permet de sélectionner la vitesse, et donc la précision dans le cas présent, d'un scan. Ces vitesses sont exprimées en « masses par secondes » (en s/u ou ms/u), elles vont de 1 ms/u à 10 s/u.
 - Le quatrième bouton permet de : soit ne pas effectuer de scan (Off), soit d'effectuer un scan (Scan) de la première masse sélectionnée et de largeur choisie (width), soit d'effectuer des scans en continu (Repeat) jusqu'à la sélection du mode Off.
- **le jeu de réglages en haut à droite**: les deux boutons règlent la sensibilité de la lecture du courant d'ionisation du spectromètre. Le bouton de gauche règle la gamme de mesure (Range), il y en a quatre (en A): 10^{-5} , 10^{-7} , 10^{-9} et 10^{-11} . Et le second règle l'amplification de la mesure (Amplification), il y a quatre gammes possibles : X1, X10, X100 et Auto. Nous avons veillé à toujours utiliser le gain le plus petit possible pour minimiser le bruit équivalent, aussi nous n'avons jamais utilisé le gain automatique.
- **le jeu de réglages en bas à l'extrême droite**: ce cadran permet de régler l'amplification électrique du signal qui arrive sur le détecteur de la tête de mesure. Si l'on souhaite utiliser cette amplification (ce que l'on fait tout le temps en raison des sensibilités requises), on sélectionne l'interrupteur sur ON. Ensuite pour régler l'amplification, on se met en mode TOTAL, et on tourne le bouton SEM VOLTAGE jusqu'à ce que la pression affichée par l'appareil concorde avec la pression d'une jauge insérée sur le système.

i) Description de l'interface utilisateur

On peut observer trois parties principales sur l'écran de l'interface utilisateur (photo du bas p.14) : deux pavés de commande en haut à droite, plusieurs indicateurs/interrupteurs en haut à gauche et le graphique permettant d'observer le spectre ainsi que l'heure et la date de prise du spectre.

- **Pavés de commandes** (en haut à droite)



Pavés de commandes de l'interface utilisateur

Les cinq boutons rotatifs permettent d'effectuer tous les réglages nécessaires pour les mesures.

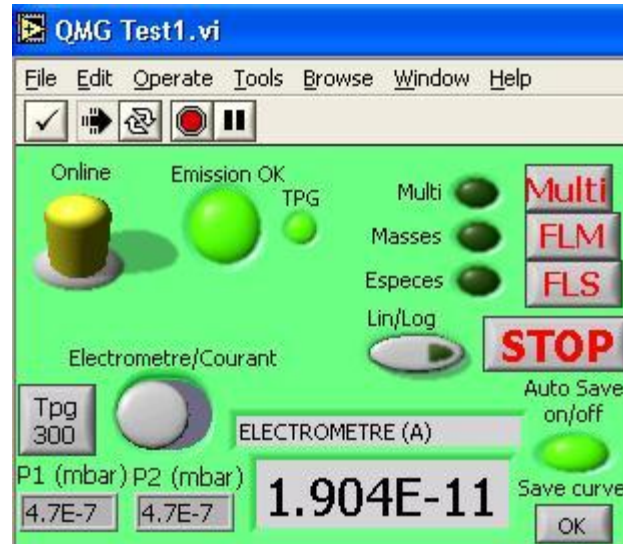
- Mode : permet de se mettre sur le mode souhaité (Emission Off, Total, Spectrum, Integral, Helium, Degas)
- HV (High Voltage) : règle la haute tension du SEM VOLTAGE du panneau manuel. On l'utilise au début pour ajuster l'appareil en mode TOTAL à la pression du système mesuré.
- First Mass : règle la masse de départ d'un spectre
- Final Mass : règle la masse finale d'un spectre. Comme cela on diffère de la largeur du spectre sélectionnable sur le panneau manuel. Mais nous avons trouvé plus clair de choisir la masse de départ et la masse finale pour la réalisation du spectre.
- Amplification : permet de choisir la sensibilité de mesure de l'appareil (de 10^{-5} à 10^{-13} A). Ce bouton combine les différentes combinaisons possibles de Range et Gain, ce qui ne fait apparaître plus qu'un seul bouton aux amplifications continues au lieu de deux paramètres à combiner. En bas à droite de l'image on peut néanmoins observer une petite ligne dans laquelle les paramètres sélectionnés au niveau de l'appareil sont visibles : Rg = Range (en A) et G = Gain. Pour une sensibilité sélectionnée le programme fixe la gamme la plus sensible et le gain le plus petit.

Les quatre boutons du pavé de droite permettent de lancer l'exécution de quatre modes de prise de mesure différents (détails du diagramme p.28) :

- Spectre : acquiert un spectre défini selon les paramètres sélectionnés
- Spectre continu : acquiert en continu un spectre défini selon les paramètres sélectionnés.
- Suivi masses : permet le suivi dans le temps de plusieurs masses (m/e) ou espèces dans le temps en temps réel.
- Helium : l'appareil se règle en mode HELIUM et affiche le courant ionique correspondant dans une jauge sur la hauteur de l'écran. On peut ainsi voir de loin le résultat, cela permet d'utiliser le spectromètre en tant que détecteur de fuite.

Enfin dans les deux lignes du bas « Title commentary » et « Data commentary » permettent d'insérer des commentaires dans la ligne de titre du fichier enregistré ou dans le fichier même.

- Indicateurs/interrupteurs (en haut à gauche) :

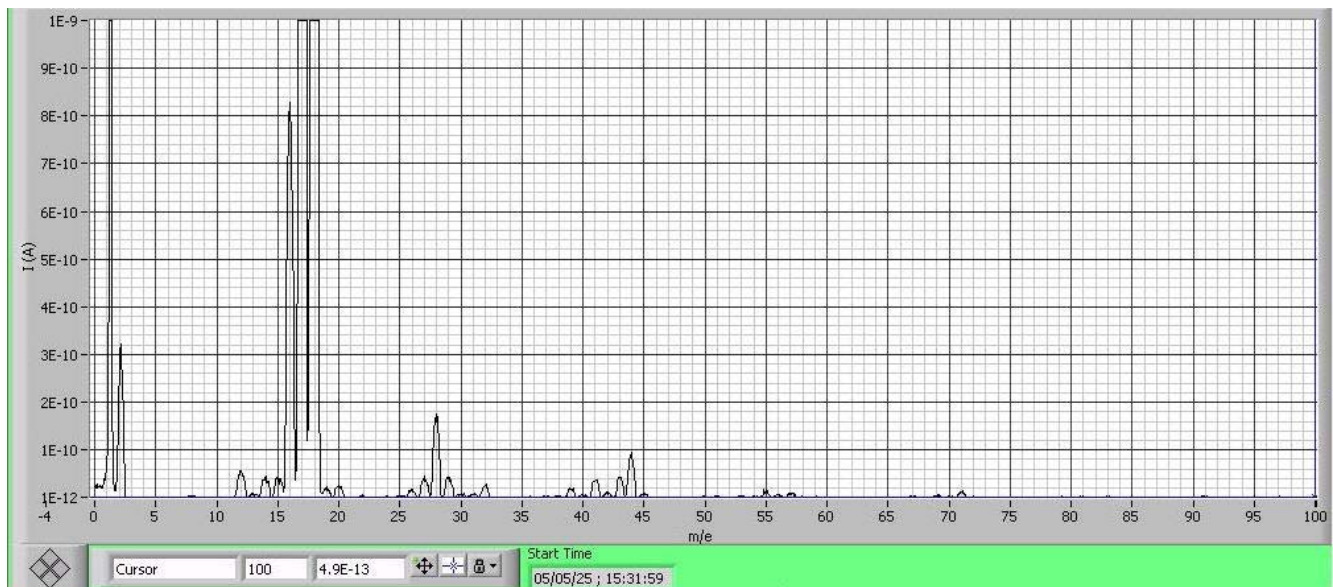


Indicateurs/interrupteurs

- En haut à gauche on peut voir l'interrupteur **ONLINE**, celui-ci permet de prendre le contrôle sous Labview du spectromètre de masse
- A droite de celui-ci on peut voir une led **EMISSION OK**, celle-ci s'allume lorsque du courant parcourt le filament d'ionisation de la tête de mesure. Il est, en principe, éteint seulement en mode EMISSION OFF
- En dessous de ces deux boutons il y a un bouton **TPG300** : il permet de prendre la mesure de la pression du système sur la TPG300 et de l'afficher sur les indicateurs P1 et P2. Si la TPG300 n'est pas branchée sur l'ordinateur, un message d'erreur prévient l'utilisateur et la valeur de la pression affichée est de 0. A partir de la première mesure avec la TPG300, si celle-ci est connectée, la led en haut à droite de EMISSION OK s'allume signalant son bon fonctionnement (et donc celui de la prise de mesure de la pression).
- Les indicateurs **P1** et **P2** affichent la pression (en mbar) du système au début de la prise de mesure du spectre (P1) ainsi qu'à la fin de celui-ci (P2). Comme cela on peut rapidement observer si une variation de pression du système a eu lieu pendant la prise du spectre.
- A cote du bouton TPG300 on a un interrupteur **Electromètre/courant** qui permet de sélectionner la lecture souhaitée dans le cadran digital. En mode Electromètre, on peut lire le courant ionique de la masse sélectionnée sur First Mass. Dans le mode Courant, on peut lire le courant (en mA) envoyé dans le filament d'ionisation de la tête de mesure.
- **L'indicateur digital** permet de lire les différentes valeurs mesurées que l'on peut observer sur le panneau manuel. La ligne au dessus s'adapte en fonction du mode choisi de l'appareil. Peuvent donc s'afficher : « Pression (mbar) » en mode TOTAL, « Courant d'émission (mA) » en mode Courant et « Electromètre (A) » dans tous les modes SPECTRUM, INTEGRAL et HELIUM.
- En haut à droite, on observe **trois leds ainsi que des boutons STOP** en face avant. Ces indicateurs/stops correspondent aux boucles While de prise de mesure des modes : « Spectre continu » ici Multi, « Suivi des masses » ici FLM (Follow Masses) et « Suivi des espèces » ici FLS (Follow Species). Lorsqu'un de ces modes est en fonctionnement, la led correspondante s'allume ; et lorsqu'on veut arrêter la prise de mesure, il faut appuyer sur le bouton STOP correspondant. Labview n'acceptant pas les variables locales de boutons stop, j'ai été contraint de faire trois boutons stop distincts, et non un seul qui arrêterait tout mode continu.

- Le **gros bouton STOP** est l'arrêt général du VI.
- Le **bouton Lin/Log** permet d'afficher les courants (l'axe des ordonnées) en mode linéaire ou logarithmique. Ce paramètre prend effet en dehors des boucles continues, donc avant la prise de spectre ou après celle-ci, sur le dernier spectre affiché. La prise de mesure du courant de l'électromètre varie sur le panneau manuel de 1,000 à 0,001 selon la sensibilité choisie. Le programme fait donc toujours afficher le spectre sur trois décades pour une sensibilité choisie. Par exemple, pour une sensibilité de 10^{-9} A, le spectre affichera les courants de 10^{-9} à 10^{-12} A. La représentation logarithmique est alors appréciable pour mettre en évidence de faibles courants néanmoins détectés qui seraient le signal de la présence de certaines espèces dans l'enceinte étudiée.
- Un **bouton Auto Save on/off** permet la sauvegarde automatique de tous les spectres réalisés par le programme. Ceux-ci sont tous stockés et nommés par date, heure et type de spectre (simple, multi, FLM, FLS). Un exemple de fichier est présent dans l'annexe B. Les fichiers comprennent la date et l'heure de la prise de la première mesure du fichier en question, les commentaires rentrés par l'utilisateur dans l'interface, la pression initiale et finale de la prise du spectre et le courant ionique en fonction de la masse et du temps pour les modes FLM et FLS. Pour ces modes sont aussi rajoutés d'autres paramètres de mesure fixés au lancement du programme.
- Un **bouton Save curve** qui permet l'enregistrement du spectre que l'on a acquis et que l'on observe. C'est-à-dire soit un spectre simple, soit le dernier spectre acquis dans une série en continu. Si le bouton Auto Save est activé alors le fichier s'enregistre automatiquement dans le répertoire dédié. Si Auto Save n'est pas activé alors le programme demande à l'utilisateur où et sous quel nom il souhaite enregistrer le fichier.

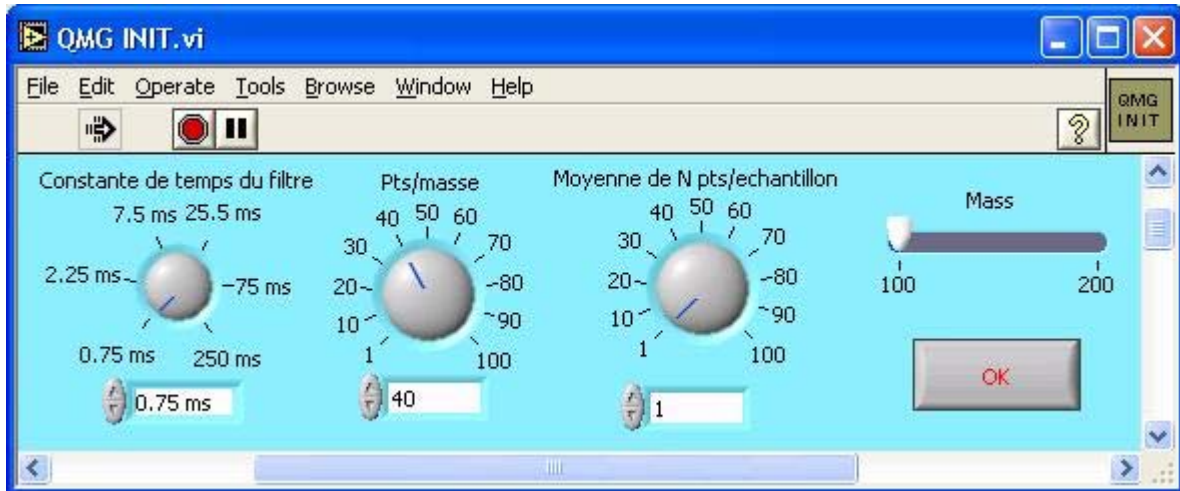
- **Graphique** (au centre) :



Graphique du spectre et date et horaire de prise de celui-ci

Pour des paramètres fixés dans les modes de prise de mesure Spectre et Spectre continu, on observe en temps réel la prise de mesure du spectre sur ce graphique. Il y a le courant d'ionisation (A) en ordonnée, et le rapport m/e mesuré en abscisse. En bas à gauche, on peut observer un curseur qui permet de se déplacer sur la courbe. A droite de celui-ci, on peut lire une chaîne de caractère qui indique la date et l'heure (à la seconde près) de début de prise de mesure du spectre.

- **Paramètres de départ**

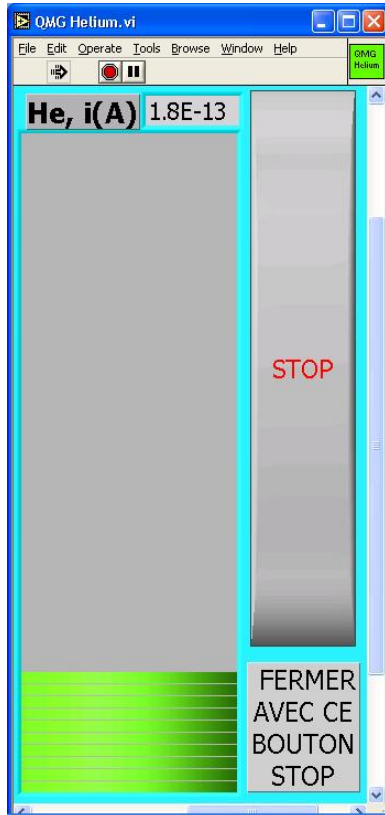


Interface de choix des paramètres initiaux de prise de mesure

Lors de la prise du contrôle de l'appareil (interrupteur ONLINE), la « boîte de dialogue » (un sous VI) ci-dessus s'ouvre pour proposer à l'utilisateur de choisir des paramètres qui seront fixés pour l'ensemble de toutes les mesures. Ces paramètres sont retenus dans des variables globales ce qui permet de les appliquer simplement à travers tous les sous-VI.

- Constante de temps du filtre : la méthode de prise de mesure d'un spectre n'est pas la même dans l'interface que dans l'appareil. En fait, avec le panneau manuel la sélection des masses à mesurer se fait par une rampe de tension qui varie en fonction de la vitesse de scan choisie. Pour avoir plus de souplesse, nous ne générons pas une rampe en tension mais demandons à l'interface de sélectionner les masses les unes après les autres pour le spectre souhaité. De ce fait, le bouton du panneau manuel Speed pourrait sembler inutile. Cependant une constante de temps du filtre de prise de mesure est automatiquement sélectionnée par l'appareil en fonction de la vitesse choisie (Speed du panneau manuel). Ce premier bouton permet donc de régler la précision de la mesure de chaque point ; en fait, il sélectionne un rapport Speed pour ajuster la constante de temps de filtre associée qui nous intéresse. La précision augmente avec la durée de la constante de temps du filtre sélectionné.
- Pts/masse : permet de choisir combien de points seront pris par unité de m/e. On peut aller de 1 à 100 points par masse.
- Moyenne de N pts/echantillons : une fois que l'appareil s'est positionné sur une masse dont il faut prendre la mesure, suit une boucle For qui prendra N points d'affilée. La valeur, affichée dans le spectre et retenue dans les tableaux de mesures enregistrés, est en fait la moyenne de ces N valeurs prises successivement. Suite à plusieurs essais, on a remarqué que l'appareil se stabilisait bien et que ce paramètre n'était pas très influent sur la précision de la mesure.
- Mass : comme expliqué précédemment, le spectromètre de masse peut être réglé pour lire les masses de 0 à 100 ou de 0 à 200 (par des configurations de jumpers spécifiques). Ici, on sélectionne la configuration dans laquelle se trouve déjà l'appareil, à savoir s'il est configuré pour lire les masses jusqu'à 100 ou 200. Cela permet au niveau logiciel de régler les valeurs maximums de First Mass et Final Mass aux valeurs adéquates.
- Bouton OK : permet de valider les paramètres choisis

- **Mode de prise de mesure HELIUM**



Lorsque ce mode de prise de mesure est sectionné la fenêtre à gauche apparaît (un sous VI en fait, p.27). On peut y lire le courant d'ionisation de l'hélium ($m/e = 4$) en haut et le voir aussi graphiquement dans un indicateur linéaire pouvant afficher jusqu'à trois décades sous la sensibilité (Amplification) choisie.

Le bouton STOP permet de fermer cette fenêtre et de revenir à l'interface principale.

La taille de l'indicateur a volontairement été choisie très grande afin que celui-ci puisse être vu facilement sur l'écran de loin. De la sorte il est possible d'utiliser facilement ce mode de mesure comme un détecteur de fuite (à l'hélium) du système sous vide étudié.

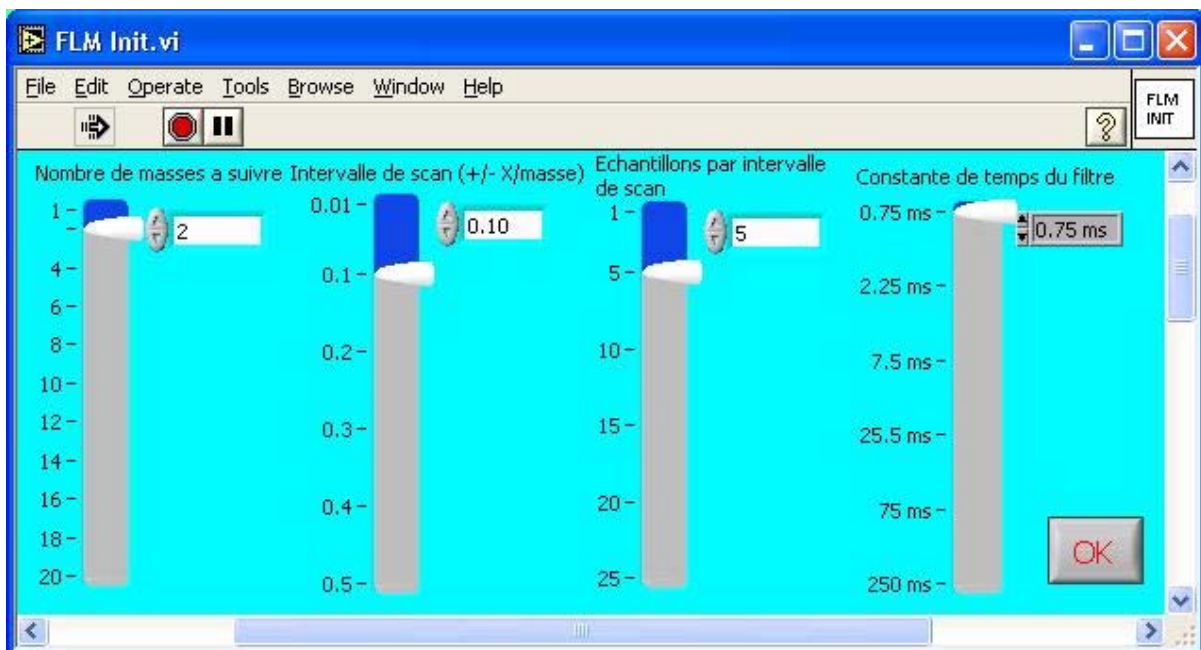
- **Mode de prise de mesure SUIVI MASSES**

Il propose le choix de deux modes de mesures : le suivi de masses : FLM, ou le suivi d'espèces : FLS (donc éventuellement composées de plusieurs masses).

L'idée initiale est de pouvoir suivre les pressions partielles jusqu'à une vingtaine d'espèces dans le temps. Cela est possible pour certaines espèces simples ou bien connues, cependant il faut aussi suivre certains métaux qui sont déposés en couches minces durant le processus. Et les coefficients de conversions spectre => pression pour les métaux n'existent pas dans la littérature car les spectromètres de masse observent rarement longtemps des métaux en phase gazeuse.

Actuellement l'interface de suivi des espèces propose à l'utilisateur les espèces qu'il souhaite suivre dans le temps, et l'interface suit ensuite toutes les masses nécessaires à la déduction des pressions souhaitées. D'ici la fin de mon stage (fin juillet), je pense améliorer et finaliser cette interface de suivi des espèces.

○ Choix des paramètres de mesure (FLM/FLS)



Lorsque le choix entre le suivi des masses, ou espèces, a été effectué, cette boîte de dialogue propose à l'utilisateur différents paramètres. Ceux-ci sont directement intégrés dans des variables globales qui permettent d'appliquer simplement ces paramètres à travers tous les différents sous VI. On choisit de gauche à droite :

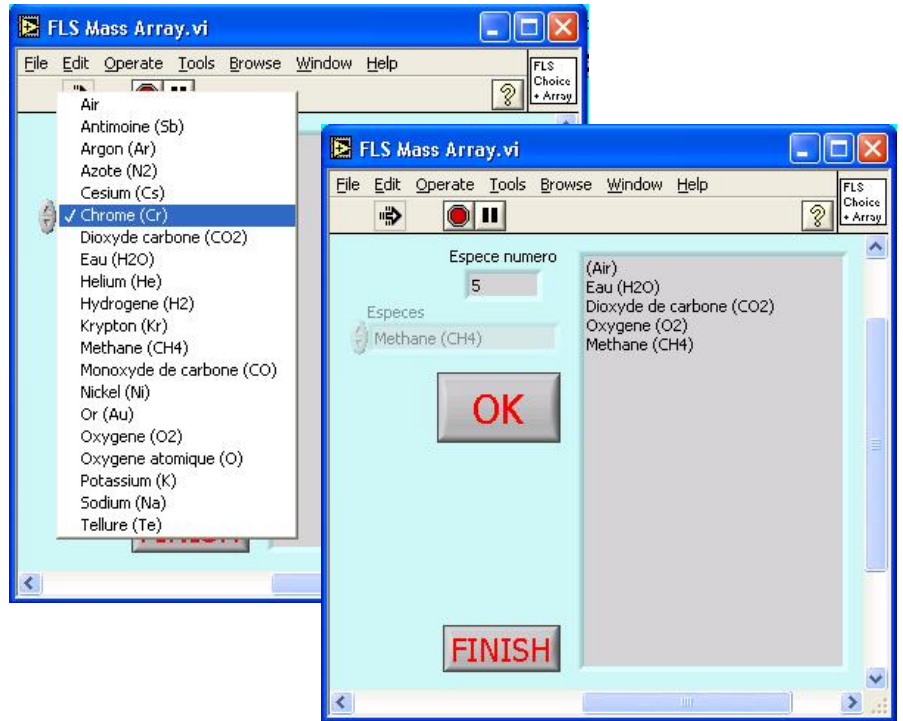
- 1) Le nombre de masses, ou espèces, qui veulent être suivies.
- 2) L'intervalle de scan souhaitant être utilisé pour la mesure de chaque masse. C'est-à-dire, par exemple, pour la masse 18 à ± 0.25 masse que l'interface scanner pour la valeur de la masse 18 des masses 17.75 à 18.25.
- 3) Echantillons par intervalle de scan : cela détermine le nombre de points (de masses en fait) qui seront mesurés par demi intervalle de scan. C'est-à-dire que si l'on choisit 5 échantillons, l'interface prendra la mesure de 5 masses entre la valeur souhaitée (18 dans l'exemple précédent) et une des bornes de mesures (17.75 ou 18.25 dans l'exemple précédent). Ce qui fait que le nombre total de points pris pour une masse mesurée donnée (i.e. 18) sera de $2 \times 5 + 1 = 11$ points avec les choix faits précédemment (la mesure supplémentaire étant celle de la masse examinée précisément). Les prises de mesures des différentes masses sont également réparties dans l'intervalle de mesure, pour une masse suivie donnée.
- 4) Constante de temps du filtre : comme précédemment, cela détermine la précision souhaitée du filtre électronique du spectromètre.

Une fois que ces paramètres ont été validés, une seconde interface s'ouvre afin de choisir les masses/espèces que l'on souhaite suivre dans le temps.

o Choix des masses/espèces



FLM : choix des masses à suivre



FLS : choix des espèces à suivre

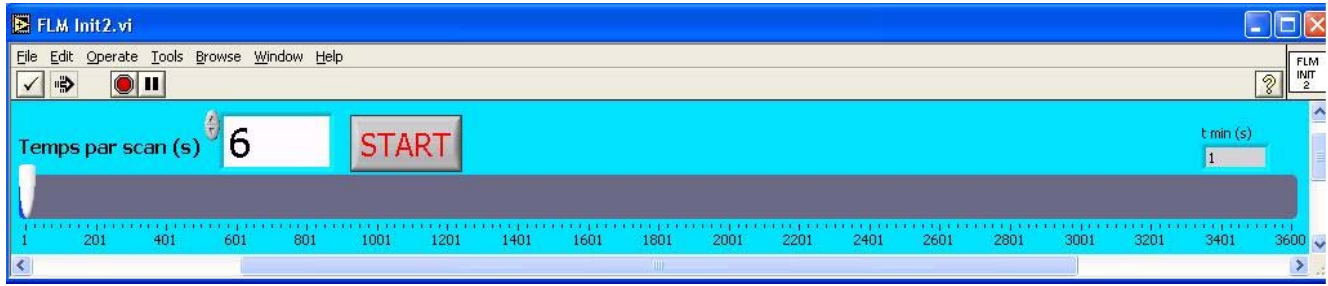
- 1) FLM: on choisit de suivre jusqu'à vingt masses dans l'interface utilisateur. Celles-ci s'affichent dans le tableau visible sur la photo FLM ci-dessus. On peut lire le numéro de la masse à suivre à valider (la 1ère, la 2ème...) au dessus de la case où on rentre les masses à suivre. Chaque masse est à valider avec le bouton OK, et il faut appuyer sur le bouton FINISH une fois que l'on veut continuer. Lorsque le nombre de masses à suivre décidé, à l'étape précédente, a été validé la case où l'on rentre la valeur des masses à suivre se grise et devient inutilisable.
- 2) FLS: dans cette interface on choisit dans une liste de vingt espèces celles dont on veut suivre l'évolution. Les choix d'espèces effectués s'affiche au fur et à mesure dans le tableau à droite. Il faut valider les espèces les unes après les autres avec le bouton OK, et appuyer sur le bouton FINISH une fois que l'on veut continuer. Comme dans le mode FLM, on peut voir le numéro d'entrée de l'espèce à choisir (1ère, 2ème...). La liste de choix des espèces se grise et devient inutilisable dès que le nombre d'espèces choisit à l'étape précédente a été validé.

La liste des vingt espèces sélectionnables sont : air, antimoine (Sb), argon (Ar), azote (N₂), césium (Cs), chrome (Cr), dioxyde de carbone (CO₂), eau (H₂O), hélium (He), hydrogène (H₂), krypton (Kr), méthane (CH₄), monoxyde de carbone (CO), nickel (Ni), or (Au), oxygène (O₂), oxygène atomique (O), potassium (K), sodium (Na), tellure (Te).

Les pressions partielles des espèces ne pouvant encore être déduites précisément pour la liste ci-dessus, le mode FLS se résume au mode FLM avec pour masses à suivre les masses nécessaires pour en déduire la présence des espèces correspondantes.

Dans les deux modes, un tri est effectué au final pour éliminer des doublons éventuels.

○ Temps d'attente par scan de masses



Après la sélection des masses/espèces, on demande à l'utilisateur le temps d'attente entre chaque prise de mesure de la série de masses à suivre sélectionnée.

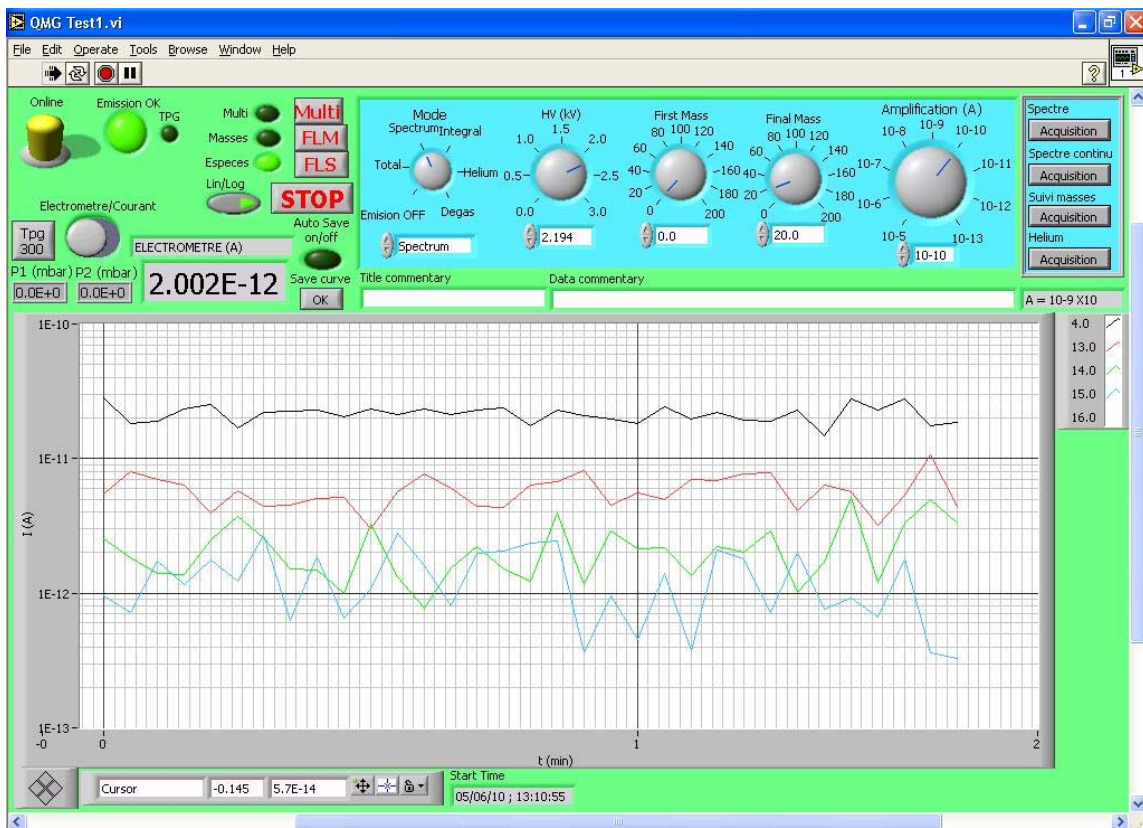
Le temps en question est en secondes. Le temps minimum par scan est affiché à droite de l'écran, ce temps varie en fonction des divers paramètres sélectionnés auparavant.

Ce temps d'attente peut varier du temps minimum établi (1 seconde dans les meilleurs cas) à 3600 secondes. Ce rafraîchissement peut être utile lorsque l'on souhaite voir l'évolution sur une longue période (comme un week end).

Initialement le temps d'attente était calculé selon les divers paramètres en millisecondes et arrondi à la seconde supérieure. Suite à plusieurs rajouts dans le diagramme, une autre solution plus simple et plus efficace pour le calcul a été retenue. En fait le programme réalise un scan sans enregistrement des mesures, et il chronomètre le temps qu'il faut pour réaliser celui-ci. A cela, il ajoute 250 ms de plus, au cas où la machine aurait d'éventuels problèmes de mémoire vive momentanée. Et en arrondissant ce temps à la seconde supérieure, cela donne le temps minimum par scan (T).

$$T (s) = \lceil (t \text{ chronométré (ms)} + 250 \text{ ms})/1000 \rceil + 1$$

Et après la validation de ce dernier paramètre, le suivi des masses dans le temps commence.

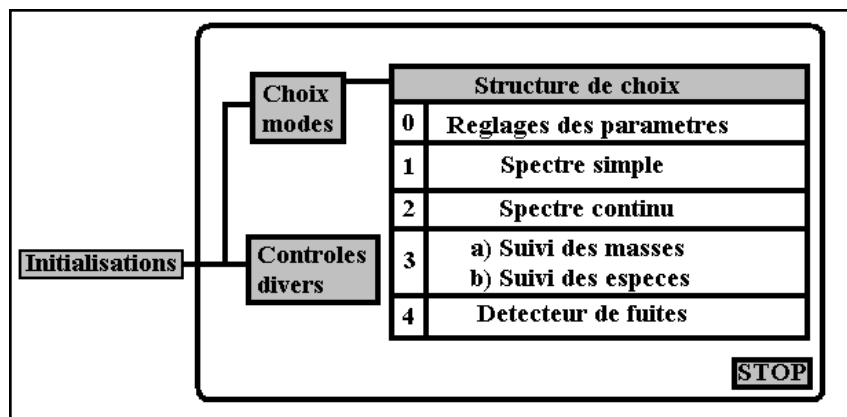


Graphique de suivi du courant ionique des masses (en haut à droite) dans le temps

ii) Détails du diagramme de l'interface utilisateur

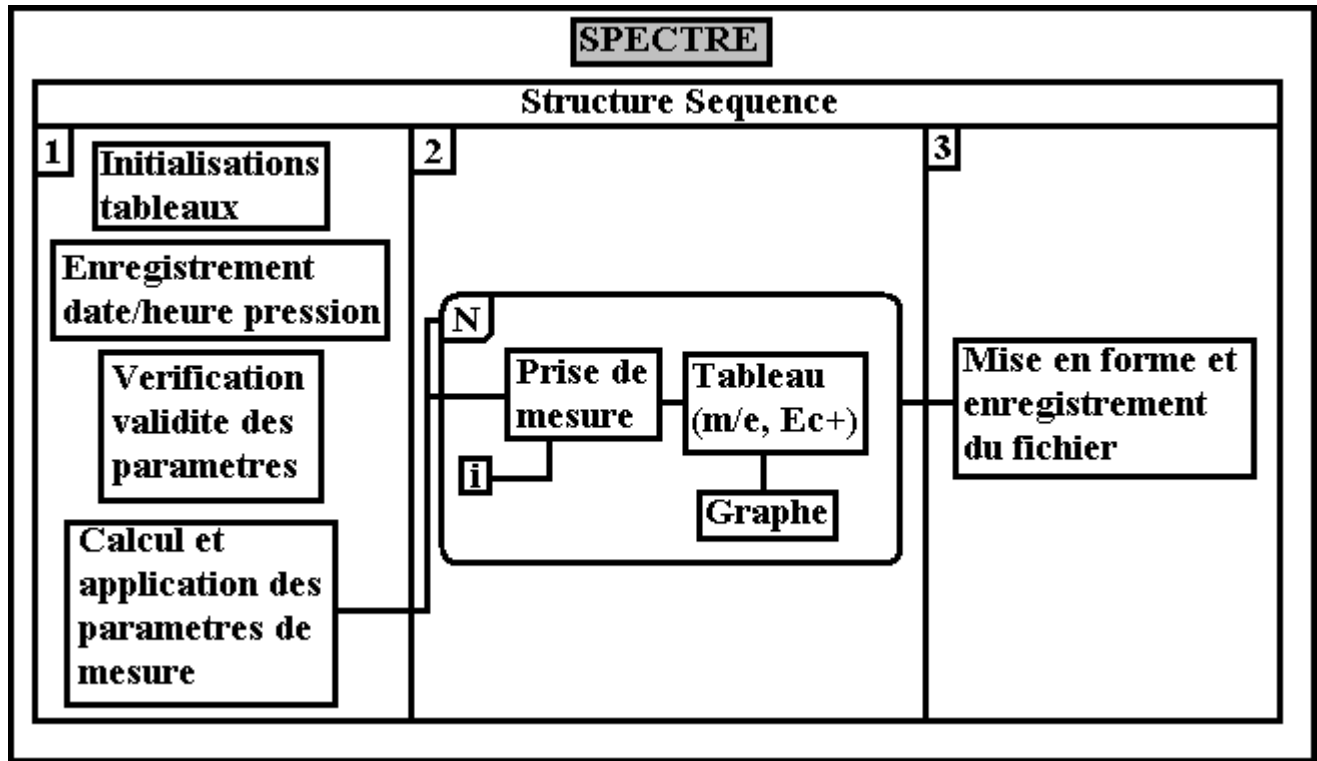
Le diagramme réel de l'interface utilisateur, ainsi que tous les sous-VI qui en dépendent, étant relativement développé, je n'ai pas pu l'insérer dans le rapport. Cependant, pour des raisons de place et de compréhension, j'ai schématisé l'ensemble du processus de fonctionnement du VI.

1) Interface générale



- **Initialisations** : lance l'initialisation des voies analogiques et numériques qui sont utilisées dans le VI (voir Annexe D). Sont fixés aussi plusieurs paramètres pour l'utilisation générale du VI ; une partie est proposée à l'utilisateur au démarrage (voir « Paramètres de départ », p.19), une autre partie réinitialise certains paramètres par défaut (comme le bouton « Autosave » désélectionné...).
- **Boucle While** : suite aux initialisations, le programme rentre dans la boucle While principale, dont le bouton STOP gère l'arrêt du VI. Dans cette boucle se trouvent de très nombreuses boucles/séquences imbriquées les unes dans les autres pour gérer l'ensemble des possibilités développées. Sur le schéma ci-dessus est présenté le cas d'utilisation principal : on a pris le contrôle du spectromètre (Online = ON) et on attend de choisir un mode de prise de mesure. Dans le cas Online = OFF, les signaux adéquats sont envoyés à l'appareil afin que celui-ci fonctionne en local, on peut donc en prendre le contrôle manuel.
- **Contrôles divers** : permet l'affichage, et le contrôle, permanent de quelques paramètres en face avant en attendant qu'un mode de prise de mesure soit activé. Ces éléments sont : Online, Emission OK, TPG 300 (l'indicateur puis le bouton de prise de pression), le bouton « Electromètre/courant », le bouton « Lin/Log », l'afficheur digital qui affiche la valeur du courant parcourant le filament de la tête de mesure, ou la valeur du courant ionique sélectionné sur First Mass.
- **Choix modes** : lorsqu'on appuie sur l'un des quatre boutons du pavé de commande (Spectre, spectre continu, suivi masses, hélium. p.16/28) qui sont inclus dans un cluster, un sous VI renvoie un chiffre correspondant au mode sélectionné. Une structure de choix est connectée à ce sous VI, dans celle-ci sont programmés les différents modes possibles. Si aucun bouton n'est activé le chiffre zéro est envoyé par défaut. Le mode 0 « Réglages des paramètres » commande à l'appareil directement les différents paramètres qui sont changés par l'utilisateur sur les boutons ronds du pavé de commandes (Mode, HV, First Mass, Final Mass, Amplification). Dans la suite, le mode 1 « Spectre simple » va être détaillé. Les autres modes sont construits sur une structure similaire au mode 1, seules quelques petites améliorations nécessaires sont rajoutées selon les besoins spécifiques aux modes en questions.

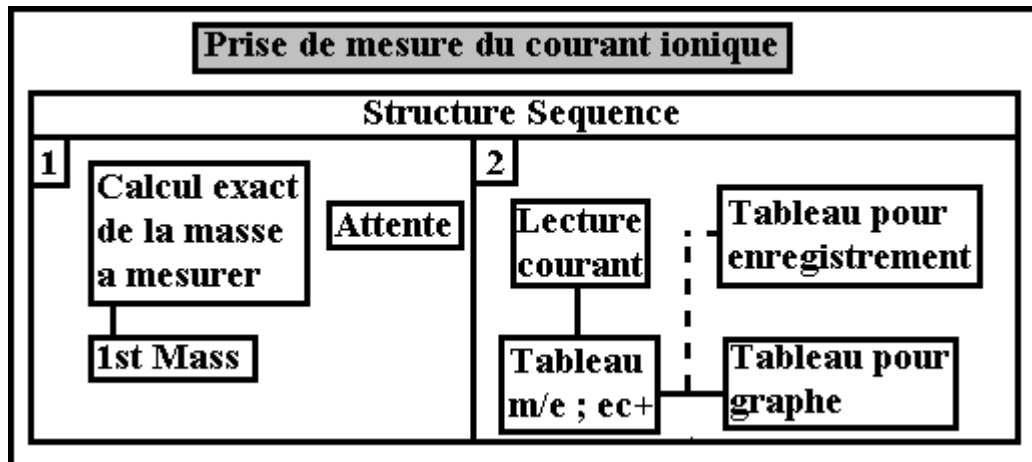
2) Détail du mode d'acquisition : SPECTRE (Eléments du diagramme réel en Annexe C)



Lorsque le mode d'acquisition Spectre est lancé une structure séquence se lance comme celle schématiquement présentée ci-dessus.

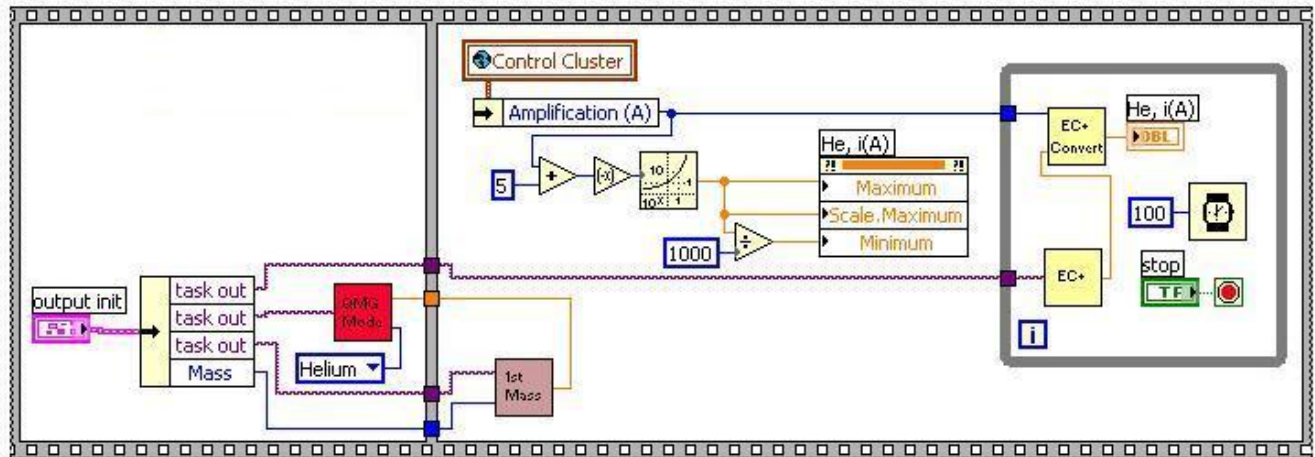
- 1) * Les différents tableaux utilisés pour enregistrer et afficher les différentes données : courant ionique (ec+), m/e, heure, pression... selon les modes de prise de mesure, sont remis à zéro. La date et l'heure de début de prise de mesure sont affichées en face avant puis enregistrées dans une variable globale afin de pouvoir servir à l'enregistrement du fichier de la mesure réalisée. De même pour la pression si la TPG300 est branchée.
 * Une structure condition vérifie que : First Mass < Final Mass et que le mode de prise de mesure SPECTRUM ou INTEGRAL est bien sélectionné. Si ce n'est pas le cas, une boîte de dialogue indique son erreur à l'utilisateur et annule la mesure du spectre.
 * Enfin, des paramètres comme le nombre de points à mesurer, le X min/max, le Y min/max du graphe sont calculés en fonction des choix faits par l'utilisateur précédemment. Puis sont appliqués, sur un nœud de propriété, tous les paramètres relatifs au Graphe (X/Y min/max, largeur du graphe (différente en mode FLM/FLS car les plots des différentes courbes sont affichés à droite)).
- 2) Le nombre de points à mesurer qui a été calculé est mis dans la variable N de la boucle For. Ensuite la boucle For se lance, et une mesure de ec+ est prise à différents intervalles de m/e. Ces intervalles sont calculés avant chaque prise de mesure dans le sous-VI correspondant, les masses scannées varient en fonction des paramètres fixés par l'utilisateur et l'indice i du nombre de tour de la boucle. Les valeurs sont rentrées dans un tableau et permettent, avec l'équivalent d'un nœud de rétroaction inter VI (via les variables globales), d'être affichées dans le graphe en continu pendant l'exécution de la boucle For.
- 3) Une fois le spectre complètement acquis, si l'utilisateur a sélectionné la sauvegarde automatique, un fichier de mesure est alors créé et adapté en fonction du mode de prise de mesure qui vient de se dérouler. La procédure d'enregistrement est détaillée p.29.

3) Détail du sous-VI de prise de mesure du courant ionique (Eléments du diagramme réel en Annexe C)



- 1) * Le calcul de la masse exacte (m/e) à mesurer est effectué en fonction : du nombre de points par masse choisie (au lancement du VI, p.19), du i de la boucle For précédente, de la First Mass choisie pour ce spectre. Avec ces paramètres, le pas de mesure pour chaque masse à scanner est déterminé, la commande à envoyer à l'appareil est calculée comme suit : $m/e \text{ à commander} = \text{First Mass} + i \times \text{pas}$. L'indice i variant de 0 au nombre nécessaire (N calculé à l'étape précédente) pour scanner jusqu'à la masse finale voulue. Comme cela, la première masse sélectionnée par l'appareil doit être First Mass pour un spectre, donc $i=0 \Rightarrow m/e \text{ commandé} = \text{First Mass}$. Ensuite, à chaque tour de la boucle For, cette masse initiale est incrémentée du nombre de pas nécessaires jusqu'à la Final Mass choisie. Par cette méthode, on voit aussi que la précision du spectre est directement liée au nombre de points acquis par masse.
- * 1st Mass : est un sous-VI qui commande, à la voie analogique initialisée au début, le rapport m/e sur lequel doit se positionner le spectromètre. Ici, il valide la commande de masse calculée précédemment.
- * Attente : une fois que la masse a été sélectionnée sur l'appareil, il faut que l'appareil se stabilise un moment au niveau électronique avant de mesurer $ec+$ correspondant au rapport m/e fixé. Pour cela, le temps d'attente varie en fonction de la constante de temps du filtre analogique choisie au lancement du VI (p.19). Ce temps d'attente est enregistré au début dans une variable globale et donc s'adapte en conséquence sur les paramètres choisis par l'utilisateur.
- 2) Une fois que le filtre s'est stabilisé, on lit le courant ($ec+$) pour la masse donnée. Les valeurs de m/e et $ec+$ correspondants sont ajoutées dans le tableau qui permet d'afficher le graphe en face avant. Dans les modes FLM/FLS, deux tableaux sont incrémentés car il y a plus de données à enregistrer que de données à afficher dans le graphe ; donc il y a un tableau « simple » incrémentant les données strictement nécessaires pour afficher le graphe, et le deuxième tableau plus complet avec toutes les données à enregistrer (m/e , $ec+$, heure, pression)

4) Mode de prise de mesure HELIUM



Ce diagramme est en fait un sous-VI dont la face avant (p.20) s'ouvre lorsqu'il est exécuté dans le diagramme principal.

Tout d'abord, à gauche, le VI reçoit le cluster *Output init* (qui contient toutes les initialisations des voies numériques/analogiques lancées au début, voir Annexe E) qu'il décompile selon les différents besoins des voies utilisées dans ce sous-VI. (*Mass* indiquant si l'on est en masse 100 ou 200)

Le sous-VI rouge, de sélection de mode de l'appareil, met l'appareil en mode HELIUM.

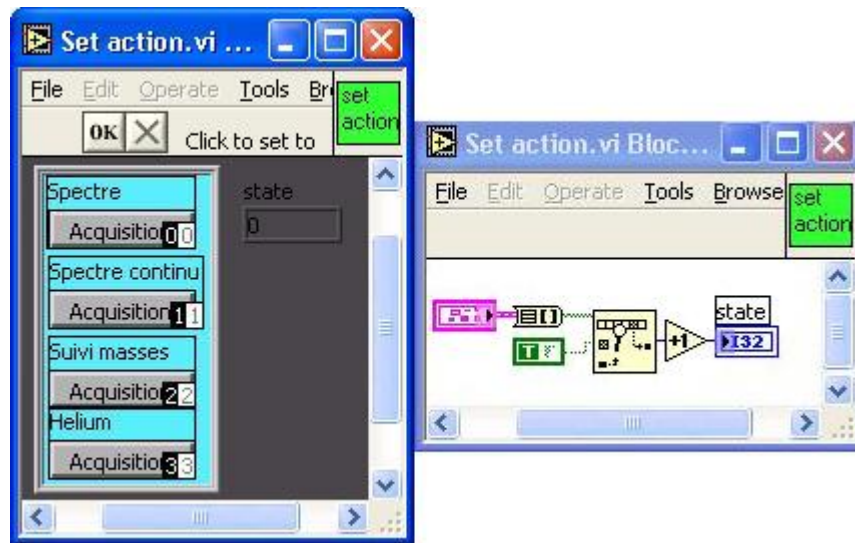
Dans la seconde partie, la commande de masse = 4 (correspondant à l'hélium) sort du précédent VI et arrive comme commande sur le sous-VI *1st Mass* qui règle le spectromètre sur la masse correspondante.

En haut à gauche, de la variable globale du *Control Cluster* (incluant les 5 boutons ronds du pavé de commande, p.16) est extraite l'information utile : *Amplification*. Connaissant ainsi la gamme de mesure du courant reçu sont calculées les valeurs min/max qui pourront être lues dans l'indicateur, et l'échelle est adaptée en conséquence (sur trois décades) sur le nœud de propriétés de l'indicateur.

Enfin, la mesure du courant ionique se fait dans la boucle While, et est représentée en face avant dans l'indicateur *He, i(A)*. Un temps d'attente permet de ne pas saturer l'appareil et le processeur en demandes inutiles. Le bouton stop, visible en face avant, arrête la boucle While, et ce sous-VI n'ayant plus rien à réaliser, referme sa face avant, et donc on revient sur la face avant de l'interface principale.

5) Divers

Détail de la sélection du mode de mesure



Voilà le sous-VI (*Set action*) réalisé pour pouvoir faire correspondre simplement les programmations de modes de mesures dans une structure de choix. Le but de ce sous-VI permet de renvoyer un chiffre en fonction de l'appui sur le bouton du mode de mesure voulu. Ce chiffre, propre à chaque mode de mesure, permet de guider le VI principal dans la structure de choix correspondante.

Les quatre boutons des modes de mesures sont inclus dans un cluster, que l'on peut voir en face avant (à gauche). Le cluster du VI principal, sur le pavé de commande (p.16), est donc branché sur celui de ce sous-VI. La photo, ci-dessus, de la face avant est sur une propriété des clusters qui permet de numérotter les différents éléments présents dans le cluster. Ici on peut donc voir :

Numéro	Mode de mesure
0	Spectre
1	Spectre continu
2	Suivi masses
3	Helium

Sur le diagramme, photo de droite, le fonctionnement est le suivant (de gauche à droite) :

- 1) le cluster est transformé en tableau. Ici, c'est un tableau de booléens car les boutons ne peuvent avoir comme valeurs que TRUE ou FALSE.
- 2) on recherche dans le tableau (VI central) la valeur TRUE (à gauche sous l'élément Cluster=>tableau) ; sachant que les boutons sont sur FALSE par défaut, on peut lire une valeur TRUE uniquement lorsqu'on appuie sur un bouton.
- 3) si aucune valeur TRUE n'est trouvée, le VI de recherche de TRUE dans le tableau renvoie la valeur -1. Sinon, il renvoie le numéro de l'emplacement où la valeur TRUE a été repérée (voir tableau ci-dessus).
- 4) la valeur de sortie est incrémentée de 1, et le résultat (*state*) donne donc un chiffre correspondant à l'appui d'un bouton. En fonction de l'appui, ou non, des différents boutons on a donc les correspondances suivantes présentées dans l'interface générale, p.24.

Sauvegarde des fichiers : (voir Annexe B, avec détail du diagramme) tous les fichiers sauvegardés sont en fait, sous Labview, des chaînes de caractères (*string* en anglais), qui sont « ajustées » par des VIs propres à Labview. Pour tous les fichiers, la méthodologie d'enregistrement est la suivante :

- 1) un tableau contenant les données brutes de la mesure (masses, courant, pressions et heure de prise du spectre selon les modes) est converti en chaîne de caractère.
- 2) Ensuite, on ajoute à cette chaîne toutes les informations et commentaires que l'on souhaite. Ces informations seront ici en tête du fichier.
- 3) on sauvegarde automatiquement dans un répertoire (fixe) le fichier sous un nom généré automatiquement en fonction de la date, l'heure et le type de prise de mesure.
- 4) le fichier est alors sous forme d'une chaîne de caractères. Par simplicité d'utilisation ultérieure, ces fichiers sont nommés avec une extension texte (.txt). De ce fait, on peut aussi bien lire le fichier dans le bloc note que sous Excel.

Remarque : cette méthodologie d'enregistrement est très proche du VI automatique de Labview qui enregistre un tableau de valeur en fichier (ouvert sous Excel ensuite la plupart du temps). En fait, pour les besoins du stage, j'ai analysé ce VI et je l'ai adapté à mon traitement de données.

Constante de temps du filtre : pour une constante de temps choisie, le temps d'attente entre la sélection d'une masse par l'appareil, et la prise de mesure pour cette masse donnée, est arrondi à la milliseconde supérieure de la constante de temps du filtre. De cette façon, le système électronique a le temps de se stabiliser avant que la prise de mesure soit effectuée.

Deux points TRES pratiques sous Labview :

Au début de la réalisation de mon VI, il s'est complexifié assez vite. Malgré l'utilisation de nombreux sous-VIs de, très, nombreux câbles se trouvaient sur le diagramme. Et il était difficile de s'y retrouver dans les câbles et dans les nombreuses entrées/sorties des sous-VIs. Les deux points suivants m'ont permis un gain inestimable de place et de simplicité de programmation. En plus ils ne sont pas très compliqués à prendre en main. Je les ai utilisés tout simplement... sans aucune modération !

1) Les variables globales (voir Annexe D)

Elles permettent l'enregistrement de tout type de données dans une seule et même variable (globale), un peu comme un sous VI de données brutes. Et surtout, on peut réutiliser ces données dans n'importe quel VI/sous-VI. Ce qui permet d'enregistrer de nombreuses données et des les réutiliser dans des sous-VI de plusieurs niveaux inférieurs au VI d'enregistrement de la donnée brute, le tout sans AUCUN câble à travers les VI. On gagne énormément de place et de simplicité. On peut en plus créer l'équivalent de nœud de rétroaction sans câbles particuliers et inter VI.

2) Les clusters (voir Annexe E)

Les clusters, permettent de grouper un grand nombre de paramètres, même différents, en un seul câble sur le diagramme. Ainsi au lieu de transporter 12 câbles (d'initialisations de tâches, par exemple) on en transporte un seul ! Ce qui fait un gain de place important sur le diagramme, et un gain en simplicité sur les entrées/sorties des sous VIs où le nombre de câbles est toujours réduit au minimum pour un maximum de paramètres. Les clusters sont donc très utiles lorsque l'on doit transporter souvent les mêmes paramètres à de nombreux endroits du diagramme et des sous-VIs. De plus on peut changer ou sortir uniquement les valeurs du cluster qui nous intéressent sans le modifier à chaque fois en entier. Un exemple d'utilisation est clairement présenté dans l'annexe E.

5) Conclusion

Ce stage s'est décomposé en deux parties principales : réaliser une interface sous Labview pour suivre et enregistrer l'évolution de la pression du système dans le temps ; et réaliser une interface utilisateur complète du spectromètre de masse Balzers QMG112 A.

Actuellement, cette interface permet : de régler tous les paramètres physiques du spectromètre, d'acquérir un ou plusieurs spectres et d'enregistrer leurs données, d'avoir une interface de détecteur de fuite, et de suivre plusieurs masses prédéfinies dans le temps (et d'enregistrer les données).

D'ici la fin effective de mon stage au CERN en juillet, il est prévu d'améliorer cette interface de suivi des masses. En effet, nous réfléchissons sur un système de suivi des espèces, et non plus des masses. A partir de courants ioniques de certaines masses il faudra déduire en temps réel les pressions partielles des différentes espèces présentes dans l'enceinte de fabrication de la photocathode. De cette façon, on pourra connaître très précisément les différentes étapes de la fabrication, et aussi identifier et quantifier les polluants de la photocathode.

Dans les prochaines semaines, nous allons réaliser l'étalonnage du spectromètre avec différents gaz pour connaître les sensibilités exactes de l'appareil pour ces gaz. Ensuite une matrice sera programmée sous Labview, ourrtir eux phenomenes sont encore etudier les nombreuses opportunités qu'omprendre le processus de production des photocathod à partir de ces coefficients, pour recalculer les pressions partielles de ces gaz dans l'enceinte.

Ce stage m'a permis de découvrir le monde de la recherche, et de m'ouvrir sur le domaine de la physique des particules. Le monde de la recherche qui est si particulier, et qui est perpétuellement en avance sur son temps. Ce fut très intéressant de découvrir les évolutions de demain alors qu'elles n'en sont encore qu'au stade expérimental. De plus, la pluridisciplinarité du laboratoire dans lequel j'ai effectué mon stage m'a permis de voir, et comprendre !, de très nombreuses expériences.

J'espère que le travail que j'ai réalisé durant mon stage sera utile et permettra effectivement de mieux comprendre le processus de production des photocathodes de puissance. Et que de futurs stagiaires pourront étudier les nombreuses potentialités qu'offrent la photoémission où de nombreux phénomènes sont encore à étudier.

6) Annexes

ANNEXE A

Cartes d'acquisitions National Instruments utilisées pour l'instrumentation du spectromètre de masse Balzers QMG112A

1) Carte numérique/analogique PCI-6713 (DAC)

8 sorties analogiques
8 entrées/sorties numériques
Tension de sortie : ± 10 V
Résolution : 12 bits
Fréquence de rafraîchissement = 1 MS/s

2) Carte analogique/numérique PCI-MIO-16E-1 (ADC)

16 entrées analogiques
2 sorties analogiques
8 entrées/sorties numériques
Tension d'entrée : ± 10 V
Résolution : 12 bits
Fréquence de rafraîchissement = 1,25 MS/s

Pour cette partie, il a fallu aussi bien adapter le hardware que le labo possédait aux nouvelles cartes d'acquisitions Labview, qu'étudier tout le spectromètre de masse et son électronique précisément, afin de savoir quelles étaient ses possibilités intrinsèques. Connaissant cela, l'interface utilisateur a pu être construite et améliorée en fonction des besoins des utilisateurs pour leurs expériences.

ANNEXE B

Exemple de fichier enregistré pour un spectre pris en continu

Le nom de ce fichier est : « MS_05_05_25__16_00_04 Multi Multi essai.txt ».

On peut détailler le nom du fichier comme suit :

- MS pour Mass Spectrum
- 05_05_25 correspond à la date du début de la mesure, ici le 25 mai 2005. La date est dans le format Année/Mois/Jour afin que le tri des fichiers par ordre chronologique soit facilité.
- 16_00_04 correspond à l'heure de la première mesure.
- Multi : signifie que le mode de prise de mesure est en spectre continu.
- Multi essai : correspond au commentaire écrit dans la ligne « Title commentary » de l'interface utilisateur.

Date 05_05_25
H = h_min_sec/P[start;end] (mbar)

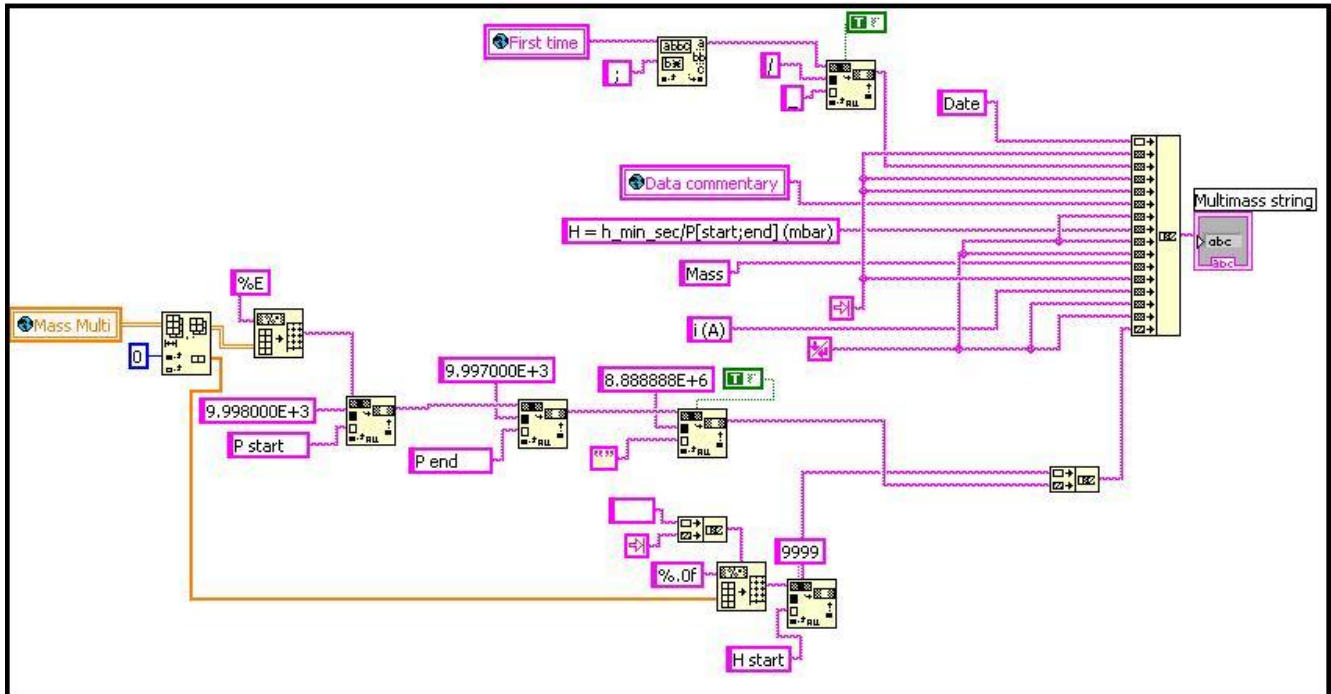
Mass	i (A)				
H start	160004	160019	160034	160049	160105
P start	4.50E-07	4.50E-07	4.50E-07	4.50E-07	4.50E-07
P end	4.50E-07	4.50E-07	4.50E-07	4.50E-07	4.50E-07
0.00E+00	2.69E-11	2.20E-11	2.44E-11	2.69E-11	2.44E-11
2.50E-02	2.44E-11	2.44E-11	2.44E-11	2.69E-11	2.93E-11
5.00E-02	1.95E-11	2.44E-11	2.69E-11	2.44E-11	2.69E-11
7.50E-02	2.69E-11	2.93E-11	3.42E-11	2.93E-11	2.20E-11
1.00E-01	2.44E-11	2.44E-11	2.44E-11	1.95E-11	2.69E-11
1.25E-01	1.71E-11	2.93E-11	2.93E-11	2.20E-11	2.93E-11
1.50E-01	2.69E-11	2.20E-11	2.44E-11	2.69E-11	3.17E-11

Le fichier texte enregistré se présente comme tableau ci-dessus. Ouvert sous Excel ce fichier est automatiquement géré de façon à pouvoir exploiter les données immédiatement. A chaque spectre mesuré correspond une colonne.

On lit le fichier comme suit :

- En haut à gauche on lit la date de début de la mesure
- En dessous on peut lire « H = h_min_sec/P[start;end] (mbar) » qui détaille le format utilisé pour l'heure et l'unité des pressions (mbar).
- Mass indique la colonne des masses
- i (A) indique la colonne des courants ioniques mesurés pour chaque masse
- en prenant pour exemple la mesure encadrée ci-dessus pour un spectre :
 - 1^{ère} ligne : c'est l'heure de début de la mesure du spectre (heure/minutes/secondes), convertie en nombre.
 - 2^{nde} ligne : c'est la pression mesurée (par la TPG300) au début de la mesure.
 - 3^{ème} ligne : c'est la pression mesurée (par la TPG300) au début de la mesure.
 - 4^{ème} ligne : ligne vierge.
 - à partir de la 5^{ème} ligne : ce sont les courants ioniques correspondants aux masses désignées dans la colonne Mass.

Détail de la mise en forme du tableau (multi spectre) pour l'enregistrement



Le tableau complet est la variable globale *Mass Multi* à gauche. Ce tableau est séparé en deux : une partie avec les heures de prise de spectres qui est simplement gardée telle quelle (en bas) puis transformée en chaîne de caractères ; le reste du tableau est transformé en chaîne de caractères mais avec un formatage scientifique (mantisse et exposant, au lieu d'un nombre : 0,001 = 1.000E-3). Ensuite les deux morceaux du tableau (chaînes de caractères à ce stade) sont recollés (par concaténation en bas à droite).

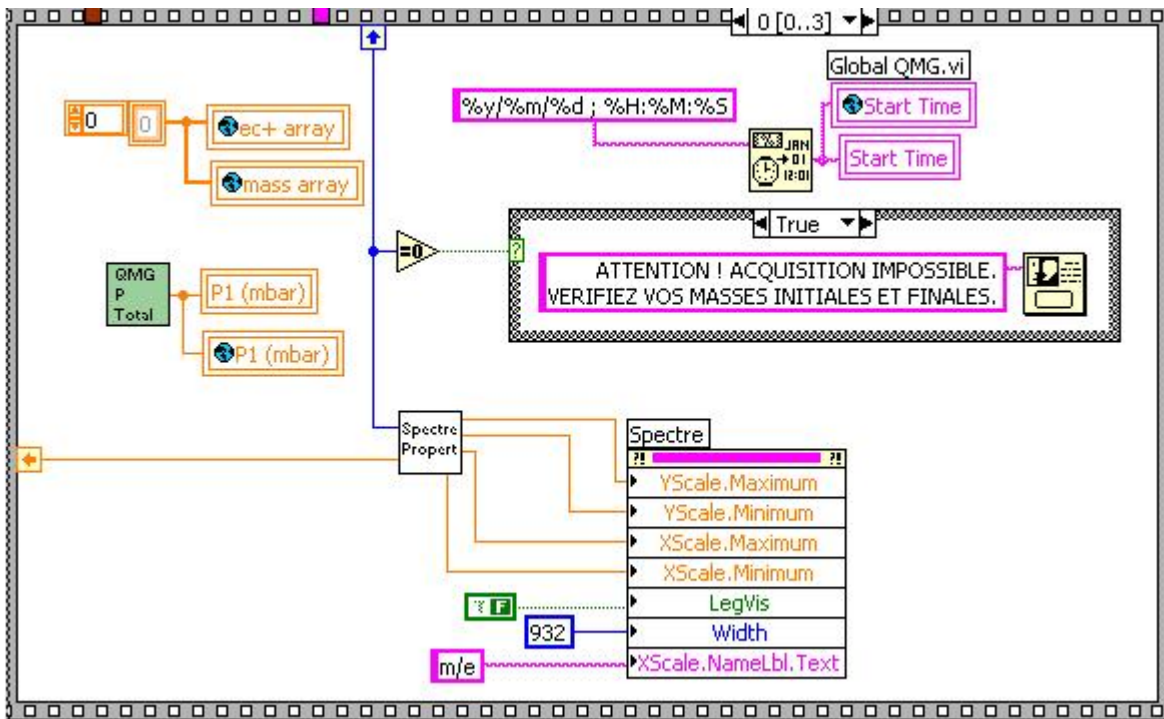
Cette séparation permet d'enregistrer les valeurs de courants ioniques de façon à ce qu'ils soient lisibles facilement : en effet il est plus simple de lire $i = 1,859647\text{E}-11$ A que $i = 0,0000000001859647$ A... Mais, cette séparation permet aussi de garder un format d'heure facilement lisible : il est plus facile de lire 17h05min32s en 170532 que 1,70532E+5.

Afin de pouvoir écrire des chaînes de caractères comme *Pstart*, *Pend* dans le tableau de mesure, des codes (i.e. 9998 pour *Pstart*) leurs sont donnés lorsque le tableau est initialisé pour les premières mesures. Ensuite, lorsque le tableau est converti en chaîne de caractères, il suffit de remplacer le nombre par le texte voulu. Ainsi on peut facilement insérer du texte dans un tableau à enregistrer, en imposant des valeurs dans le tableau, que l'on remplace par la suite.

Et le gros bloc en haut à droite permet d'ajouter tous les paramètres voulus en entête du fichier. On peut voir deux variables globales comme *First time* (en haut), ou *Data commentary* en dessous.

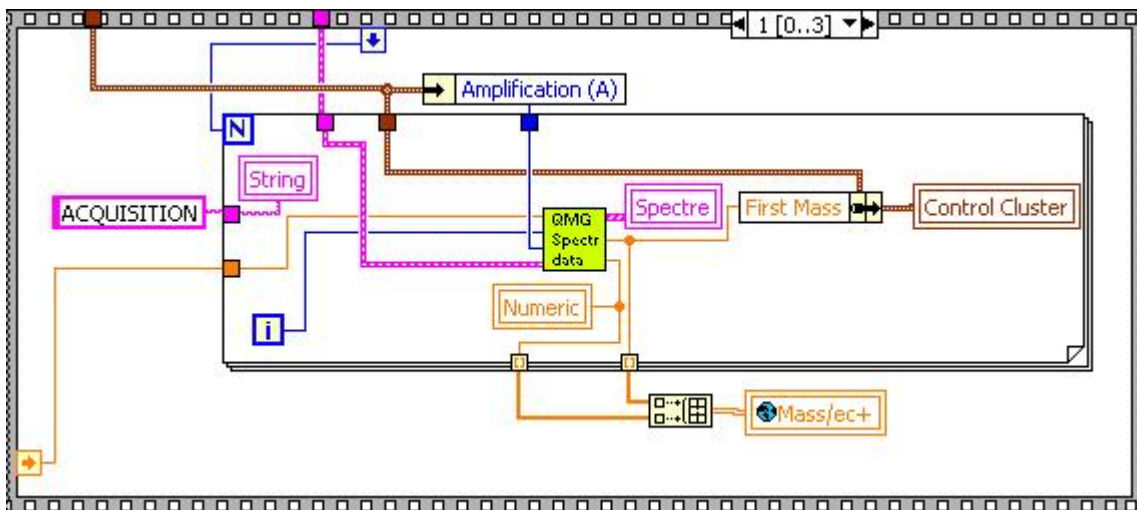
ANNEXE C

Eléments du diagramme réel : détails du mode de prise de mesure Spectre et acquisition du courant ionique



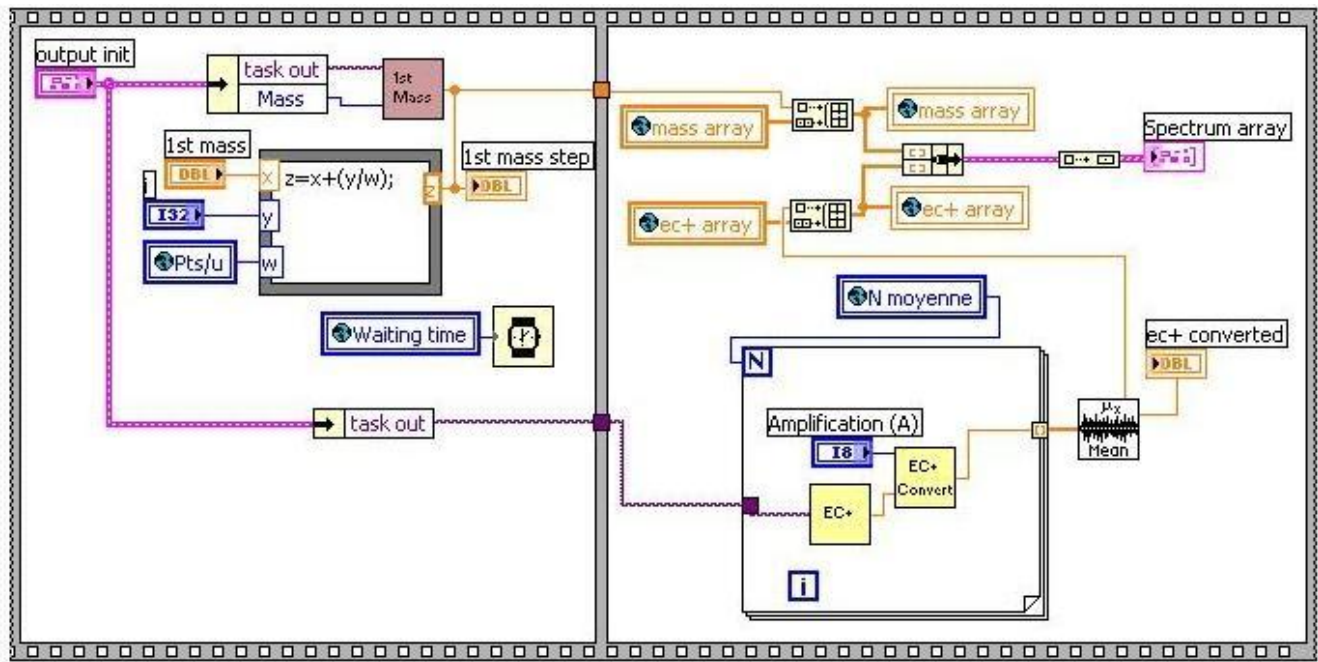
1^{ère} étape du mode de mesure spectre simple.

Pour l'heure et la pression, la variable locale permet l'affichage des données en face avant, et la variable globale permet la sauvegarde pour l'enregistrement ou tout autre utilisation inter VI.



Etape de prise de la mesure du spectre simple

Numeric permet l'affichage en temps réel de ec+ en fonction de la masse sélectionnée sur l'appareil. La masse est actualisée en temps réel en face avant par la recompilation du paramètre *First Mass* dans la variable locale du cluster incluant ce paramètre (*Control Cluster*).



Prise de mesure du courant ionique
 (= sous VI QMG SPECTR DATA en jaune sur la photo précédente)

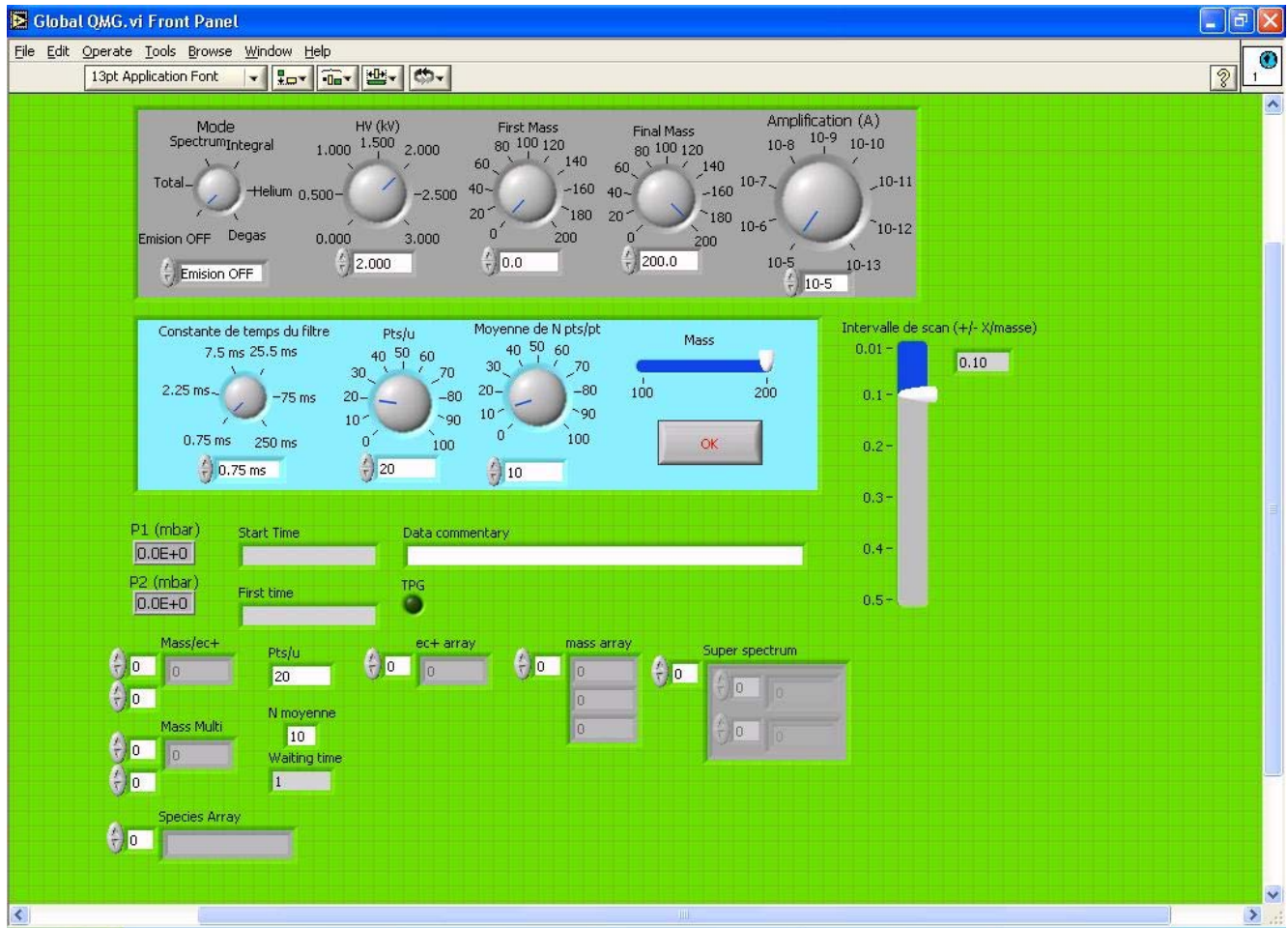
Ist mass step permet de renvoyer la masse exacte commandée au spectromètre, et ainsi de l'afficher en face avant.

Output init : est le cluster qui comprend toutes les voies initialisées au lancement du VI principal. Ici sont décompilées les seuls paramètres utiles dans ce sous VI : Mass (100 ou 200) et l'initialisation des voies analogiques (sortie pour fixer m/e à mesurer, et en entrée pour mesurer le courant ionique correspondant).

A droite, on lit le courant dans le sous VI *EC+*, on convertit la tension reçue avec le sous VI *EC+ Convert* en valeur de courant ionique qui nous intéresse. On fait la moyenne de N points de mesure (fixés au début, p.19) pris d'affilée et cette valeur sera considérée comme étant la valeur de *ec+* pour ce m/e. Les tableaux ainsi organisés en variables globales permettent l'équivalent d'un nœud de rétroaction inter VI sans câbles particuliers. Le tout est organisé pour que le tableau final corresponde à un fichier lisible pour le graphe.

ANNEXE D

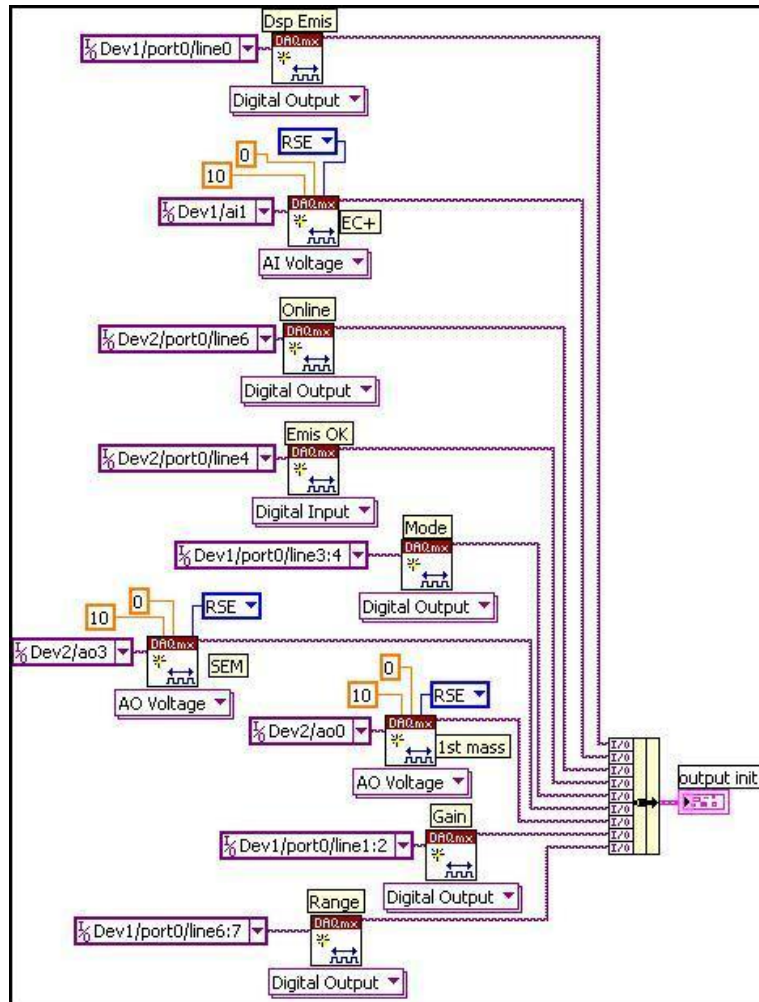
Variable globale



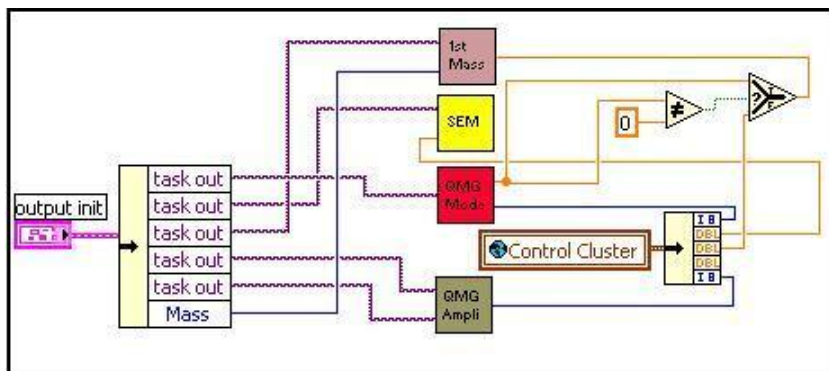
Voilà la face avant de la variable globale que j'ai réalisée pour mon programme. On y trouve des clusters (en haut), des chaînes de caractères, un indicateur LED, des indicateurs numériques, et plusieurs types de tableaux (1D, 1D de chaîne de caractères, 2D, 2D de clusters...). La variable globale n'a pas de diagramme.

ANNEXE E

Cluster initial (Output Init) et avantages des clusters

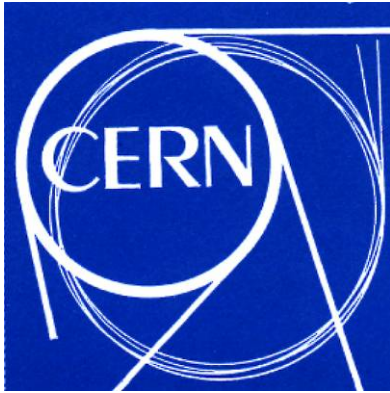


Output Init : initialisation de toutes les voies numériques/analogiques dans un seul cluster !
 En fonction des besoins, on sort juste la tâche que l'on souhaite utiliser.



Exemple d'utilisation de cluster (les voies à gauche, les données à droite)

Dans ce sous-VI, on branche juste un câble : *Output Init*. On prend les informations qui nous intéressent dans ce cluster, et dans la variable globale du *Control Cluster*. Avec ces informations, on peut faire fonctionner les sous-VIs que l'on veut (ici on règle sur la machine les différents paramètres des boutons ronds du pavé de commande, p.16).



Avril à juin 2005

Instrumentation d'un spectromètre de masse sous Labview

Résumé : Réalisation de l'interface utilisateur, sous Labview 7.1, du spectromètre de masse Balzers QMG112A pour étudier la qualité du vide déterminante dans le processus de fabrication de photocathodes de puissance. Elles sont produites par dépôts de couches minces dans des installations sous ultravide. L'interface permet l'acquisition et l'enregistrement de spectres ainsi que le suivi de plusieurs espèces prédéfinies par l'utilisateur dans le temps.

Mots clés :

- **LABVIEW**
- **PHOTOCATHODE**
- **ULTRAVIDE**