

# RAPPORT DE STAGE

Dépôt de couches atomiques assisté par plasma

Benoit Altasserre

Projet encadré par Mr Thomas Nelis, Professeur à la Haute Ecole Spécialisée Bernoise





## Table des matières

Introduction .....	1
Remerciements .....	2
I) Présentation de la Haute Ecole Spécialisée Bernoise .....	3
II) Présentation de la technique A.L.D .....	4
II.1) Le cycle A.L.D .....	4
II.2) Le dispositif A.L.D assisté par plasma .....	6
II.2.1) Description du système .....	6
II.2.2) Plasma microonde .....	7
II.2.3) Le surfatron.....	8
II.2.4) Le système d'allumage.....	9
II.2.5) Exemple de fonctionnement .....	10
III) La carte électronique et le programme de commande .....	11
III.1) La carte électronique .....	11
III.1.1) Description de la carte .....	11
III.1.2) Le protocole de communication .....	11
III.2) Le programme de commande informatique .....	13
III.2.1) Les sous-programmes de communication .....	13
III.2.2) Le programme de commande <i>Com with board.vi</i> .....	19
III.3) La calibration de la carte et les programmes de correction .....	20
III.3.1) La calibration de la carte.....	20
III.3.2) Les programmes de correction .....	21
IV) Allumage du plasma, développements et tests .....	24
IV.1) Test du système d'allumage .....	24
IV.2) Le système de détection de l'allumage du plasma.....	26
IV.2.1) La conception du système de détection.....	26
IV.2.2) Test du dispositif photosensible .....	33
Conclusion.....	34
Bibliographie et références.....	35
Table des illustrations .....	36
Annexe 1 : Spécifications de la DAQ-carte.....	40
Annexe 2 : Sous VI <i>write.vi</i> .....	41
Annexe 3 : Sous VI <i>read.vi</i> .....	42
Annexe 4 : Sous VI <i>info 0 0.vi</i> .....	43
Annexe 5 : Sous VI <i>data 0 0.vi</i> .....	44

Annexe 6 : Sous VI <i>escp 0 0.vi</i> .....	45
Annexe 7.1 : Sous VI <i>setp.vi</i> .....	46
Annexe 7.2 : Sous VI <i>setp.vi</i> .....	47
Annexe 7.3 : Sous VI <i>setp.vi</i> .....	48
Annexe 7.4 : Sous VI <i>setp.vi</i> .....	49
Annexe 8.1 : Programme <i>Com with board.vi</i> .....	50
Annexe 8.2 : Programme <i>Com with board.vi</i> , diagramme des flux .....	51
Annexe 9 : Résultats des essais d'allumages .....	52
Annexe 10.1 : Spécifications Photodiode S2386 page 1 .....	53
Annexe 10.2 : Spécifications Photodiode S2386 page 2 .....	54
Annexe 10.3 : Spécifications Photodiode S2386 page 3 .....	55
Annexe 10.4 : Spécifications Photodiode S2386 page 4 .....	56
Annexe 11 : Dispositif photo détecteur, liste des pièces et commande .....	57
Annexe 12.1 : Dispositif photo détecteur, dessins techniques.....	58
Annexe 12.2 : Dispositif photo détecteur, dessins techniques.....	59

## Introduction

L'objectif de ce stage effectué au sein du laboratoire d'ingénierie des surfaces par plasma, de la Haute école Spécialisée Bernoise (B.F.H), était de participer au développement d'un prototype de dépôt par couche atomique, ou Atomic Layer Deposition (A.L.D). Deux missions m'ont été attribuées au cours de ces quatre mois.

Premièrement, je devais développer un programme informatique pour contrôler une carte électronique d'acquisition et de génération de signaux, conçue lors d'un projet du laboratoire de microélectronique au sein de l'école. Ceci dans le but d'obtenir une alternative économique et flexible pour le contrôle d'un système A.L.D mais également pour d'autres applications comme les travaux pratiques pour les étudiants de l'école.

Deuxièmement je devais participer au développement et tester l'efficacité d'un système d'allumage de plasma microonde présent dans le laboratoire. La finalité de ce dispositif sera d'améliorer la technique actuellement utilisée au sein de l'E.M.P.A, le laboratoire fédéral Suisse pour les sciences et la technologie des matériaux, localisé dans la ville de Thoune.

Au terme de la période de stage le laboratoire d'ingénierie des surfaces par plasma aura à sa disposition des moyens pour utiliser la carte électronique via une interface LabVIEW et des données expérimentales relatives aux performances du système d'allumage.

## Remerciements

Tout d'abord je souhaite remercier les membres de la B.F.H qui m'ont accueilli lors de mon arrivée en Suisse et qui m'ont aidé tout au long de mon séjour.

Je tiens également à remercier tous les membres du laboratoire d'ingénierie des surfaces par plasma. Mon tuteur le professeur Thomas Nelis pour ses conseils avisés et ses connaissances qui m'ont été d'une grande aide pour la compréhension du sujet de stage. Mes collaborateurs, M. Olivier Antonin, M. Lopez Julio Ramon et M. Stefan Haudenschild pour leurs nombreux conseils et leur investissement dans le cadre de mon stage.

Je remercie également les étudiants du laboratoire de microélectronique, Mlle Justine Le Douaron, M. Kevin Luca Lücke et M. Adrian Maag pour leur aide précieuse lors de mon travail sur leur dispositif de carte électronique.

Merci aux membres du laboratoire Optolab et en particulier M. Fabio Andronico pour tous ses conseils et son aide lors de la réalisation du dispositif de détection optique pour l'allumage des plasmas.

Enfin je souhaite remercier les membres du laboratoire de l'E.M.P.A, le Dr. Carlos Guerra-Nuñez et M. Damian Frey pour les nombreuses informations sur le processus A.L.D.

## I) Présentation de la Haute Ecole Spécialisée Bernoise

La Haute Ecole Spécialisée Bernoise est une école supérieure Suisse offrant un grand nombre de domaines d'étude et de recherche au travers de ses six départements :

- Architecture, bois et génie civil, la Haute école de sciences agronomiques, forestières et alimentaires,
- La Haute école des arts de Berne,
- Technique et informatique, Gestion, santé et travail social,
- La Haute école fédérale de sport de Macolin.

Répartie sur plusieurs sites à travers le canton (Bienne, Berne, Berthoud, Zollikofen et Macolin), l'école met en avant une large multidisciplinarité de ses enseignements par la présence de nombreux laboratoires de recherche différents sur un même site.

Mon stage s'est déroulé au sein du département Technique et informatique, localisé dans la ville de Bienne, où j'ai intégré l'équipe du laboratoire d'ingénierie des surfaces par plasmas.

Le département compte aussi de nombreux autres laboratoires de recherche :

- Le laboratoire de Perception informatique et réalité virtuelle qui travaille sur l'interaction entre l'humain et l'information en trois dimensions.
- Le laboratoire d'ingénierie biomédicale qui développe des solutions technologiques en combinant les domaines du médical et de la biologie.
- Le laboratoire d'optique qui mène des recherches sur des techniques d'analyse et de génération de signaux optiques comme la Tomographie en cohérence optique.
- Le laboratoire de microélectronique dont les travaux sont directement reliés au développement d'algorithmes, au traitement de signal et à la commande.
- Le laboratoire de science qui regroupe des ingénieurs et des scientifiques de différents domaines d'études.
- Le laboratoire de robotique.

Le laboratoire d'ingénierie des surfaces par plasma fait partie de l'institut de technologies appliquées en laser, photonique et surface (A.L.P.S). Les champs de recherche que j'ai pu observer lors de mon stage sont le dépôt de couches minces de diamant, le traitement de surface des aciers (carburation et nitruration) et le dépôt par couche atomique qui est le sujet de mon stage.

## II) Présentation de la technique A.L.D

### II.1) Le cycle A.L.D

Le dépôt par couche atomique est une technique de dépôt de couches minces basée sur l'exposition séquentielle d'un substrat à différentes espèces en phase gazeuse. La plupart des processus A.L.D sont dit « à séquence binaire » car ils mettent en œuvre seulement deux réactions de surface et utilise généralement deux gaz (le précurseur et le réactif). Nous présenterons ce type de processus dans les paragraphes suivants.

#### Description du processus

- 1) En premier lieu le substrat est exposé au premier gaz (figure 1). Les différentes interactions entre le précurseur et le substrat vont provoquer l'adsorption des espèces gazeuses sur la surface. Cependant les sites de réactions permettant cette adsorption sont limités en nombre. Au bout d'un certain temps d'exposition, il n'en reste plus suffisamment pour continuer la réaction. On dit que la réaction est auto limitante, une caractéristique importante du processus A.L.D car elle permet d'obtenir une grande qualité de dépôt conforme, même pour des surfaces à fort coefficient d'aspect (i.e. possédant un relief très important) [1].

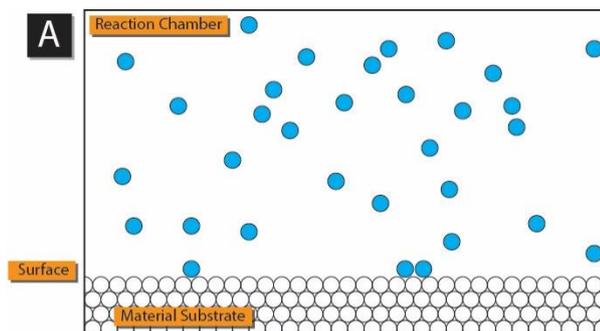


Figure 1 - Cycle A.L.D étape A. Wikipédia. Atomic Layer Deposition.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic\\_layer\\_deposition](https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_layer_deposition)

- 2) En fin de réaction on obtient une nouvelle surface sur le substrat avec une première couche déposée. L'épaisseur de ce type de couches est de l'ordre de l'angström [2]. Le précurseur restant est alors évacué de la chambre de réaction, c'est la purge.

- 3) On expose maintenant le substrat au second gaz (figure 2.B). Cette fois-ci la réaction d'adsorption se produit entre les espèces du gaz et les sites réactifs de la nouvelle surface (figure 2.C). Le gaz réactif est choisi de telle sorte qu'il vient régénérer les sites de réaction compatibles avec le précurseur [3].

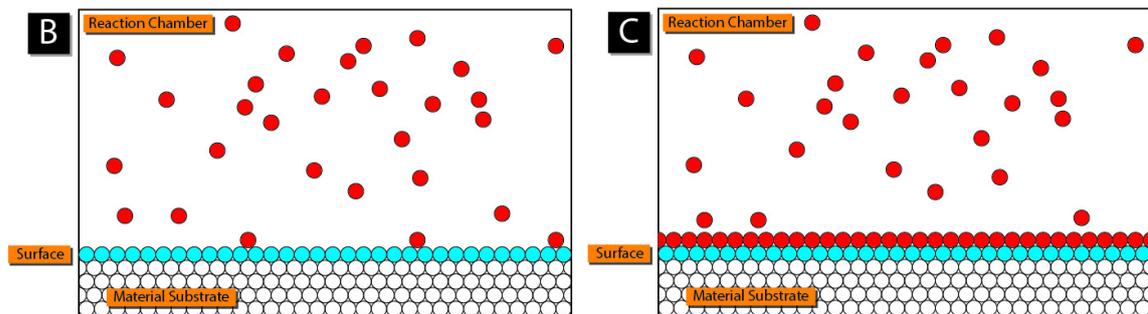


Figure 2 - Cycle A.L.D étape B et C. Wikipédia. Atomic Layer Deposition.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic\\_layer\\_deposition](https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_layer_deposition)

- 4) On réalise à nouveau une purge de la chambre de réaction pour évacuer le réactif.  
 5) On reprend ensuite le processus à l'étape 1.

Pour chaque cycle A.L.D on obtient ainsi un dépôt composé de deux sous couches qui sont respectivement le produit de la première et de la seconde réaction de surface (séquence binaire). Au terme de l'exécution d'un certain nombre de cycles on obtient un empilement de plusieurs de ces couches binaires (figure 3).

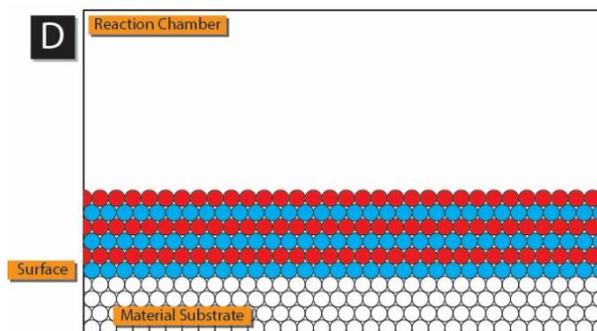


Figure 3 - Cycle A.L.D étape D. Wikipédia. Atomic Layer Deposition.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic\\_layer\\_deposition](https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_layer_deposition)

On peut donc avec cette technique contrôler avec précision l'épaisseur de la couche déposée ainsi que sa conformité. Ces deux avantages majeurs permettent de nombreuses applications des dépôts par couche atomique, en microélectronique par exemple, où la miniaturisation des composants impose un contrôle des structures à une échelle très réduite [4].

Dans le cas de notre étude on remplace le second gaz par un plasma afin de créer une population d'espèces très réactives et on expose le substrat à ces particules. Les espèces interagissent avec la surface et régénèrent les sites réactifs compatibles avec le précurseur. On parle alors de procédé de dépôt de couches atomiques assisté par plasma. C'est ce procédé que nous allons maintenant décrire.

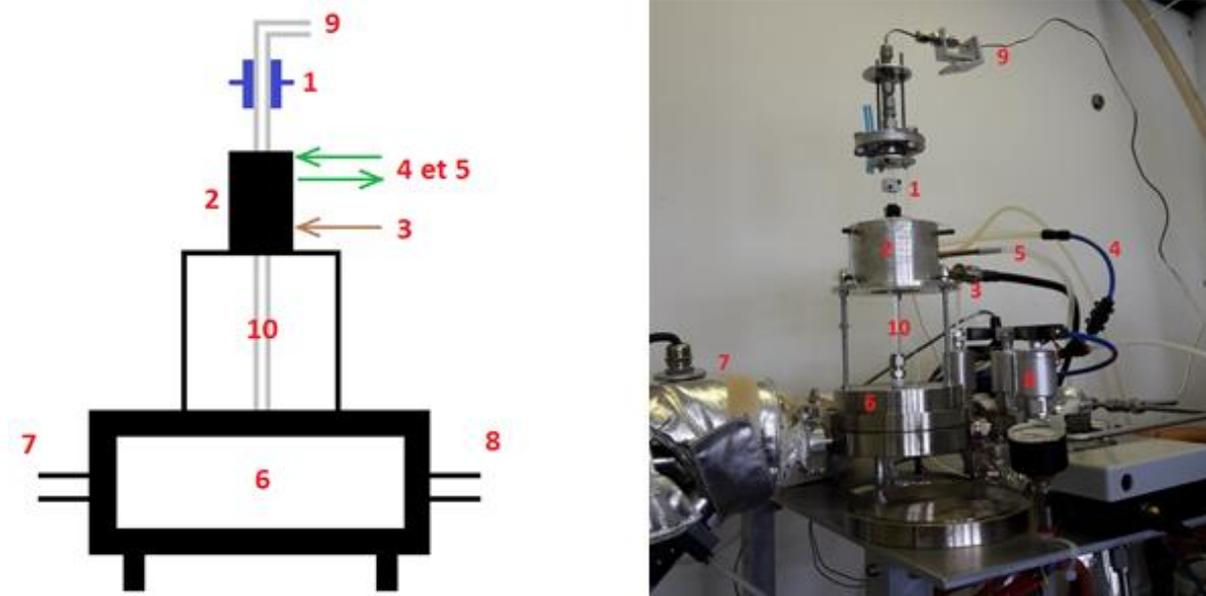
## II.2) Le dispositif A.L.D assisté par plasma

Au cours de ce stage j'ai eu l'opportunité de visiter le laboratoire de l'E.M.P.A et d'étudier leur dispositif A.L.D assisté par plasma utilisé pour les dépôts de couches minces. Le plasma utilisé est un plasma microonde, c'est-à-dire qu'il est entretenu par un rayonnement électromagnétique émis par une source microondes (générateur). Nous reviendrons par la suite sur la création de ce type de plasma.

### II.2.1) Description du système

Le dispositif A.L.D (figure 4) est un système composé d'une source microondes (générateur), d'une chambre de réaction, d'un dispositif de vide, de sources de gaz (précurseurs et utilitaires) avec leurs systèmes d'admission, d'une cavité microonde (surfatron), d'un système d'allumage du plasma et d'un circuit de refroidissement (eau et air comprimé du surfatron). Nous allons par la suite expliquer son fonctionnement avec un exemple.

Figure 4 - Schéma du dispositif A.L.D. (réalisé avec le logiciel Paint) et photographie du système présent à L'E.M.P.A



On observe différents éléments sur le schéma :

- 1) le système d'allumage
- 2) Le surfatron (dans son armature)
- 3) Le câble d'admission des microondes
- 4) Le circuit d'air comprimé pour le refroidissement
- 5) Le circuit d'eau pour le refroidissement
- 6) La chambre de réaction
- 7) L'échappement avec le système de pompage
- 8) L'entrée pour l'admission du précurseur
- 9) L'admission des gaz pour le plasma
- 10) Le tube de quartz

### II.2.2) Plasma microonde

Comme nous l'avons vu précédemment un plasma microonde à basse pression est créé pour obtenir une population d'espèces réactives. La création de ce plasma est réalisée en utilisant un rayonnement microonde au niveau du surfatron qui est une cavité résonante. Dans cette cavité, le rayonnement électromagnétique vient exciter les électrons libres présents dans le gaz qui voient ainsi leur énergie augmenter.

Ces électrons primaires vont par la suite transmettre leur énergie aux atomes neutres par des phénomènes de collision. Si l'énergie d'une collision est suffisante on peut alors arracher des électrons aux atomes. Ces électrons secondaires, maintenant libres, vont également être excités par le rayonnement microonde et provoquer des collisions avec les atomes. C'est le phénomène d'avalanche électronique. On obtient ainsi un gaz partiellement ionisé.

L'augmentation du nombre d'électrons libres provoque l'augmentation de la densité d'atomes excités, on observe alors des phénomènes de recombinaison spontanée. Des électrons libres et des ions vont spontanément diminuer leur énergie en se recombinant. Cette recombinaison s'accompagne de l'émission de rayonnements et en particulier des photons. On observe alors des phénomènes lumineux qui indiquent l'allumage du plasma (figure 5).



Figure 5 - Plasma d'argon allumé

La zone dans laquelle se trouve la population d'espèces réactives est localisée de la fin de la queue lumineuse du plasma jusqu'à une certaine distance dépendant de la durée de vie des particules avant recombinaison. Pour que la réaction avec le substrat soit possible il est nécessaire que les particules atteignent sa surface. Cependant les contraintes de fabrication des chambres de dépôt imposent une certaine distance entre le lieu de création du plasma et le substrat. Pour pallier à ce problème on utilise un dispositif spécial appelé surfatron qui permet de modifier la longueur du plasma en sortie afin de déplacer la zone où sont localisées les espèces réactives.

### II.2.3) Le surfatron

Le surfatron (figure 6) est un dispositif qui permet la création locale d'un plasma en son sein. Il s'agit d'une cavité résonante équipée d'une entrée d'onde microonde (1), d'un circuit de refroidissement à air et eau (2) et dont la longueur est modifiable à l'aide des vis de réglage (3).

Lorsque les conditions de résonance sont satisfaites, l'excitation microonde au sein de la cavité va permettre l'établissement de modes d'ondes stationnaires. Ces conditions sont fonctions de la fréquence du champ d'excitation, des propriétés diélectriques du milieu au sein de la cavité et des dimensions de cette dernière. L'excitation des modes de résonance est possible en utilisant un couplage électrique entre la cavité et le générateur de microondes. Ce couplage est réalisé par une antenne pénétrant légèrement dans le surfatron et qui permet le transfert efficace de l'énergie du générateur au plasma [5].

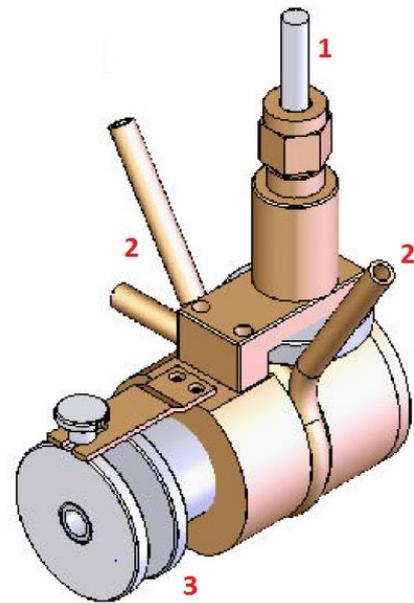


Figure 6 - Surfatron (image numérique)

Dans notre cas le surfatron est conçu pour fonctionner avec une excitation microonde à la fréquence de 2,45 GHz et avec la présence d'un plasma localisé dans un tube de quartz au sein de la cavité. En agissant sur la valeur du débit de gaz circulant dans le tube et sur la puissance d'émission microonde, il est possible de régler la longueur du plasma obtenu en sortie du surfatron (figure 7 et figure 8).

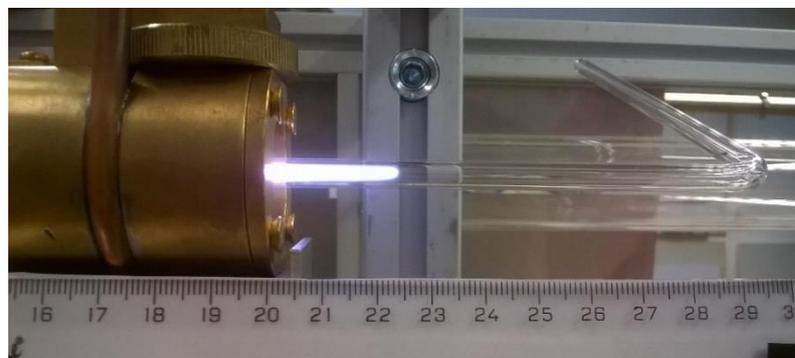


Figure 7 - Plasma d'argon (puissance microonde 19W ; débit gazeux 0.012 sccm)

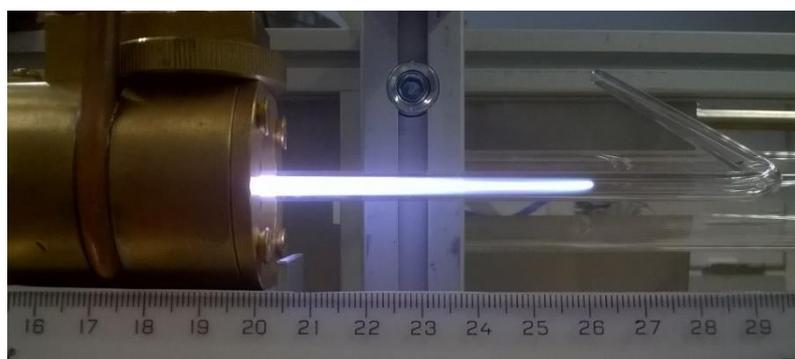


Figure 8 - Plasma d'argon (puissance microonde 70W ; débit gazeux 0.012 sccm)

Cependant le fait que le surfatron soit configuré pour fonctionner avec la présence d'un plasma rend très difficile l'allumage en utilisant seulement les microondes, car la cavité ne se trouve pas dans les conditions idéales de résonance. En effet on observe que la quasi-totalité du rayonnement émis par le générateur est réfléchi par la cavité et n'est donc pas utilisé pour l'excitation des atomes du gaz. Dans ces conditions on ne transmet pas suffisamment d'énergie aux électrons libres pour ioniser le gaz. Pour compenser cette perte de puissance on utilise un dispositif d'allumage qui vient injecter dans la cavité les particules chargées nécessaires pour obtenir l'allumage du plasma.

### II.2.4) Le système d'allumage

Le système d'allumage est un dispositif équivalent à une source de haute tension alternative et qui est positionné sur le tube de quartz en amont de la cavité (figure 9). Le phénomène utilisé est une décharge à barrière diélectrique.

La haute tension est appliquée sur les parois du tube diélectrique (plusieurs kilovolts) provoquant ainsi l'accumulation de charges au niveau du contact. On forme ainsi un condensateur qui va permettre l'établissement d'un champ électrique alternatif  $E$  au sein du tube de quartz. Ce champ électrique va ioniser localement les atomes de gaz, les électrons étant attirés par les charges positives présentes sur un côté de la paroi et les ions positifs par les charges négatives présentes sur le côté opposé (figure 9).

Cependant l'accumulation des particules chargées du gaz sur les parois va progressivement masquer la charge des électrodes du système d'allumage. Le champ électrique au sein du tube va alors diminuer jusqu'à s'annuler complètement. Comme on ne couple plus d'énergie dans le tube, le phénomène d'ionisation s'arrête. C'est pour éviter ce phénomène que la source de tension est alternative. En inversant périodiquement la polarité des électrodes on vient limiter le phénomène de masquage.

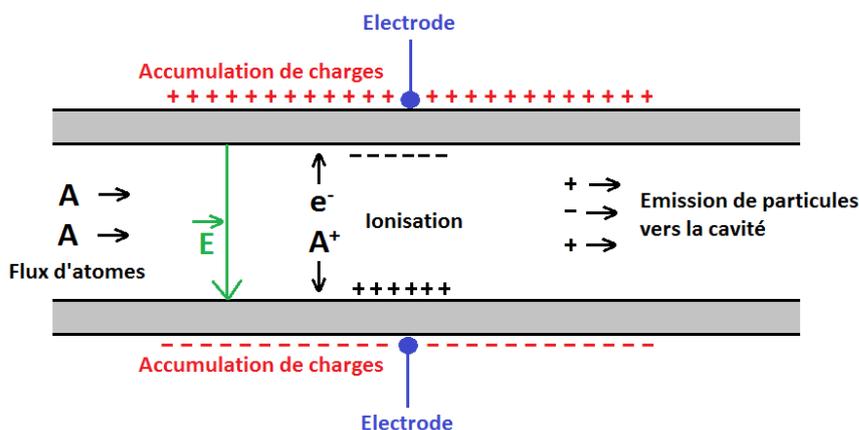


Figure 9 - Schéma de principe du dispositif d'allumage (réalisé avec le logiciel Paint)

On obtient ainsi une source de particules chargées qui seront transportées du système d'allumage jusque dans la cavité par le flux gazeux présent dans le tube, déclenchant ainsi l'allumage du plasma. Ce système d'allumage est prévu pour être commandé par la carte électronique comme déclencheur du plasma surfatron.

Ceci permet un fonctionnement de manière répétitive pour tester des cycles A.L.D.

### II.2.5) Exemple de fonctionnement

Nous décrivons ici un exemple de cycle A.L.D utilisé au laboratoire de l'E.M.P.A dans la ville de Thoune.

#### Etape 1 : le vide

Une fois le substrat en place dans la chambre de réaction (figure 4, n°6), on réalise le vide dans l'enceinte au moyen du système de pompage (pompe à palettes). Les niveaux de vide adéquats sont de l'ordre de  $10^{-2}$  mbar pour ce type d'application de plasma microonde [6]. Le dépôt en basse pression permet de réduire la pollution du substrat par les particules résiduelles présentes dans l'atmosphère et facilite la création du plasma.

#### Etape 2 : Le premier dépôt

On réalise le dépôt de la première couche sur le substrat.

- On ferme la vanne d'échappement (figure 4, n°7) de la chambre de réaction pour l'isoler de la pompe, ceci afin de limiter les pertes de précurseur durant le dépôt.
- On ouvre ensuite la vanne d'admission du premier précurseur (figure 4, n°8) afin d'exposer le substrat au gaz réactif. La quantité de précurseur injectée et la durée d'exposition sont fonctions de la taille de la surface sur laquelle on réalise le dépôt et de la vitesse de la réaction à l'interface gaz-substrat.
- Lorsque le dépôt est terminé on ouvre la vanne d'échappement et on purge l'enceinte de réaction afin d'évacuer tout traces résiduelles du précurseur. L'utilisation d'argon est possible lors de la purge afin d'accélérer celle-ci.

#### Etape 3 : La création du plasma

Pour la seconde étape du cycle A.L.D nous avons besoin d'un plasma d'oxygène. Afin de simplifier la création du plasma on commence par allumer un plasma d'argon qui nécessite moins de puissance microonde que l'oxygène. On évite ainsi que la longueur du plasma allumé soit trop importante et que celui-ci entre dans la chambre de réaction et détériore le substrat (présence d'électrons très énergétiques). On remplace ensuite l'argon par du dioxygène tout en maintenant le plasma allumé.

Pour créer le plasma d'argon on commence par injecter le gaz dans la chambre de réaction (figure 4, n°9). On déclenche ensuite l'émission des microondes dans le surfatron (figure 4, n°2) à la puissance désirée grâce au générateur (figure 4, n°3). Enfin on utilise le système d'allumage (figure 4, n°1) pour obtenir un plasma luminescent puis on substitue le dioxygène à l'argon. On possède maintenant un plasma d'oxygène allumé et une population d'espèces réactives en sortie du surfatron.

#### Etape 4 : Exposition du substrat au plasma

On règle la longueur du plasma à l'aide du surfatron en faisant varier les paramètres de débit de gaz et de puissance microonde afin de s'assurer que les espèces réactives entrent dans la chambre de réaction. Après une certaine durée d'exposition le plasma est éteint et on purge la chambre de réaction.

Le processus reprend ensuite à l'étape 2.

## III) La carte électronique et le programme de commande

### III.1) La carte électronique

Le premier objectif de ce projet était de réaliser un programme informatique pour contrôler une carte électronique. Nous désignerons dans la suite ce dispositif par les termes « la DAQ-carte » et « la carte ».

#### III.1.1) Description de la carte

La DAQ-carte est le résultat d'un projet réalisé par les étudiants du laboratoire de microélectronique de la B.F.H. Ce dispositif peut générer et acquérir des signaux analogiques et numériques et est contrôlable par ordinateur via une communication U.S.B. Le tableau suivant regroupe les principales caractéristiques entrée/sortie de la carte. Les spécifications sont disponibles en annexe 1.

CANNAUX	10 Entrées analogiques 5 Sorties analogiques 12 Entrées/Sorties numériques (configurables)	De 0V à +10V De 0V à +10V 3.3V Logique
COMMUNICATION	U.S.B ou Série	

La DAQ-carte est fournie avec son propre micro logiciel et peut comprendre un ensemble de commandes ASCII qui sont envoyées par un ordinateur.

#### III.1.2) Le protocole de communication

L'utilisateur peut communiquer avec la carte en utilisant une série de commandes ASCII prédéfinies et la carte répond en retournant des chaînes de caractères. Les commandes envoyées doivent toujours être suivies du caractère de fin de ligne « \n ». Les réponses de la carte sont également suivies de ce caractère. Le tableau suivant récapitule les différentes commandes de la carte.

COMMANDE	UTILISATION
info 0 0	La carte retourne l'état de tous les canaux (activé ou désactivé).
escp 0 0	Désactive tous les canaux. La carte retourne l'acquiescement « escap ».
data 0 0	La carte renvoie une chaîne de caractères contenant les valeurs de tension mesurées sur chaque canal d'entrée activé. Ces valeurs sont codées sur 12 bits.
setp ao00 12345	Active le canal de sortie analogique numéro 00. Le nombre « 12345 » est la valeur de tension de sortie codée sur 16 bits.
setp ai00 1	Active le canal d'entrée analogique numéro 00.
setp di00 1	Active le canal d'entrée numérique numéro 00.
setp do00 xxxxx	Active le canal de sortie numérique numéro 00. Le nombre « xxxxx » codé sur 16 bits doit seulement être différent de 0.

Nous décrivons par la suite quelques cas d'utilisation de ces commandes.

### Exemples d'utilisation

- L'opérateur veut savoir si la carte est connectée :
  - o Il envoie la commande « info 0 0 ».
  - o Si la carte est connectée, elle renvoie l'ensemble de caractères suivant (figure 10) :

Figure 10 - Réponse info 0 0 (capture d'écran du logiciel LabVIEW)

Remarque : Le caractère « \$ » joue le rôle de séparateur.

On obtient alors différentes informations :

- 1) Une indication relative au nombre de canaux d'entrée activés. Ce nombre est incrémenté de cinq pour un canal analogique et de deux pour un canal numérique.
- 2) L'acquiescement de la commande.
- 3) Des caractères de remplissages

Avec cette commande l'utilisateur peut également vérifier quels canaux sont activés (figure 11).

Figure 11 - Indication des canaux activés (capture d'écran du logiciel LabVIEW)

Les caractères « \$AI00\$ » signifient que le canal d'entrée analogique numéro 00 est activé et les caractères « \$DO02\$ » signifient que le canal de sortie numérique numéro 02 est activé.

- Si l'opérateur souhaite connaître les valeurs de tension des canaux d'entrée activés.
  - o Il envoie la commande « data 0 0 ».
  - o Si au moins un canal d'entrée est activé la carte retourne la chaîne de caractères suivante (figure 12) :

Figure 12 - Indication des valeurs de tension (capture d'écran du logiciel LabVIEW)

Au contraire, si aucun canal d'entrée n'est activé, la carte renvoie uniquement l'acquiescement « data ».

- Si l'utilisateur veut activer un canal spécifique sur la carte. Il doit dans ce cas envoyer une chaîne de caractères contenant des éléments précis et qui dépendent du type de canal. Par exemple la chaîne de caractères « setp ao00 00000 » active le canal de sortie analogique numéro 00 avec une valeur de tension égale à zéro volt.
- Si l'utilisateur souhaite désactiver tous les canaux (sortie et entrée) :
  - o Il envoie la commande « escp 0 0 ».
  - o La carte renvoie l'acquiescement « escap ».

Remarque : L'utilisateur ne peut pas désactiver qu'un seul canal à la fois, il est obligé de désactiver tous les canaux à la fois.

Afin de pouvoir communiquer avec la carte par le biais d'un ordinateur, j'ai réalisé un programme de commande sous le logiciel LabVIEW (Entreprise National Instruments). LabVIEW est un logiciel utilisant un langage graphique. Un programme sous LabVIEW est appelé un « VI » et un sous-programme est naturellement appelé un « sous VI ».

### III.2) Le programme de commande informatique

La première étape était de créer une bibliothèque de sous programmes pour exécuter les commandes de bases de la carte.

#### III.2.1) Les sous-programmes de communication

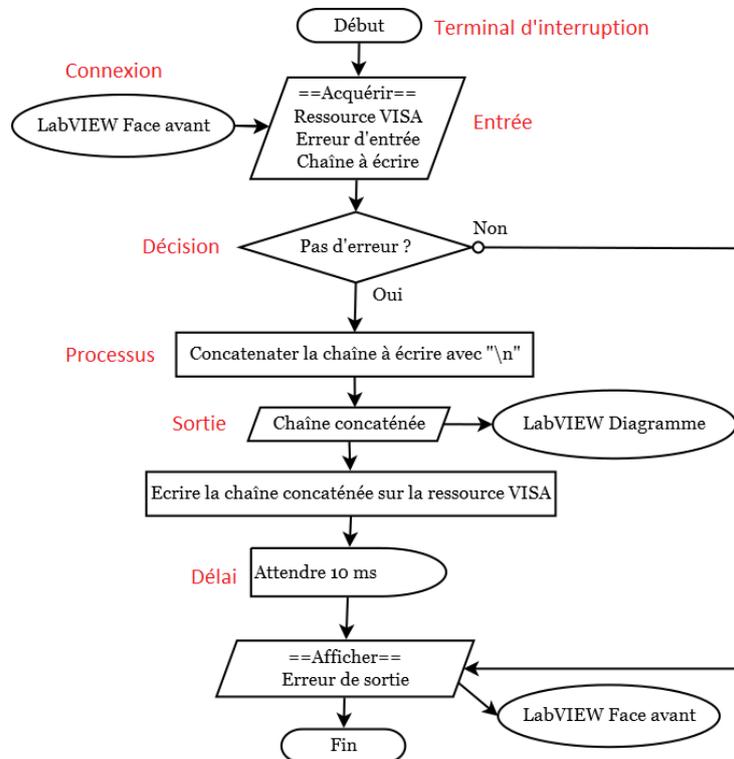
La communication entre la carte et LabVIEW utilise les fonctions VISA du logiciel, j'ai donc réalisé deux sous programmes *write.vi* et *read.vi* afin de respectivement écrire et lire sur le port de communication VISA. De plus pour rendre plus facile l'utilisation des commandes de base de la carte (info 0 0, data 0 0, escp 0 0 et setp), j'ai réalisé un sous-programme d'exécution pour chacune d'elle.

Nous décrivons par la suite le fonctionnement de ces programmes au travers de diagrammes de flux simplifiés. Les captures d'écran LabVIEW de ces programmes sont disponibles dans les annexes 2 à 7.

III.2.1.1) Sous VI *write.vi*

Ce programme (figure 13) met en forme et écrit une chaîne de caractères, fournie en entrée, sur le port de communication VISA.

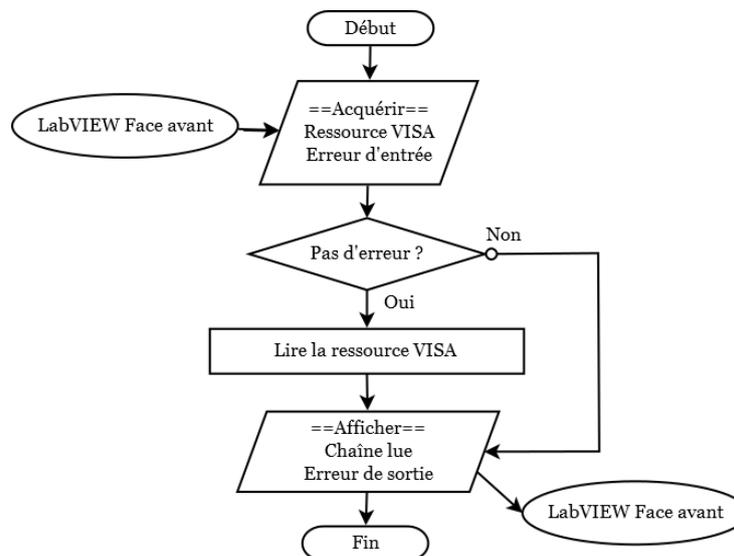
Figure 13 - Diagramme des flux du programme *write.vi* (réalisé avec le logiciel Dia)



III.2.1.2) Sous VI *read.vi*

Ce programme (figure 14) lit les informations présentes sur le port de communication VISA.

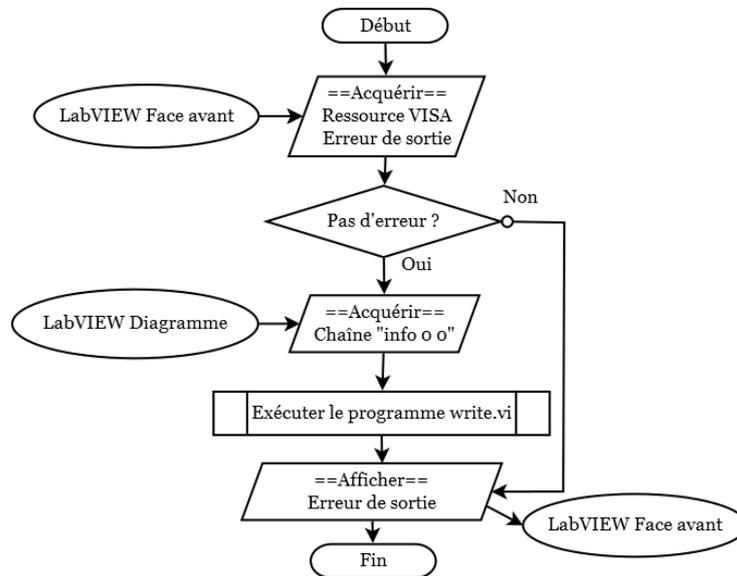
Figure 14 - Diagramme des flux du programme *read.vi* (réalisé avec le logiciel Dia)



III.2.1.3) Sous VI *info 0 0.vi*

Le programme (figure 15) écrit la chaîne de caractères « info 0 0 » sur le port de communication VISA.

Figure 15 - Diagramme des flux du programme *info 0 0* (réalisé avec le logiciel Dia)

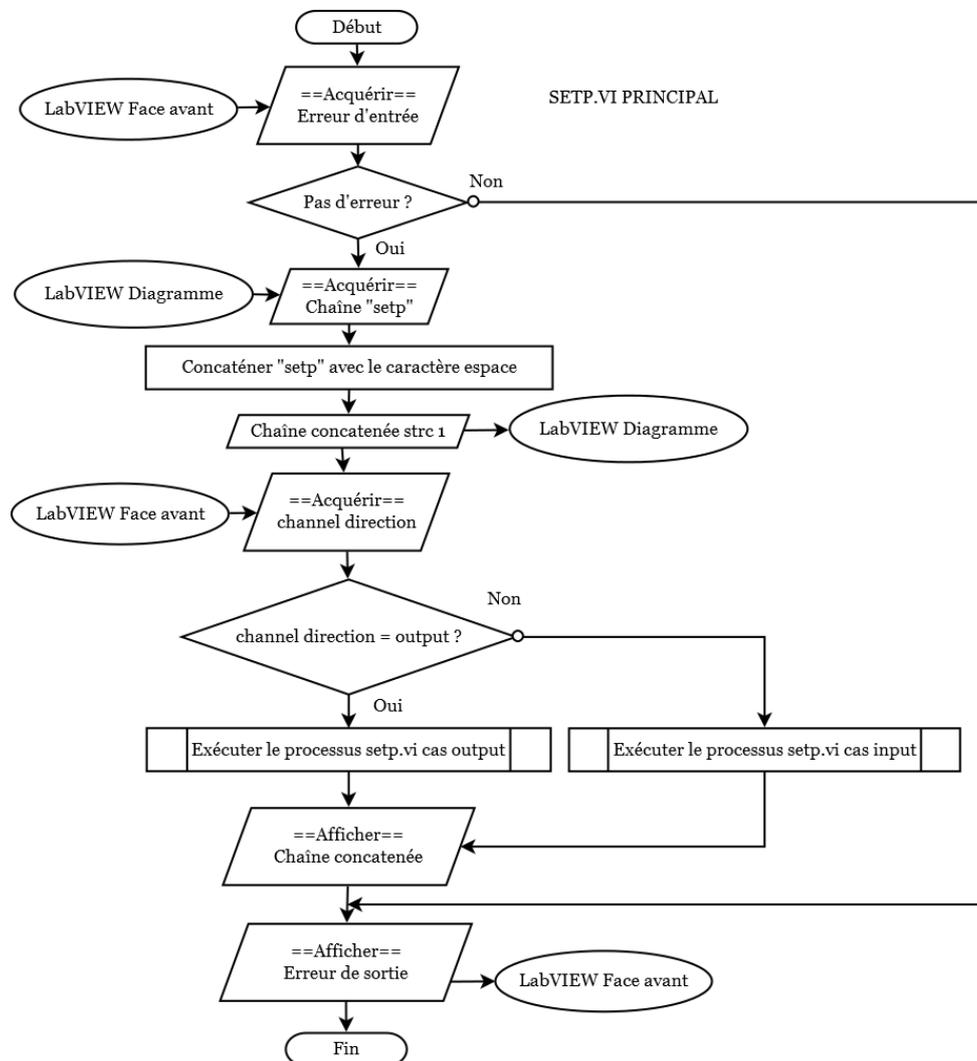


Les sous programmes *data 0 0.vi* et *escp 0 0.vi* ont le même algorithme que le programme *info 0 0.vi*. La chaîne de caractères « info 0 0 » est remplacée par les chaînes « data 0 0 » et « escp 0 0 ».

III.2.1.4) Sous VI *setp.vi*

Ce sous-programme (figure 16,17 et 18) est le plus important car il permet de construire étape par étape la chaîne de caractères pour configurer un canal sur la DAQ-carte.

Figure 16 - Diagramme des flux principal du programme *setp.vi* (réalisé avec le logiciel Dia)



Le programme rassemble des informations concernant le canal qui sont fournies par l'utilisateur sous la forme de variables :

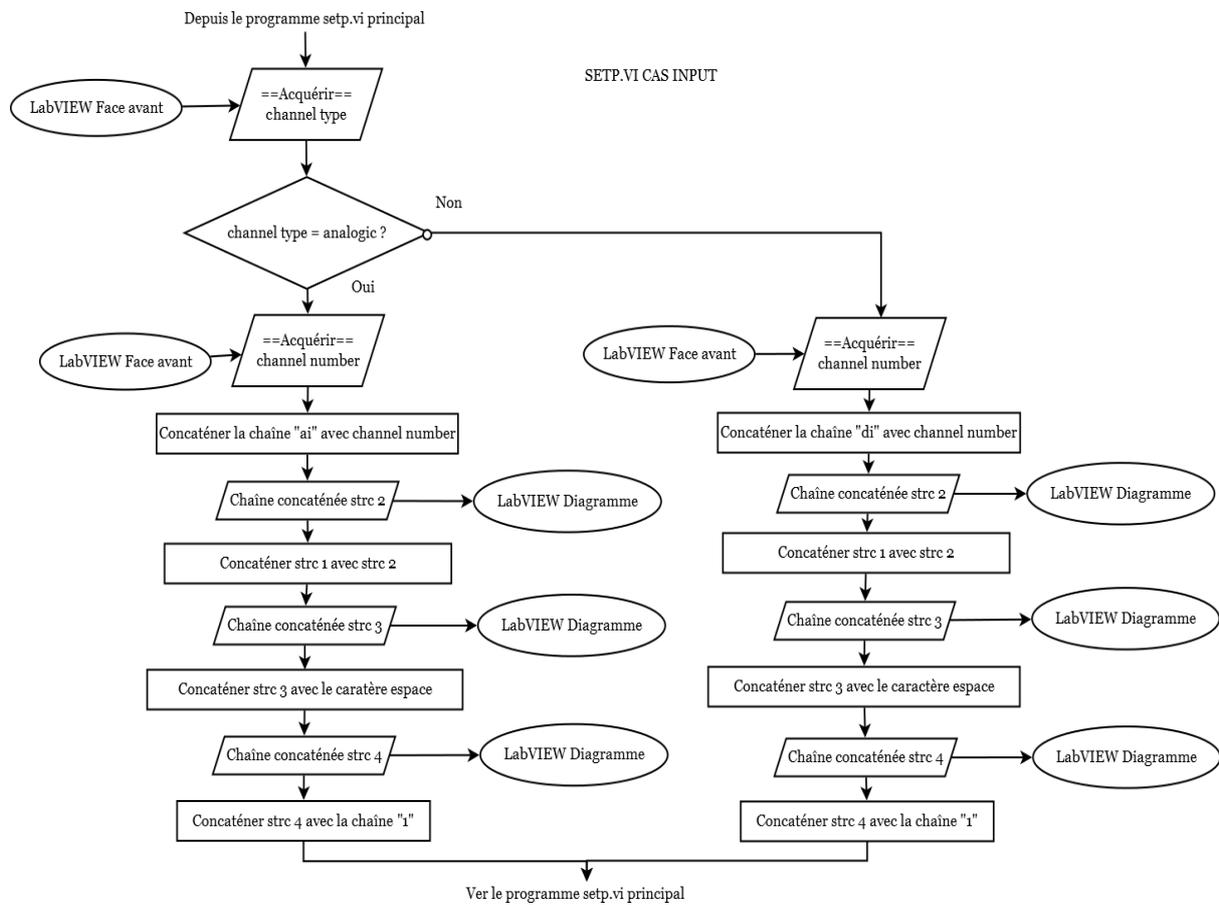
- *Channel type* (analogique ou numérique)
- *Channel direction* (entrée ou sortie)
- *Channel number* (nombre variant de 00 à 09 pour les entrées analogiques, de 00 à 04 pour les sorties et de 00 à 11 pour les canaux numériques)
- *Channel state* (activé ou désactivé)
- *Voltage value* (utilisée seulement pour la configuration d'un canal de sortie analogique)

Ensuite le programme construit une chaîne de caractères contenant tous les paramètres précédents. Cette chaîne est ensuite récupérée pour être envoyée à la carte. Les diagrammes des flux des processus *setp.vi cas input* et *setp.vi cas output* sont décrit par la suite.

Figure 17 - Diagramme des flux du processus *setp.vi cas output* (réalisé avec le logiciel Dia)



Figure 18 - Diagramme des flux du processus *setp.vi cas input* (réalisé avec le logiciel Dia)

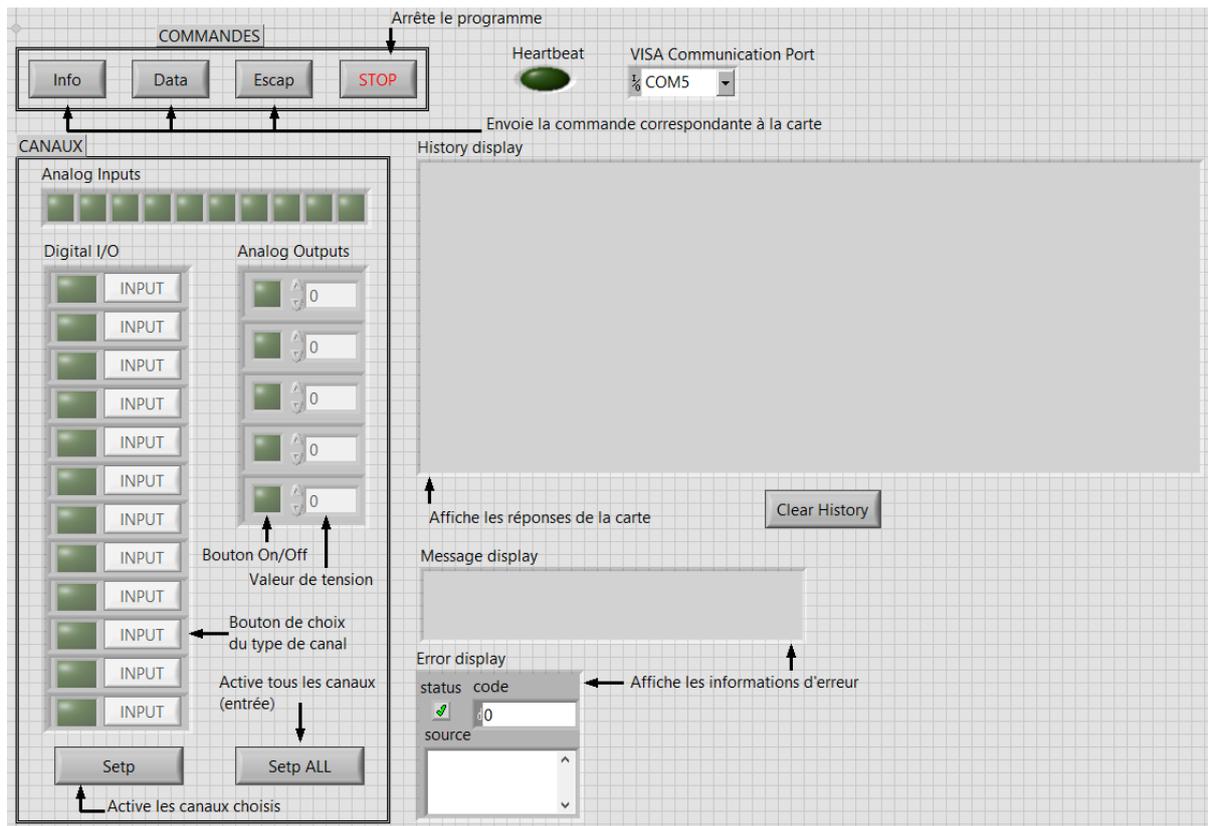


Tous les sous programmes décrits précédemment sont utilisés pour la création de n'importe quel programme nécessitant de communiquer avec la carte.

### III.2.2) Le programme de commande *Com with board.vi*

Afin de simplifier les interactions avec la carte dans les futures applications, j'ai réalisé une interface de communication sous LabVIEW permettant d'exécuter toutes les fonctions de celle-ci (figure 19). Ce programme est utile lors de tests utilisant la carte ou pour contrôler le bon fonctionnement du dispositif.

Figure 19 - Capture d'écran de la face avant du programme **Com with board** réalisé avec le logiciel LabVIEW



L'utilisateur peut exécuter toutes les commandes de base en utilisant les boutons correspondants et lire les réponses de la carte via l'affichage d'un historique. Le mode d'emploi de ce programme est disponible en annexe 8.

### III.3) La calibration de la carte et les programmes de correction

#### III.3.1) La calibration de la carte

Avant d'utiliser la DAQ-carte pour les expériences, j'ai voulu réaliser une calibration de ses entrées et sorties analogiques.

Considérons le cas des entrées analogiques. Par construction la carte convertit les tensions lues en entrée en nombres selon une fonction de transfert « f ». Le but de la calibration est de déterminer cette fonction pour ensuite établir une fonction de transfert « g » qui sera utilisée par le logiciel LabVIEW. On obtient ainsi des valeurs de tensions qui seront lues par l'utilisateur. Le schéma suivant décrit les différentes étapes du traitement de la tension lue en entrée.

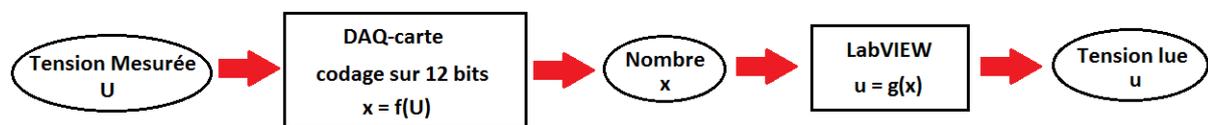


Figure 20 – Schéma explicatif du traitement du signal par les entrées de la DAQ-carte (réalisé avec le logiciel Paint)

J'ai donc réalisé une série d'expériences pour obtenir des données permettant de modéliser la fonction de transfert de la carte.

#### Première expérience : Calibration des entrées analogiques

Au cours de cette expérience j'utilise la carte pour faire l'acquisition d'un signal analogique connu.

#### Protocole expérimental

- Appliquer sur l'entrée une rampe de tension de 0 à 10 volts avec un pas de 0.5 volt.
- Faire dix acquisitions pour chaque valeur de la consigne (vingt et une mesures au total).

Par cette expérience j'ai observé que la réponse de la carte était proche d'une réponse linéaire mais que chaque canal possédait son propre comportement. J'ai donc réalisé une régression linéaire des données obtenues pour déterminer la fonction de transfert « g ». Par la suite j'ai vérifié la validité du modèle par la méthode de l'ajustement pondéré (Weighted fit). Cet ajustement est calculé par la relation suivante :

$$\text{Weighted fit} = \frac{(U - g(x))^2}{\sigma(U)^2}$$

- U est la consigne de tension mesurée en entrée.
- x le nombre égal à la tension U codée sur 12 bits.
- g(x) la valeur de tension calculée avec le modèle.
- $\sigma(U)$  l'écart type de la consigne.

L'écart type  $\sigma(U)$  est calculé en prenant en compte l'incertitude sur la consigne en entrée et l'incertitude globale du système dans lequel la carte sera amenée à fonctionner (commande de débit mètre massique précis à 1% par exemple).

La validité du modèle est évaluée en calculant la racine carrée de la somme de tous les ajustements pondérés, un pour chaque valeur de la consigne, divisé par le nombre de degré de liberté du modèle (ici un car l'ordonnée à l'origine est fixée à zéro dans la régression). Si la valeur est proche de un, le modèle peut être considéré comme raisonnablement bon [7].

J'ai par la suite réalisée une calibration similaire pour les sorties analogiques.

#### Deuxième expérience : Calibration des sorties analogiques

Lors de cette expérience je mesure le signal de sortie du canal analogique lorsqu'il est configuré avec une consigne de tension connue.

#### Protocole expérimental

- Configurer le canal avec différentes consignes de tension comprises entre 0 volt et 10 volts.
- Faire une acquisition de la tension de sortie pour chaque valeur de la consigne.

Ici également j'ai observé que la réponse de la carte était proche d'une réponse linéaire mais avec des comportements différents pour chaque canal.

Au terme de ces deux expériences j'ai obtenu les coefficients de régression linéaire pour chaque canal d'entrée et de sortie analogique. Ces données seront utilisées par la suite.

Le résultat de ce travail a été la création de deux programmes pour corriger les signaux lus et générés par la carte. Le programme *AO Correction.vi* qui corrige les signaux analogiques générés en sortie et le programme *AI Correction.vi* qui corrige les signaux lus.

### III.3.2) Les programmes de correction

Les deux programmes *AO Correction.vi* et *AI Correction.vi* exécutent une régression linéaire des données gérées par les canaux analogiques de la carte en utilisant les coefficients calculés précédemment. Ils sont utilisés en amont de tous traitements des données afin de fournir des valeurs correctes.

III.3.2.1) Sous VI AO Correction.vi

Ce programme (figure 21 et 22) corrige les données générées par une sortie analogique de la carte. Au cours de l'exécution le programme prend en entrée la consigne de tension désirée par l'utilisateur ainsi que le numéro du canal utilisé. Le programme réalise ensuite une régression linéaire avec les coefficients spécifiés pour chaque canal par l'expérience de calibration. En fin d'exécution le programme renvoie la consigne de tension ajustée, sous la forme d'un entier (codage sur 16 bits) qui sera utilisé dans le programme setp.vi.

Figure 21 - Capture d'écran de la face avant du programme AO Correction.vi réalisé avec le logiciel LabVIEW

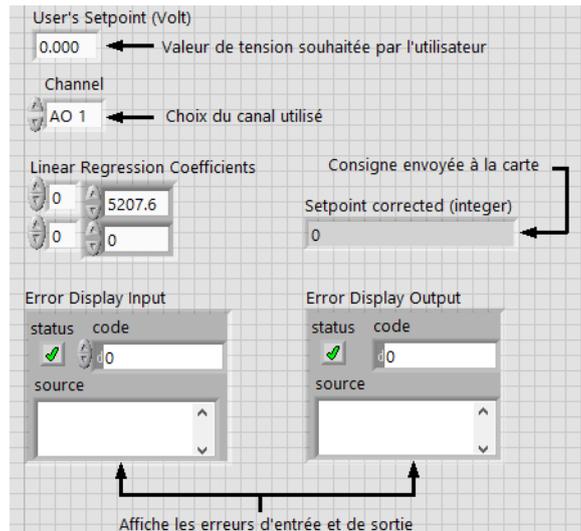
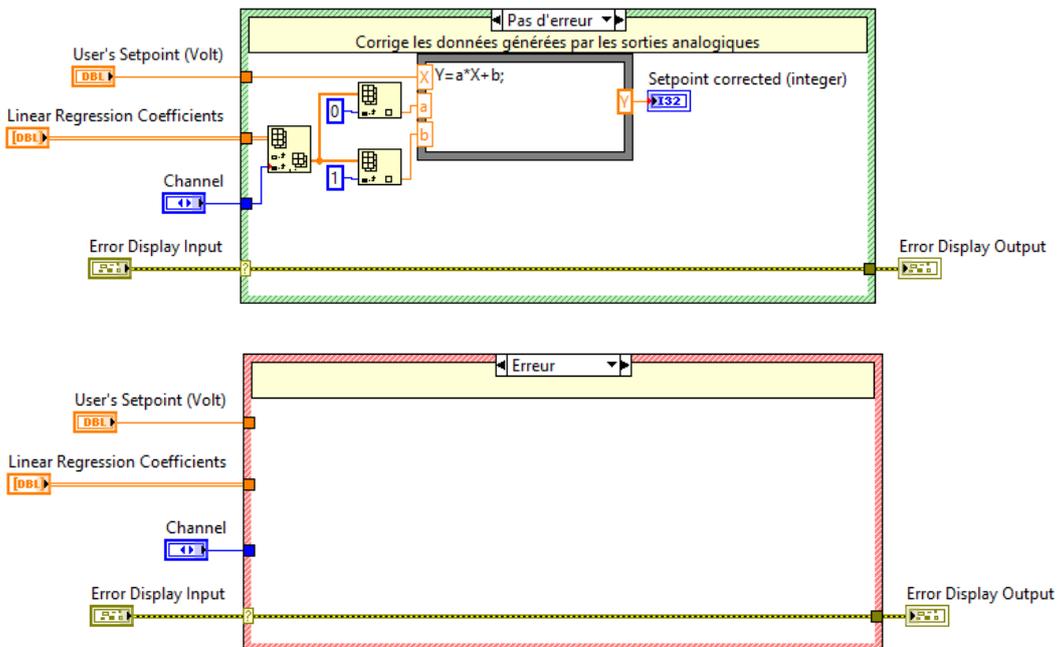


Figure 22 - Captures d'écran du diagramme du programme AO Correction.vi réalisé avec le logiciel LabVIEW



III.3.2.2) Sous VI AI Correction.vi

Ce programme (figure 23 et 24) corrige les données qui sont lues par une entrée analogique de la carte. Lors de l'exécution le programme prend les données lues sur l'entrée et le numéro du canal utilisé. Ici encore le programme réalise une régression linéaire avec les coefficients spécifiés par l'expérience de calibration. En fin d'exécution le programme renvoie la valeur de tension ajustée qui sera lue par l'utilisateur.

Figure 23 - Capture d'écran de la face avant du programme AI Correction.vi réalisé avec le logiciel LabVIEW

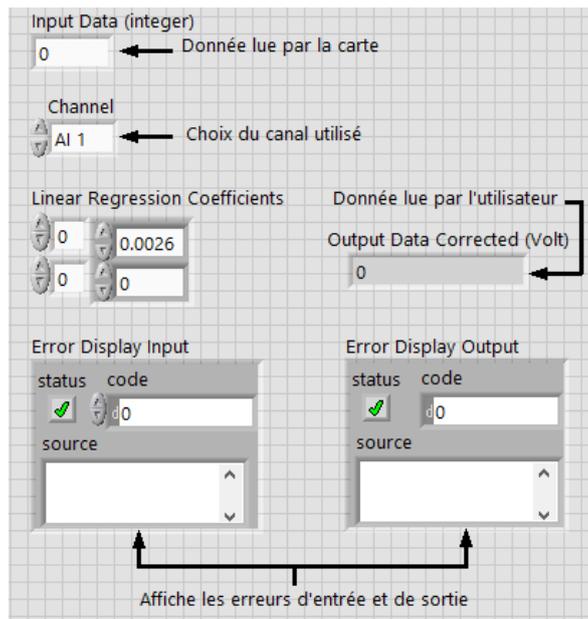
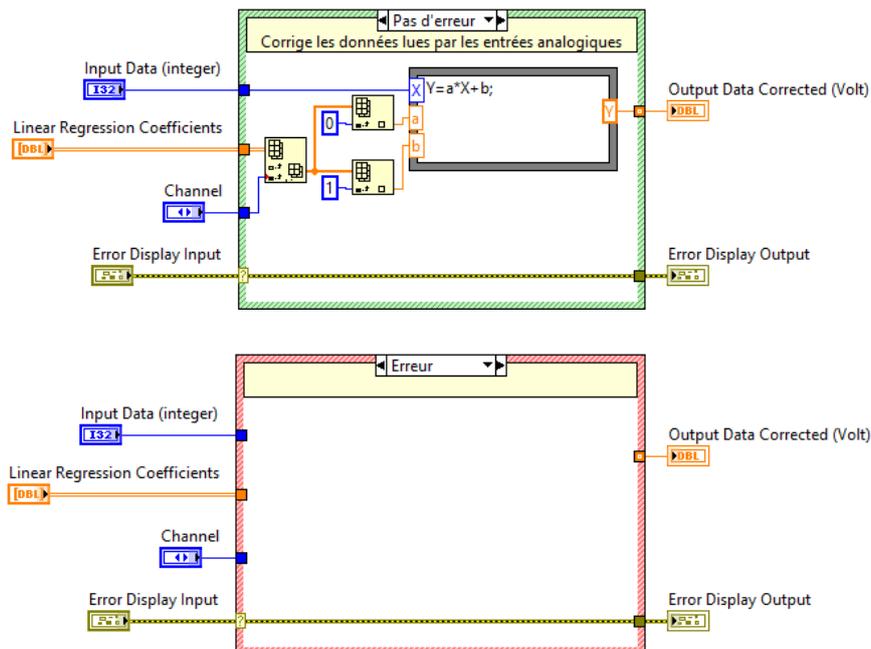


Figure 24 - Captures d'écran du diagramme du programme AI Correction.vi réalisé avec le logiciel LabVIEW



## IV) Allumage du plasma, développements et tests

La seconde partie de mon travail était de tester un dispositif utilisé durant le processus A.L.D afin de rendre l'allumage du plasma plus rapide et plus efficace. La finalité de ce dispositif sera l'intégration sur le système A.L.D expérimental au laboratoire de l'E.M.P.A.

### IV.1) Test du système d'allumage

Comme nous l'avons vu précédemment le système d'allumage est un dispositif, utilisant le phénomène de décharge à barrière diélectrique pour déclencher l'allumage d'un plasma dans un surfatron. Il est alimenté directement par le réseau électrique de la salle et possède un système de déclenchement en tension (application de trois volts en entrée).

Afin de déterminer l'efficacité de ce dispositif j'ai réalisé une série d'essais d'allumage de plasmas mettant en œuvre différents paramètres expérimentaux tels que la pression dans le tube de quartz, la puissance d'émission microonde, le flux gazeux et le type de gaz utilisé. Au cours de ces expériences je déclenche le système d'allumage un grand nombre de fois pour différentes valeurs des paramètres expérimentaux, puis je compte le nombre d'allumages réussis.

Pour effectuer ces expériences j'ai réalisé un programme LabVIEW qui utilise la DAQ-carte pour commander automatiquement le déclenchement du système d'allumage et détecter le phénomène via un dispositif photosensible décrit dans les chapitres suivants. Le processus général d'exécution est le suivant :

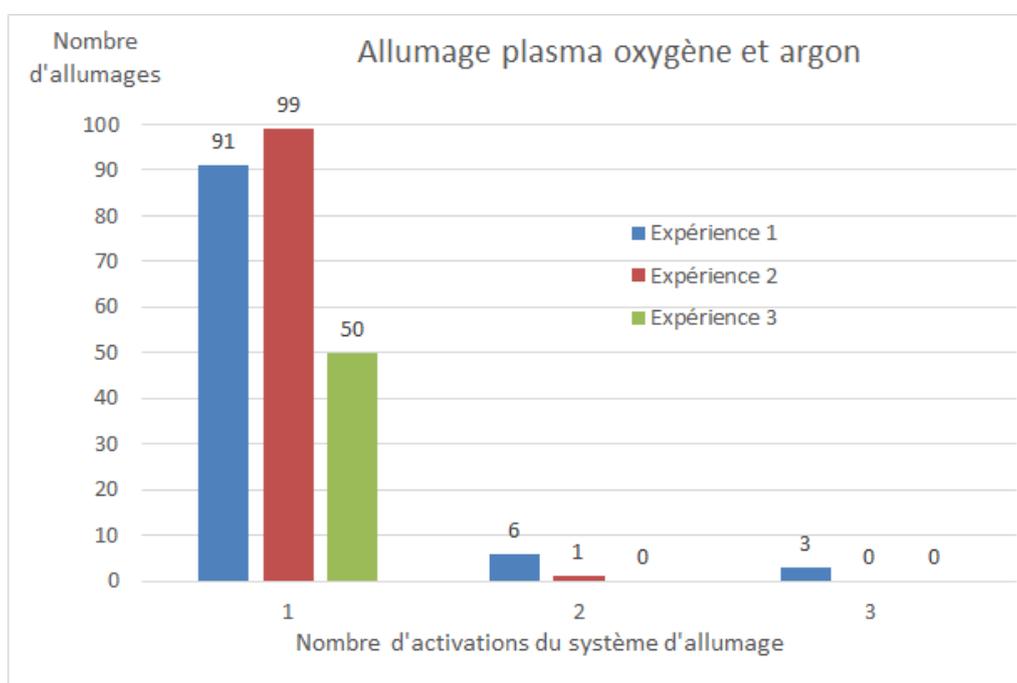
- 1) Démarrage du programme
- 2) Attente du réglage des paramètres expérimentaux par l'utilisateur
- 3) Acquisition de la tension de sortie du dispositif de détection
- 4) Démarrage du cycle
- 5) Déclenchement de l'émission microonde
- 6) Déclenchement du système d'allumage
- 7) Acquisition de la tension de sortie du dispositif de détection
- 8) Comparaison des deux tensions de sortie du dispositif de détection. Détermination si l'allumage a eu lieu ou non.
- 9) Si l'allumage a lieu alors le processus passe à l'étape suivante. Sinon le processus reprend à l'étape 6) jusqu'à atteindre le nombre d'essais maximum
- 10) Arrêt de l'émission microonde
- 11) Enregistrement du nombre d'essais pour le cycle
- 12) Si le nombre maximum de cycles réalisés est atteint alors le processus passe à l'étape suivante. Sinon le processus reprend à l'étape 4)
- 13) Affichage du nombre d'essais par cycles
- 14) Fin du programme

L'ajout du contrôle du générateur de microonde et des débits mètre par le programme a également été envisagée.

On décrit par la suite un exemple d'expérience que j'ai réalisée avec un mélange gazeux d'argon et d'oxygène. Les valeurs des paramètres expérimentaux sont données dans le tableau suivant :

	Puissance microonde (watts)	Pression (mbar)	Flux gazeux (sccm)
Expérience 1	25	1,3	(Ar) 0,012 ; (O2) 0,30
Expérience 2	25	1,2	(Ar) 0,003 ; (O2) 0,30
Expérience 3	20	1,6	(Ar) 0,002 ; (O2) 0,20

Le graphique suivant (figure 25) donne les résultats des expériences. Cents cycles ont été réalisés pour l'expérience 1 et l'expérience 2 et seulement cinquante pour l'expérience 3. Le nombre d'essais par cycle était limité à trois, au-delà j'ai considéré que l'allumage n'était pas satisfaisant.



On note qu'un très grand nombre d'allumages se sont produits dès le premier déclenchement du dispositif. Pour cette expérience on vérifie que la fiabilité du système est satisfaisante. J'ai par la suite répété les expériences pour des gaz de dihydrogène et de diazote dont les résultats sont donnés en annexe 9.

Au terme de ses expériences j'ai établi un ensemble de données statistiques qui permettent de justifier l'emploi de ce système d'allumage pour les applications A.L.D. En effet lors du processus de dépôt par couches atomiques on réalise un grand nombre de fois l'allumage. Il est donc intéressant de disposer d'un système efficace.

## IV.2) Le système de détection de l'allumage du plasma

Le premier moyen que j'ai utilisé pour détecter l'allumage du plasma était de vérifier la valeur de la puissance microonde réfléchiée par le surfatron (mesurée par le générateur). En effet, comme nous l'avons vu précédemment, dès que le plasma est allumé le surfatron se trouve dans les conditions idéales de résonance. Dans ces conditions la puissance réfléchiée est très faible voire pratiquement nulle. Cependant il est possible de commettre des erreurs avec cette méthode en particulier lorsque l'on travaille avec de faible puissance d'allumage. En effet si la valeur de la puissance microonde émise est faible, celle de la puissance réfléchiée l'est également. Il devient alors difficile de déterminer les variations de la puissance réfléchiée et par conséquent de détecter l'allumage.

Il était donc nécessaire de trouver une autre solution pour détecter l'allumage. Le choix que j'ai retenu est l'utilisation d'un dispositif photosensible basé sur une photodiode.

### IV.2.1) La conception du système de détection

#### IV.2.1.1) Choix du dispositif photosensible

Les plasmas utilisés lors des expériences sont formés à partir de gaz monoatomiques ou moléculaires. Les plus utilisés sont l'argon, le dioxygène, le diazote, et un mélange de diazote et de dihydrogène. Les spectres d'émissions de ces plasmas lors de l'allumage couvrent une large gamme de longueurs d'onde et en particulier le domaine de la lumière visible (figure 26 et 27).



Figure 26 – Lumière visible émise par un plasma d'argon allumé



Figure 27 - Lumière visible émise par un plasma de dioxygène allumé

J'ai donc décidé d'utiliser cette lumière pour déterminer si un plasma est allumé. La solution technologique que j'ai retenue est une photodiode S2386 – 44K (spécifications en annexe 10). J'ai par la suite réalisé une expérience pour vérifier si ce dispositif était satisfaisant pour notre application.

### Test de la photodiode S2386

Au cours de cette expérience j'ai déterminé la valeur de la résistance R1 dans le circuit de la photodiode qui offrait un gain satisfaisant (figure 28).

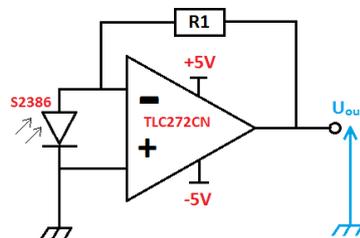


Figure 28 – Schéma du circuit de la photodiode

### Protocole expérimental:

Pour réaliser cette expérience je me suis placé dans les conditions (pression, flux gazeux et puissance microonde) permettant l'allumage du plasma.

- Allumer la pompe à vide
- Allumer la sonde à vide
- Attendre d'obtenir un vide satisfaisant (au moins  $10^{-1}$  mbar)
- Ouvrir les arrivées d'eau et d'air comprimé (système de refroidissement)
- Allumer l'alimentation du débit mètre
- Régler le débit gazeux sur 20 sccm
- Allumer l'alimentation de la photodiode (+5V et -5V)
- Noter la valeur de la tension en sortie de la photodiode
- Allumer le générateur de microondes
- Régler la valeur de la puissance microonde émise. Démarrer à trois watts (valeur minimum pour allumer et donnant une faible luminosité du plasma)
- Démarrer l'émission microonde
- Activer le système d'allumage
- Noter la nouvelle valeur de la tension en sortie de la photodiode.

La photodiode était placée horizontalement, en face du tube de quartz, dans l'ambiance lumineuse d'une salle éclairée (figure 29).



Figure 29 – Positionnement de la photodiode lors de l'expérience

Le tableau suivant rassemble les résultats de l'expérience :

Valeur de la résistance R1 (Ohms)	Tension sans plasma (volts)	Tension avec plasma (volts)
$10^4$	-0,040	-0,800
$10^5$	-0,080	-4,000
$10^6$	-0,880	-4,800
$10^7$	-4,800	-4,800
$6,20 * 10^5$	-0,520	-4,800

La valeur de la résistance R1 est choisie égale à 620 kilo ohms car c'est la valeur qui minimise le plus la tension mesurée en l'absence de plasma tout en conservant la saturation de la photodiode lors de l'allumage. On obtient ainsi un dispositif capable de distinguer les deux états du plasma et de transcrire cette information sous la forme d'un signal proche du type « tout ou rien ».

La photodiode S2386 – 44K est donc une solution satisfaisante pour notre application et je l'ai utilisé par la suite dans le développement du système photosensible.

#### IV.2.1.2) Fabrication du système photosensible

Pour fonctionner correctement la photodiode doit être positionnée à proximité du plasma et par conséquent proche des perturbations électromagnétiques issues de l'émission microonde et du système d'allumage. Ces perturbations induisent du bruit sur le signal délivré par la photodiode, en particulier lorsque l'on déclenche le système d'allumage.

La perturbation se présente sous la forme d'une sinusoïde amortie dont l'amplitude maximum est d'environ 2 volts (figure 30).

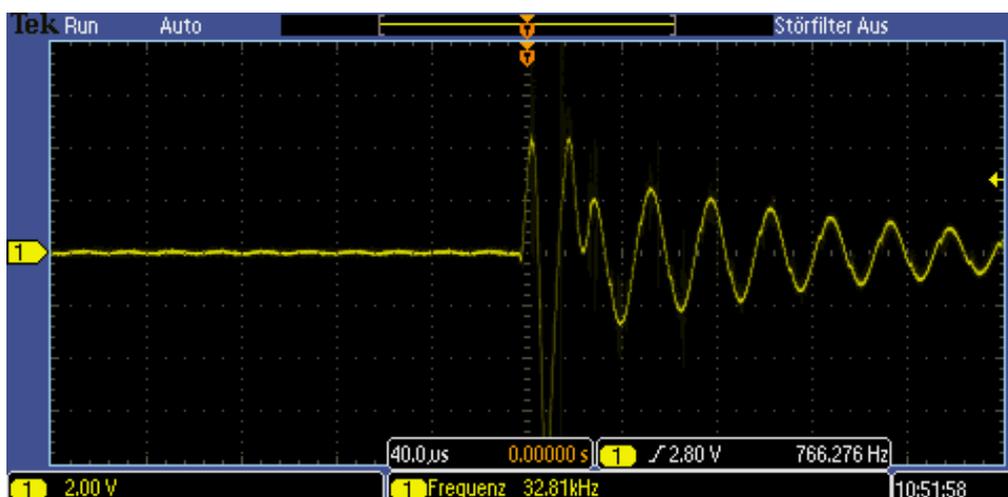


Figure 30 - Allure de la perturbation induite par le système d'allumage sur le signal de la photodiode (non blindée)

Pour protéger l'équipement, et éviter une perturbation par rayonnement de la mesure, j'ai décidé d'inclure des blindages dans tout le développement (ex. enceinte métallique de blindage). Les différentes étapes du développement sont décrites dans les paragraphes suivants.

#### IV.2.1.2.1) Etape 1 : La conception du circuit électronique

Le circuit électronique du dispositif comporte trois sous circuits différents : L'étage d'amplification, l'étage de sortie et l'étage d'alimentation.

##### L'étage d'amplification (figure 31)

Le circuit de la photodiode déjà réalisé précédemment délivre une tension négative en sortie qui ne peut pas être lue par la DAQ-carte. Un amplificateur inverseur est donc ajouté pour délivrer une tension positive en sortie.

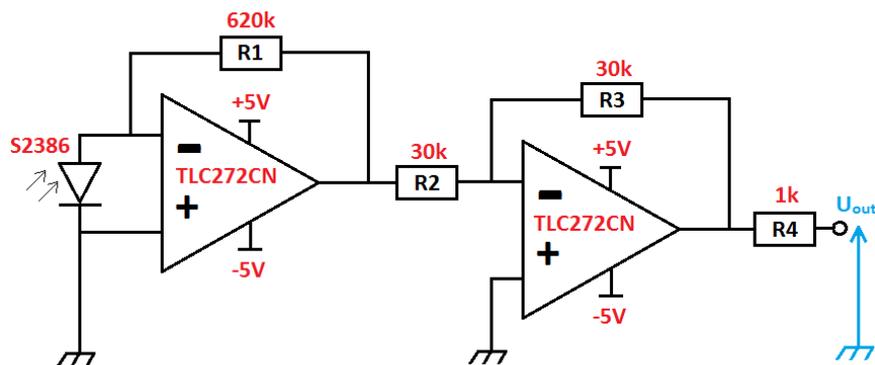


Figure 31 – Schéma de l'étage d'amplification (réalisé avec le logiciel Paint)

Le gain de l'amplificateur inverseur est choisie égal à 1 car l'amplification du signal est déjà réalisée par le circuit de la photodiode.

##### L'étage de sortie (figure 32)

Pour améliorer l'isolation du système un phototransistor est utilisé en sortie du dispositif (isolation galvanique).

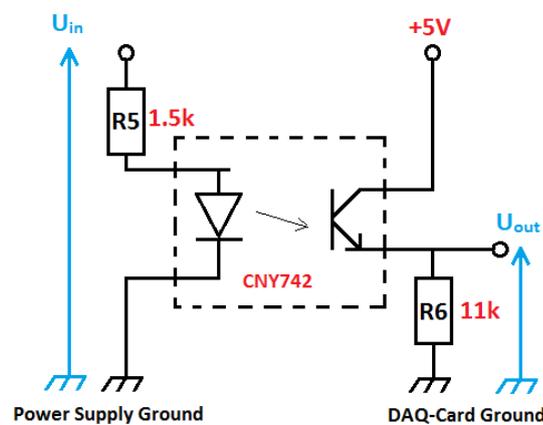


Figure 32 – Schéma de l'étage de sortie (réalisé avec le logiciel Paint)

L'étage d'alimentation (figure 33)

Le système ne nécessitant pas beaucoup de puissance (courants inférieurs à 4 mA) j'ai décidé d'utiliser pour l'alimentation, deux batteries de 9 volts et deux régulateurs de tension délivrant respectivement +5 volts et -5 volts. Un interrupteur et un témoin lumineux (LED) ont été ajoutés préserver les batteries lorsque l'appareil n'est pas utilisé.

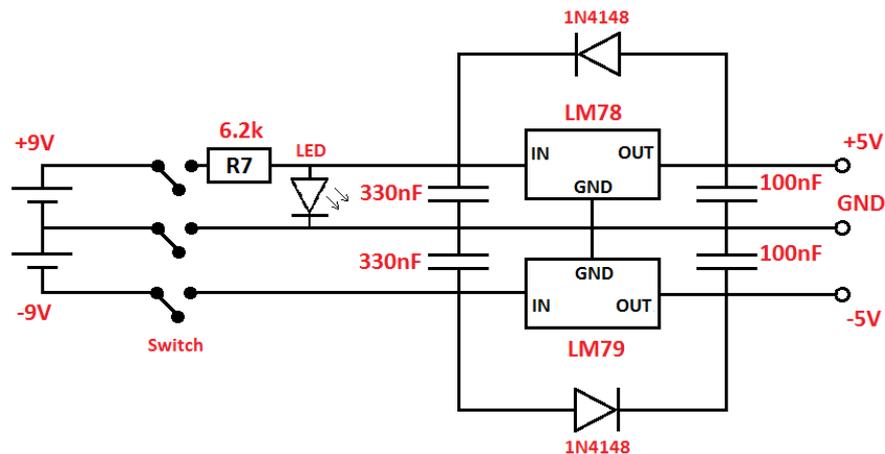


Figure 33 – Schéma de l'étage d'alimentation (réalisé avec le logiciel Paint)

J'ai par la suite vérifié le bon fonctionnement du circuit complet en réitérant l'expérience de détection d'allumage. Après validation, j'ai intégré le circuit sur une plaquette électronique expérimentale (figure 34).

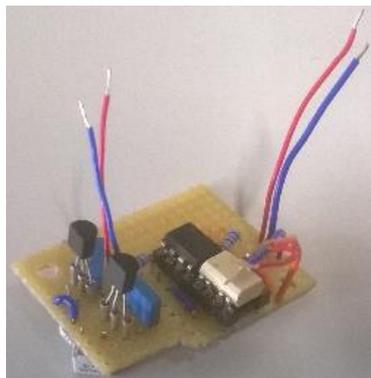


Figure 34 - Circuit électronique intégré

IV.2.1.2.2) Etape 2 : Conception de l'enceinte

Avant de concevoir l'enceinte à utiliser il a été nécessaire de dresser la liste de tous les composants nécessaire au développement. Les spécifications et les dessins techniques simplifiés des composants sont disponibles dans les annexes 11 et 12.

L'enceinte est une boîte métallique, munie d'un couvercle, dans laquelle des trous ont été percés pour permettre le passage des différents composants (figure 35 et 36).

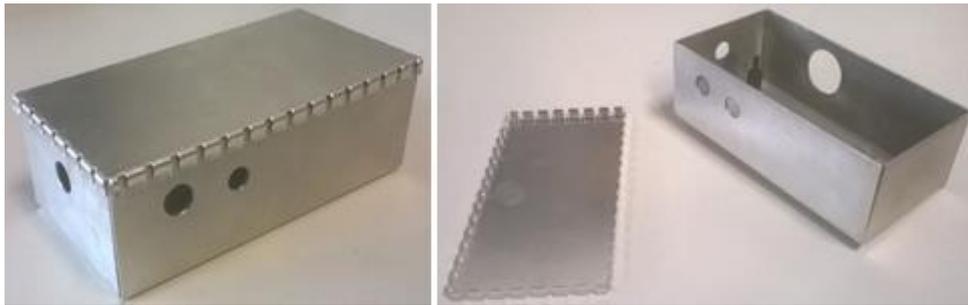
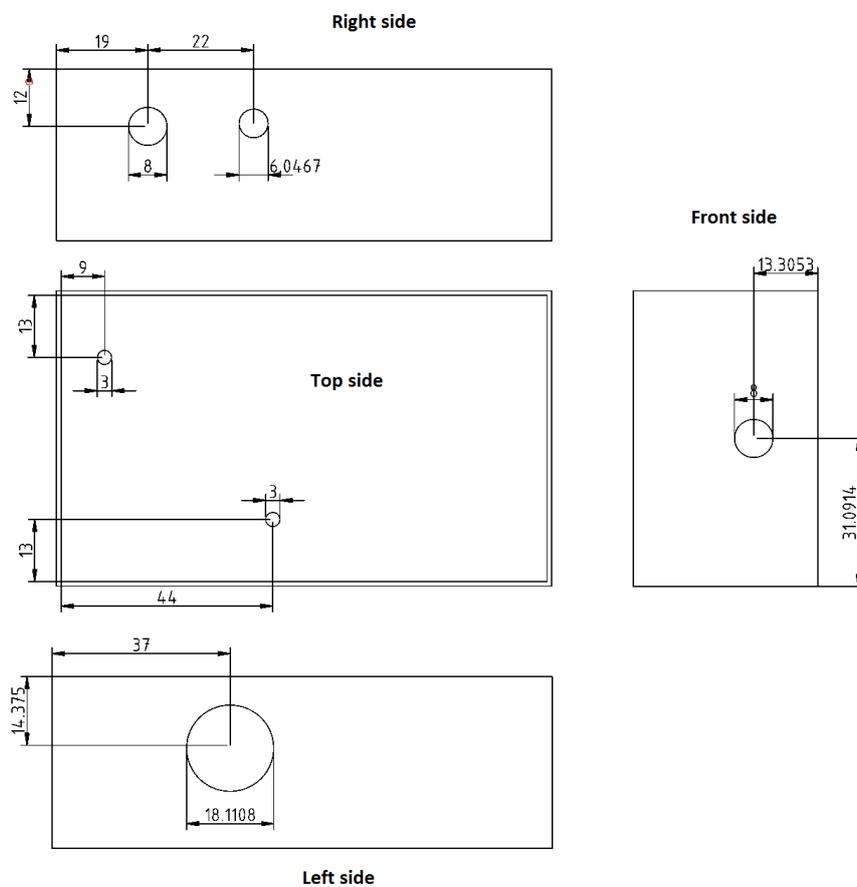


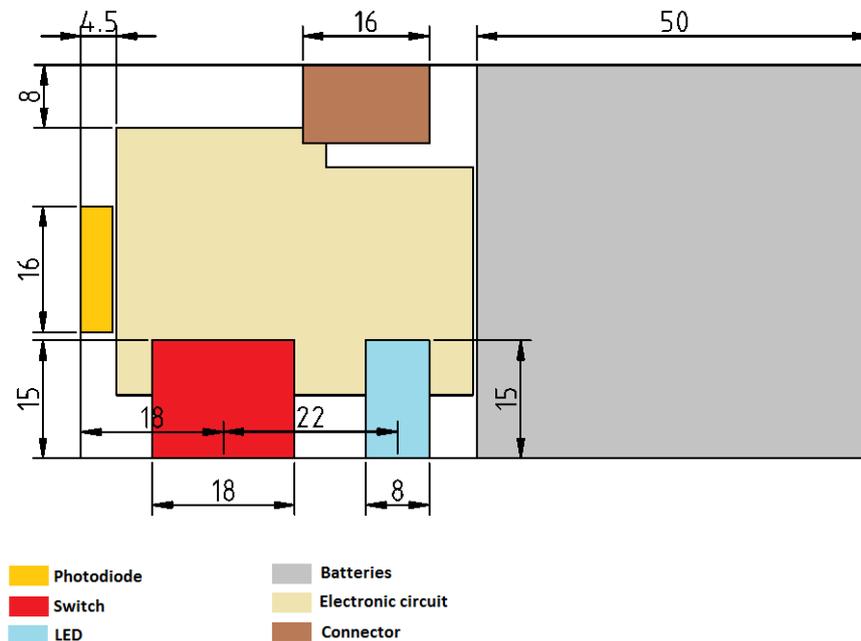
Figure 35 - Enceinte métallique percée

Figure 36 - Dessin technique des trous de forage (réalisé avec le logiciel QCAD)



Il a ensuite été nécessaire de dimensionner le volume occupé par chaque composant pour déterminer leur positionnement dans l'enceinte (figure 37).

Figure 37 – Schéma de la répartition de l'espace dans l'enceinte (réalisé avec les logiciels Paint et QCAD)



#### IV.2.1.2.3) Etape 3 : la conception du câble de connexion

Le câble de connexion est le support de la communication entre le dispositif et l'extérieur. Afin de préserver l'intégrité du blindage il est important d'utiliser un câble également blindé et de faire en sorte que les deux blindages soient reliés. De plus pour cette application nous devons pouvoir faire transiter par ce câble, l'alimentation du phototransistor, le signal de sortie du dispositif et une référence à la masse. Toutes ces contraintes ont été prises en compte dans la recherche de l'équipement.

La solution technologique retenue est un câble possédant trois fils de connexion et une tresse de blindage conditionnés dans une gaine en plastique. En parallèle la recherche d'un connecteur (figure 38, n°1) a également été effectuée, celui-ci est muni d'une connexion (figure 38, n°2) permettant de relier la tresse de blindage du câble à l'armature métallique de l'enceinte et d'une gaine de protection (figure 38, n°3).



Figure 38 - Câble et connecteur

## IV.2.1.2.4) Etape 4 : l'intégration

Au terme du développement, les éléments ont été intégrés dans l'enceinte pour former le dispositif final (figure 39).

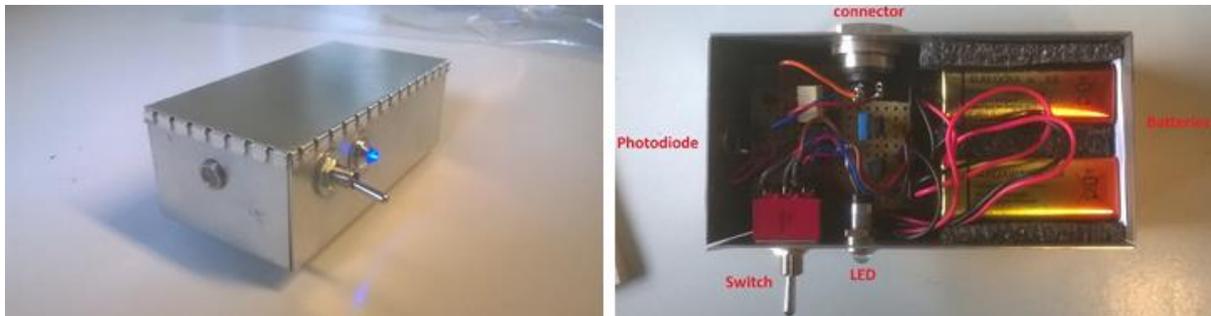


Figure 39 - Dispositif photosensible

## IV.2.2) Test du dispositif photosensible

Une fois le dispositif photosensible opérationnel, j'ai réitéré l'expérience de détection d'allumage pour vérifier son comportement. Les résultats des mesures de la tension délivrée par le dispositif sont équivalents à ceux obtenus lors de l'expérience de test du circuit de la photodiode seul (cf. IV.2.1.1). J'ai observé une atténuation du bruit généré par le déclenchement du système d'allumage (figure 40).

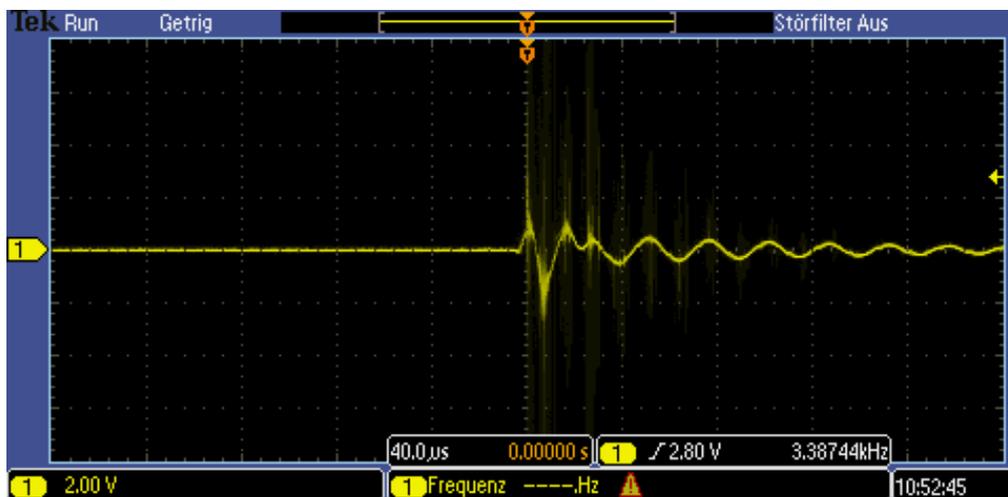


Figure 40 - Allure de la perturbation induite par le système d'allumage sur le signal de la photodiode (blindée)

Avec le blindage l'amplitude maximum de la perturbation sur la tension de sortie est maintenant d'environ 1 volt. On a donc divisé par deux l'amplitude par rapport à la perturbation mesurée précédemment sans blindage.

En conclusion, ce dispositif est une solution pratique et simple d'utilisation pour détecter l'allumage d'un plasma. Son enceinte blindée et ses dimensions réduites permettent de limiter les contraintes de positionnement dans un système expérimental.

## Conclusion

Le laboratoire ingénierie des surfaces par plasma dispose maintenant d'une bibliothèque de programmes LabVIEW permettant la communication avec la carte électronique et sa commande. Ces fichiers serviront lors de la réalisation de programmes d'instrumentation expérimentaux au sein du laboratoire et de l'école.

Les résultats obtenus lors des essais d'allumage des plasmas via le dispositif expérimental ont été utilisés à titre démonstratif sur la structure A.L.D de l'E.M.P.A. Ils ont été transposés du laboratoire de la B.F.H et réimplantés sur la structure déjà existante. Ils ont fonctionné dès le premier essai à très basse puissance et de manière répétitive.

Ils seront utilisés lors du développement de celui-ci, avec des perspectives industrielles. Le prototype de détecteur photosensible réalisé et utilisé lors du projet fournira des pistes de réflexion pour l'élaboration d'un système de détection de l'allumage du plasma.

Ce stage au sein de la Haute Ecole spécialisée Bernoise a été pour moi une expérience agréable et très enrichissante pour ma formation professionnelle autant que personnelle. Les nombreux échanges avec les personnels des différentes structures présentes au sein de l'école et les différents travaux réalisés m'ont permis d'élargir mes champs de connaissances et de compétences techniques pour mon futur diplôme d'ingénieur.

La localisation du stage en Suisse m'a également permis de découvrir de nouvelles cultures et d'expérimenter de nouveaux modes de vie et de pensée.

## Bibliographie et références

### Bibliographie

William H. Press ; Brian P. Flannery ; Saul A. Teukolsky ; William T. Vetterling. *Numerical recipes in pascal, the art of scientific computing*. Imprimé en 1989, Cambridge University press (US).

ISBN 0-521-37516-9

Thomas Nelis ; Richard Payling. *Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy: A practical Guide*. **Imprimé en 2003**, Athenaem Press Ltd, Gateshead, Tyne & Wear (UK). ISBN 0-85404-521-X

Christophe Cardinaud ; Grégory Marcos ; Richard Clergereaux ; Anne Bourdon. *Plasma et son environnement*. **Imprimé en 2012**, Reboul Imprimerie (France). ISBN 978-2-918701-09-5. p.194.

### Références

- [1] George Steven M. *Atomic Layer Deposition: An Overview*. **Publié le 30/11/2009**. p.111-112.
- [2] H. B. Profijt ; S. E. Potts ; M. C. M. van de Sanden ; W. M. M. Kessels. *Plasma-Assisted Atomic Layer Deposition: Basics, Opportunities, and Challenges*. **Publié le 18/08/2011**. p.1.
- [3] George Steven M. *Atomic Layer Deposition: An Overview*. **Publié le 30/11/2009**. p.112.  
  
H. B. Profijt ; S. E. Potts ; M. C. M. van de Sanden ; W. M. M. Kessels. *Plasma-Assisted Atomic Layer Deposition: Basics, Opportunities, and Challenges*. **Publié le 18/08/2011**. p.2.
- [4] George Steven M. *Atomic Layer Deposition: An Overview*. **Publié le 30/11/2009**. p.111.
- [5] Christophe Cardinaud ; Grégory Marcos ; Richard Clergereaux ; Anne Bourdon. *Plasma et son environnement*. **Imprimé en 2012**, Reboul Imprimerie (France). ISBN 978-2-918701-09-5. p.201-202.
- [6] Christophe Cardinaud ; Grégory Marcos ; Richard Clergereaux ; Anne Bourdon. *Plasma et son environnement*. **Imprimé en 2012**, Reboul Imprimerie (France). ISBN 978-2-918701-09-5. p.194.
- [7] William H. Press ; Brian P. Flannery ; Saul A. Teukolsky ; William T. Vetterling. *Numerical recipes in pascal, the art of scientific computing*. Imprimé en 1989, Cambridge University press (US). ISBN 0-521-37516-9. p.553.

## Table des illustrations

Figure 1 - Cycle A.L.D étape A. Wikipédia. Atomic Layer Deposition. <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_layer_deposition">https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_layer_deposition</a> .....	4
Figure 2 - Cycle A.L.D étape B et C. Wikipédia. Atomic Layer Deposition. <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_layer_deposition">https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_layer_deposition</a> .....	5
Figure 3 - Cycle A.L.D étape D. Wikipédia. Atomic Layer Deposition. <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_layer_deposition">https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_layer_deposition</a> .....	5
Figure 4 - Schéma du dispositif A.L.D. (réalisé avec le logiciel Paint) et photographie du système présent à L'E.M.P.A.....	6
Figure 5 - Plasma d'argon allumé.....	7
Figure 6 - Surfatron (image numérique) .....	8
Figure 7 - Plasma d'argon (puissance microonde 19W ; débit gazeux 0.012 sccm) .....	8
Figure 8 - Plasma d'argon (puissance microonde 70W ; débit gazeux 0.012 sccm) .....	8
Figure 9 - Schéma de principe du dispositif d'allumage (réalisé avec le logiciel Paint).....	9
Figure 10 - Réponse info 0 0 (capture d'écran du logiciel LabVIEW).....	12
Figure 11 - Indication des canaux activés (capture d'écran du logiciel LabVIEW).....	12
Figure 12 - Indication des valeurs de tension (capture d'écran du logiciel LabVIEW).....	12
Figure 13 - Diagramme des flux du programme <b>write.vi</b> (réalisé avec le logiciel Dia) .....	14
Figure 14 - Diagramme des flux du programme <b>read.vi</b> (réalisé avec le logiciel Dia) .....	14
Figure 15 - Diagramme des flux du programme <b>info 0 0</b> (réalisé avec le logiciel Dia) .....	15
Figure 16 - Diagramme des flux principal du programme <b>setp.vi</b> (réalisé avec le logiciel Dia).....	16
Figure 17 - Diagramme des flux du processus <b>setp.vi cas output</b> (réalisé avec le logiciel Dia) .....	17
Figure 18 - Diagramme des flux du processus <b>setp.vi cas input</b> (réalisé avec le logiciel Dia) .....	18
Figure 19 - Capture d'écran de la face avant du programme <b>Com with board</b> réalisé avec le logiciel LabVIEW.....	19
Figure 20 – Schéma explicatif du traitement du signal par les entrées de la DAQ-carte (réalisé avec le logiciel Paint).....	20
Figure 21 - Capture d'écran de la face avant du programme <b>AO Correction.vi</b> réalisé avec le logiciel LabVIEW.....	22

Figure 22 - Captures d'écran du diagramme du programme <b>AO Correction.vi</b> réalisé avec le logiciel LabVIEW .....	22
Figure 23 - Capture d'écran de la face avant du programme <b>AI Correction.vi</b> réalisé avec le logiciel LabVIEW .....	23
Figure 24 - Captures d'écran du diagramme du programme <b>AI Correction.vi</b> réalisé avec le logiciel LabVIEW .....	23
Figure 25 – Histogramme des résultats des essais d'allumage avec plasma Ar et O <sub>2</sub> (réalisé avec le logiciel Excel).....	25
Figure 26 – Lumière visible émise par un plasma d'argon allumé.....	26
Figure 27 - Lumière visible émise par un plasma de dioxygène allumé .....	26
Figure 28 – Schéma du circuit de la photodiode .....	27
Figure 29 – Positionnement de la photodiode lors de l'expérience .....	27
Figure 30 - Allure de la perturbation induite par le système d'allumage sur le signal de la photodiode (non blindée).....	28
Figure 31 – Schéma de l'étage d'amplification (réalisé avec le logiciel Paint) .....	29
Figure 32 – Schéma de l'étage de sortie (réalisé avec le logiciel Paint) .....	29
Figure 33 – Schéma de l'étage d'alimentation (réalisé avec le logiciel Paint).....	30
Figure 34 - Circuit électronique intégré .....	30
Figure 35 - Enceinte métallique percée .....	31
Figure 36 - Dessin technique des trous de forage (réalisé avec le logiciel QCAD).....	31
Figure 37 – Schéma de la répartition de l'espace dans l'enceinte (réalisé avec les logiciels Paint et QCAD).....	32
Figure 38 - Câble et connecteur.....	32
Figure 39 - Dispositif photosensible.....	33
Figure 40 - Allure de la perturbation induite par le système d'allumage sur le signal de la photodiode (blindée).....	33



# ANNEXES

## Annexe 1 : Spécifications de la DAQ-carte

Informations extraites du document *Produktblatt\_DAQ-Card.docx* réalisé par les étudiants du laboratoire de microélectronique de la Haute Ecole Spécialisée Bernoise. Traduit de l'allemand et mis en page par Benoit Altasserre.



### DAQ-Card

#### Caractéristiques techniques

##### 10x Entrées analogiques

- Gamme de tension d'entrée de 0V à +10V (extensible)
- Protection des entrées pour des valeurs de tensions comprises entre -20V et +20V
- Taux d'échantillonnage 10Kech /s par canal

##### 5x Sorties analogiques

- Cinq sorties analogiques
  - 1x du microcontrôleur
  - 4x via les DAC modules
- Gamme de tension de sortie de 0V à +10V
- Courant de sortie maximum 40mA par canal (combiné max. 100mA)
- Taux d'échantillonnage 10Kech /s par canal

##### 12x Entrées/Sorties numériques

- 12 Connexions numériques librement configurable
- 3.3V logique
- Fonctionnalité modulation de largeur d'impulsion (PWM)
- Interface RS232

##### Alimentation et communication

- Alimentation via USB, USB mini connecteur, consommation <500mA
  - Aucune alimentation extérieure n'est requise
- Communication
  - Optionnelle sur FTDI (RS232) ou sur USB natif du STM microcontrôleur

##### Mémoire

- Microcontrôleur STM32F302RBT6
  - 128KB Flash
  - 24KB RAM
  - Pas d'EEPROM
- Modules RAM
  - 4x 1Mbit
  - Total 512Kbyte
  - Communication avec le microcontrôleur via 2x SPI

##### Interface d'extension

- Tête SWD, débogage/ programmation
- Triple alimentation (12V, 5V, 3.3V)
- Sorties PWM
- Connecteur pour carte d'extension

## Annexe 2 : Sous VI *write.vi*

### Description

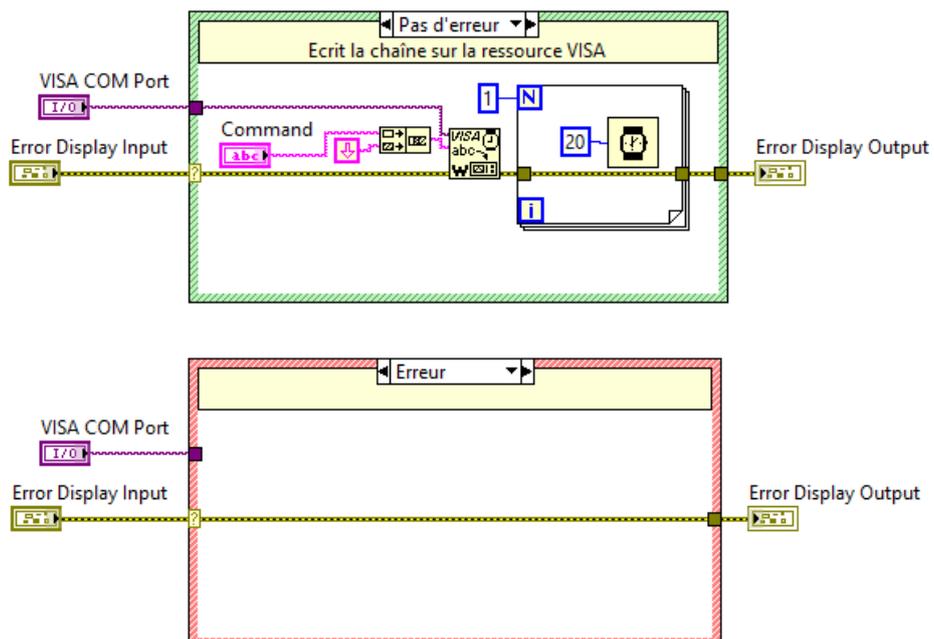
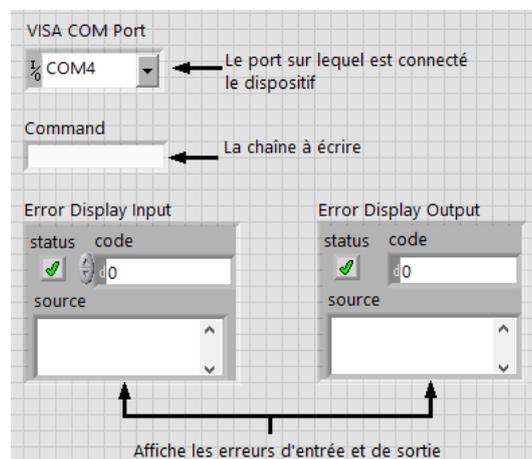
Ce programme met en forme et écrit une chaîne de caractères (fournie en entrée) sur le port de communication VISA.

### Dépendances

Fonctions LabVIEW *VISA write* et *Concatenate strings*.

ENTRÉES	SORTIES
Ressource VISA Chaîne à écrire Erreur d'entrée	Erreur de sortie

### Captures d'écran LabVIEW (Face avant et Diagramme)



### Annexe 3 : Sous VI *read.vi*

#### Description

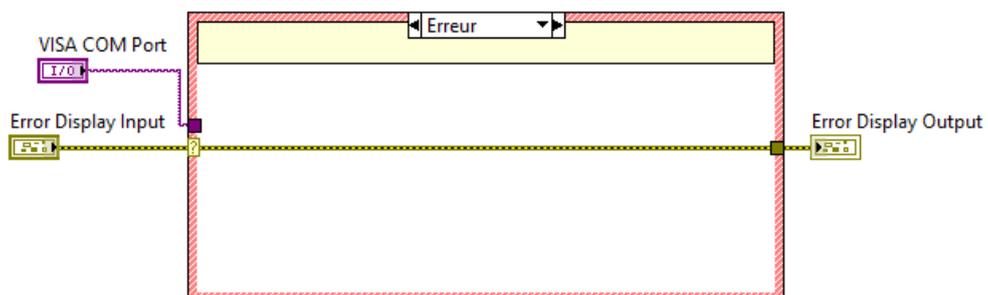
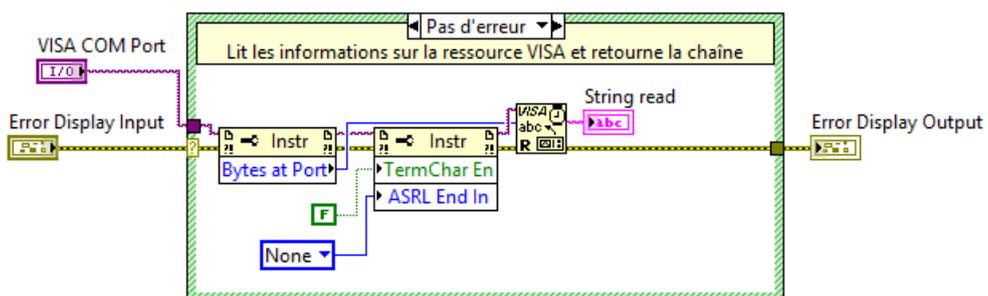
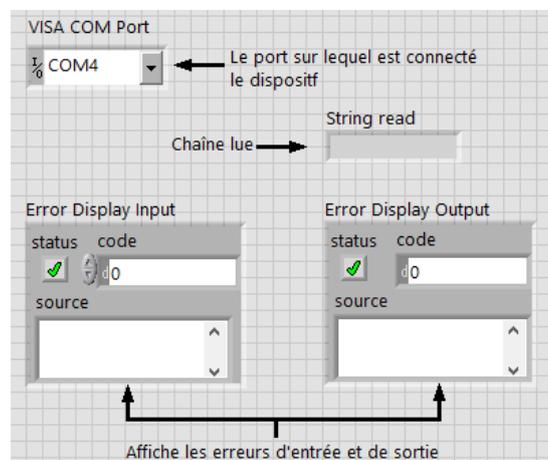
Ce programme lit les informations présentes sur le port de communication VISA et les renvoie sous la forme d'une chaîne de caractères.

#### Dépendances

Fonction LabVIEW *VISA read*.

ENTRÉES	SORTIES
Ressource VISA Erreur d'entrée	Chaîne lue Erreur de sortie

#### Captures d'écran LabVIEW (Face avant et Diagramme)



## Annexe 4 : Sous VI *info 0 0.vi*

### Description

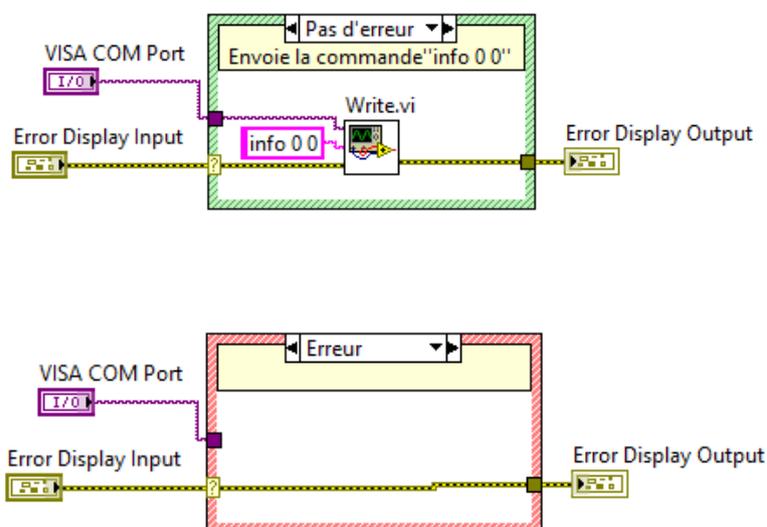
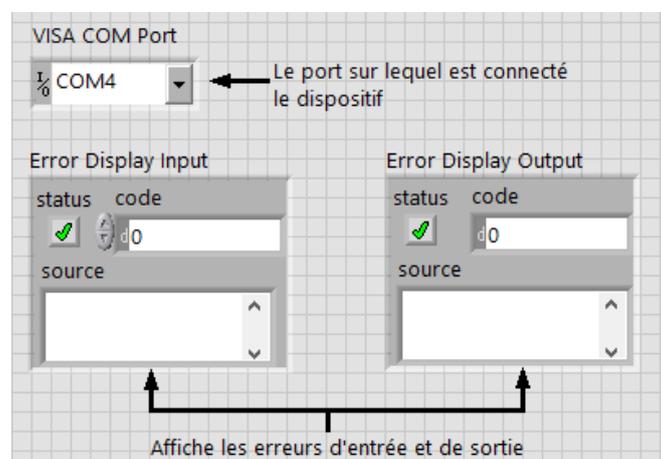
Ce programme envoie la commande « info 0 0 » à la DAQ-carte.

### Dépendances

Sous VI *write.vi*.

ENTRÉES	SORTIES
Ressource VISA Erreur d'entrée	Erreur de sortie

### Captures d'écran LabVIEW (Face avant et Diagramme)



## Annexe 5 : Sous VI *data 0 0.vi*

### Description

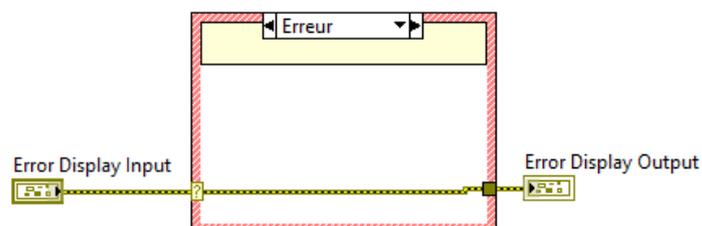
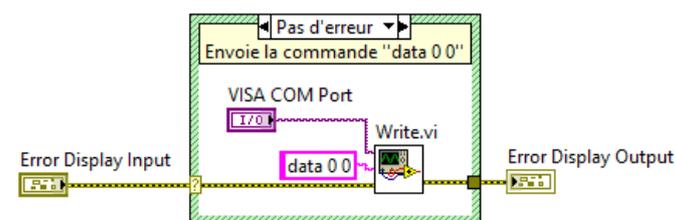
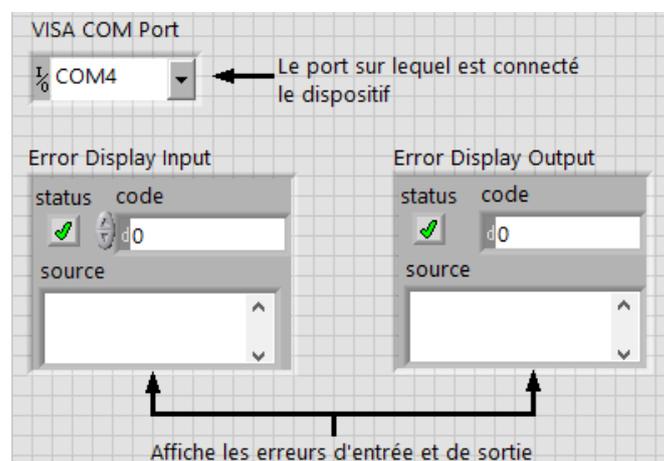
Ce programme envoie la commande « data 0 0 » à la DAQ-carte.

### Dépendances

Sous VI *write.vi*.

ENTRÉES	SORTIES
Ressource VISA Erreur d'entrée	Erreur de sortie

### Captures d'écran LabVIEW (Face avant et Diagramme)



## Annexe 6 : Sous VI *escp 0 0.vi*

### Description

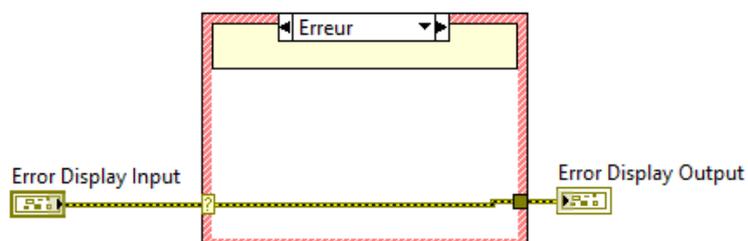
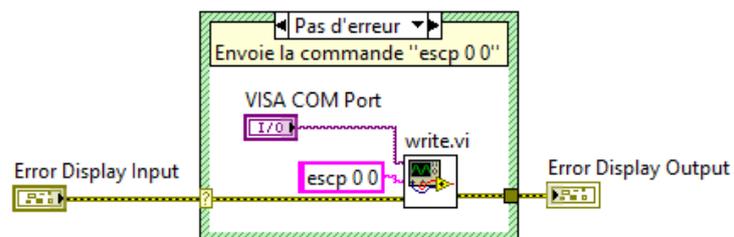
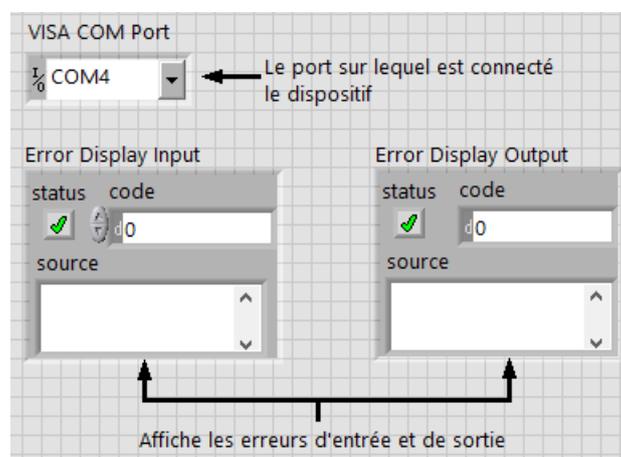
Ce programme envoie la commande « escp 0 0 » à la DAQ-carte.

### Dépendances

Sous VI *write.vi*.

ENTRÉES	SORTIES
Ressource VISA Erreur d'entrée	Erreur de sortie

### Captures d'écran LabVIEW (Face avant et Diagramme)



## Annexe 7.1 : Sous VI *setp.vi*

### Description

Ce programme crée la commande pour configurer un canal sur la DAQ-carte

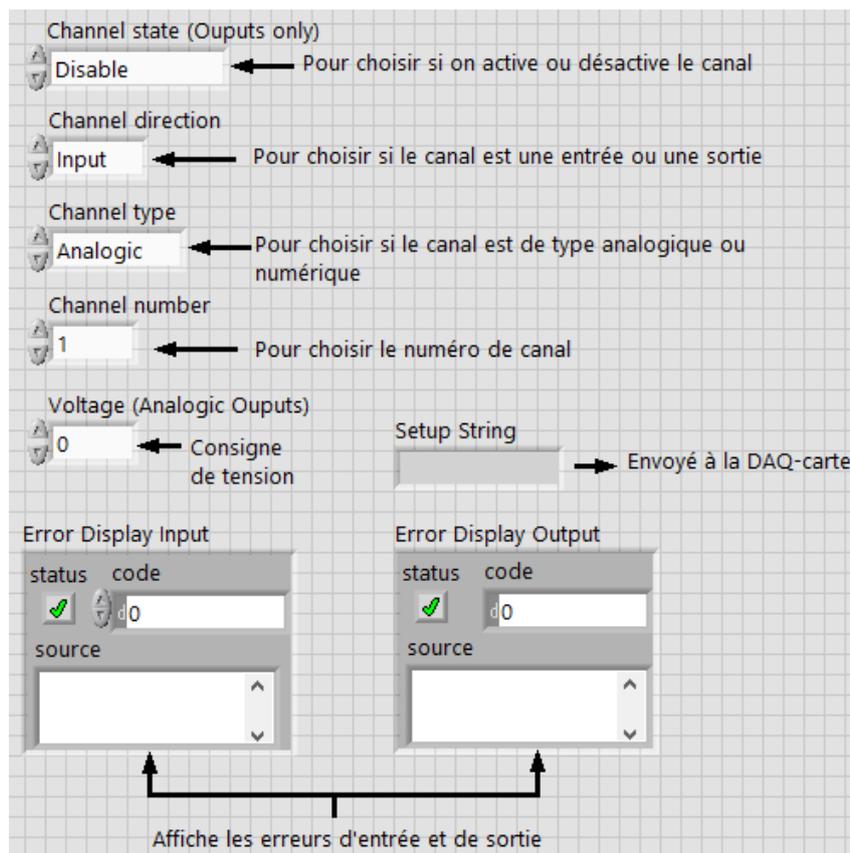
### Dépendances

Fonctions LabVIEW *number to decimal string*, *string length* and *concatenate strings*.

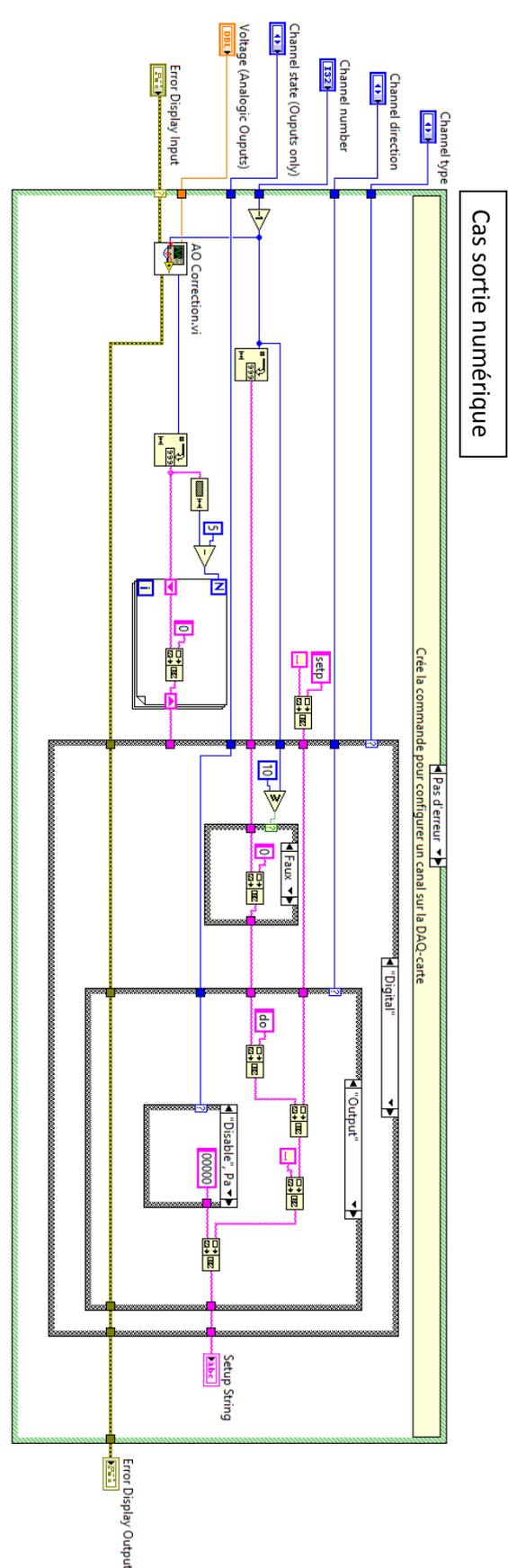
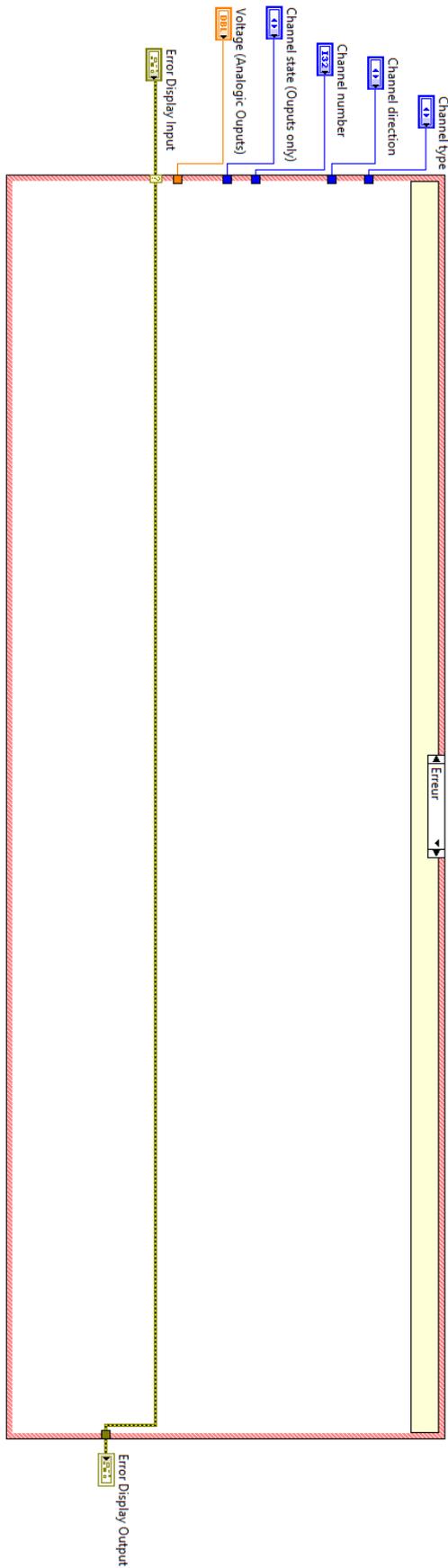
Sous VI *AO Correction.vi*.

ENTRÉES	SORTIES
Ressource VISA <i>Channel state</i> (activé ou désactivé) <i>Channel number</i> (numéro du canal) <i>Channel direction</i> (entrée ou sortie) <i>Voltage setpoint</i> (consigne de tension) Erreur d'entrée	Erreur d'entrée Setup string (chaîne construite)

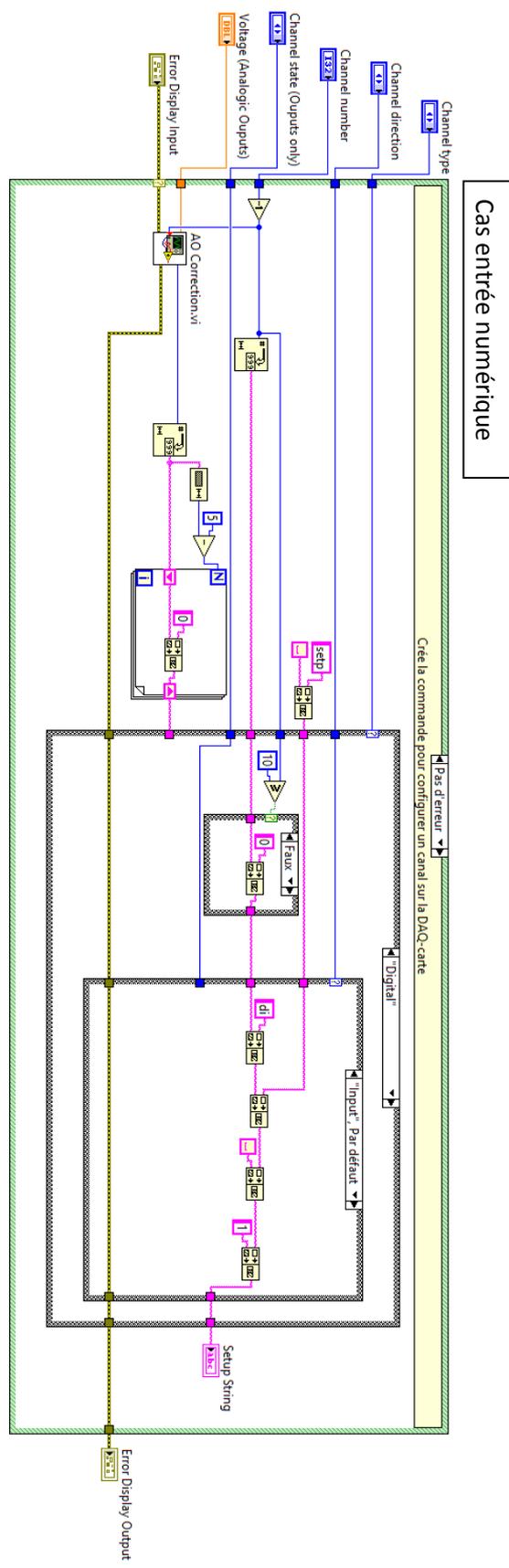
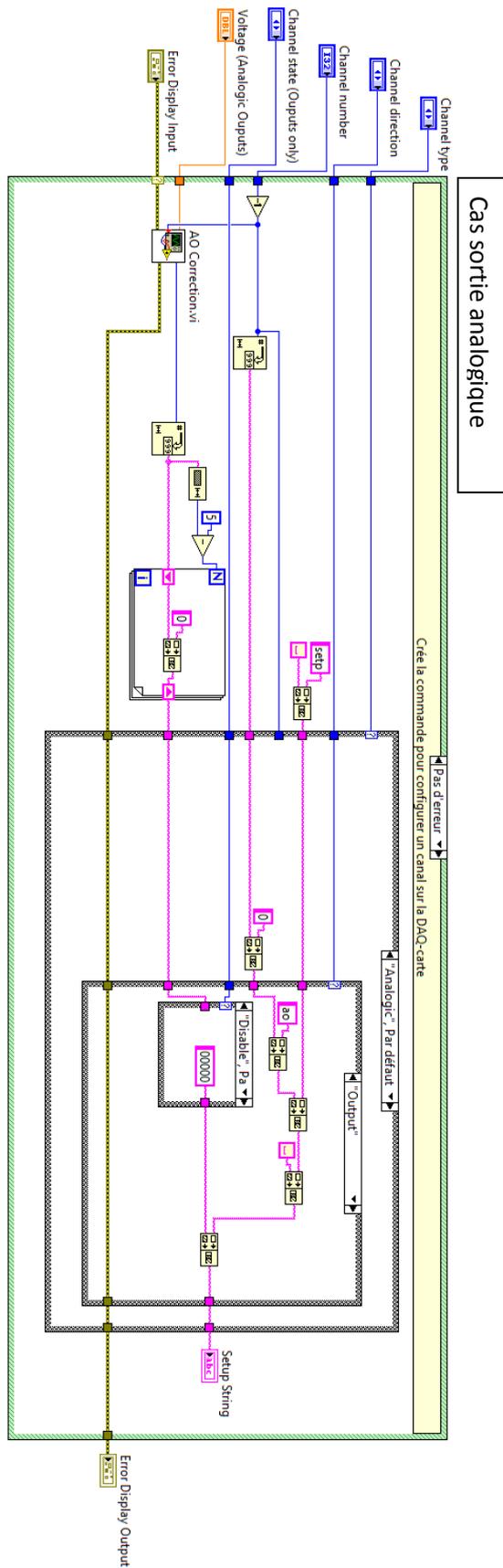
### Captures d'écran LabVIEW (Face avant et Diagramme)



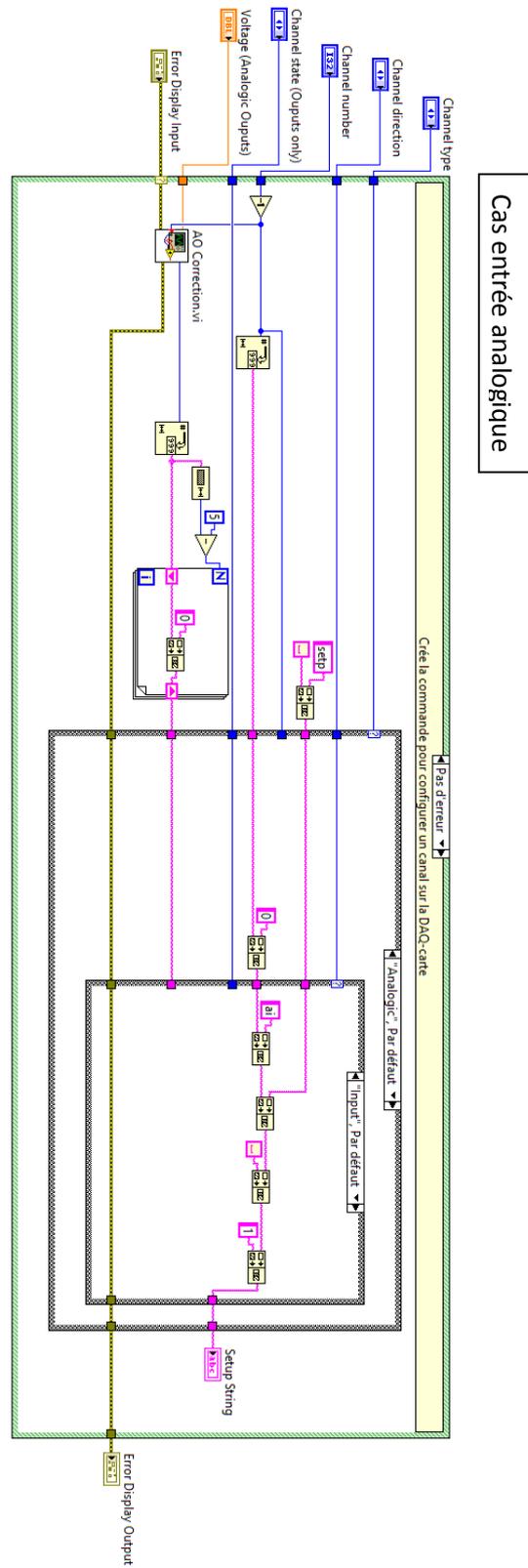
Annexe 7.2 : Sous VI *setp.vi*



Annexe 7.3 : Sous VI *setp.vi*



Annexe 7.4 : Sous VI setp.vi



## Annexe 8.1 : Programme *Com with board.vi*

### Description

Programme de contrôle qui peut exécuter à la demande n'importe quelle commande sur la DAQ-carte.

### Dépendances

Fonction LabVIEW *concatenate strings*.

Sous VIs *info 0 0.vi* ; *escp 0 0.vi* ; *data 0 0.vi* ; *read.vi* ; *setp.vi*.

ENTRÉES	SORTIES
Ressource VISA Tableau des canaux d'entrée analogiques à activer Cluster des canaux de sortie analogiques à activer avec leur consigne de tension Cluster des canaux numériques à activer Valeurs booléennes des boutons <i>Data</i> , <i>Escap</i> , <i>Setp</i> et <i>Setp ALL</i> Valeurs booléennes des boutons <i>STOP</i> et <i>Clear History</i>	Erreur de sortie Chaîne <i>History display</i> Booléen <i>Heartbeat</i>

### Manuel d'utilisateur

Entrez la ressource VISA.

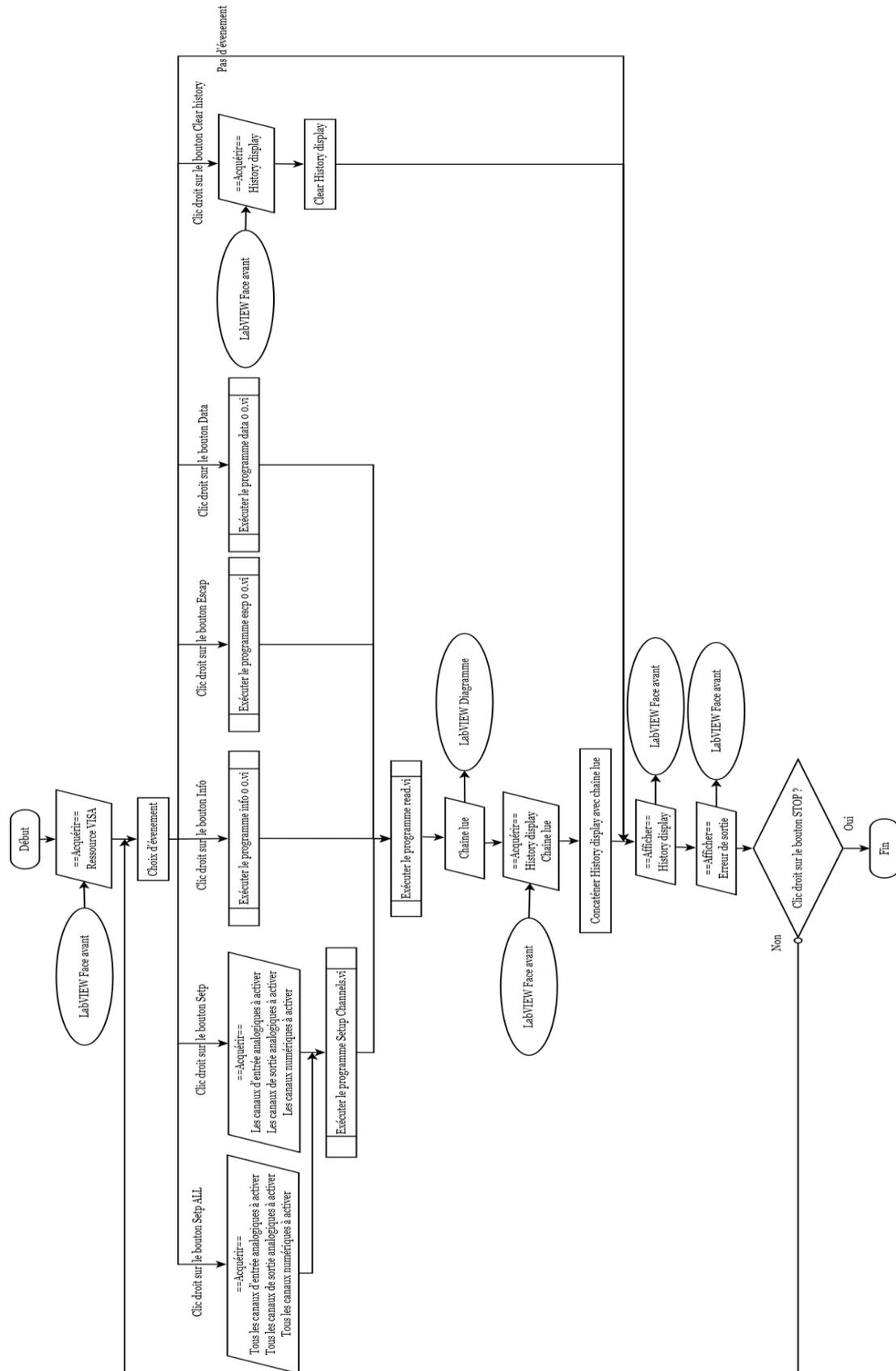
Démarrez le programme.

- Pour envoyer les commandes « data 0 0 », « escp 0 0 » et « info 0 0 » :
  - o Clic droit sur le bouton portant le nom de la commande.
  - o
- Pour activer un canal de sortie analogique :
  - o Clic droit sur la commande booléenne (les numéros de canaux sont dans l'ordre).
  - o Spécifiez la consigne de tension dans la commande numérique.
  - o Clic droit sur le bouton *Setp*.
- Pour activer un canal d'entrée analogique :
  - o Clic droit sur la commande booléenne.
  - o Clic droit sur le bouton *Setp*.
- Pour activer un canal numérique :
  - o Clic droit sur la commande booléenne.
  - o Choisissez le type de canal (entrée ou sortie) en cliquant droit sur le bouton de type.
  - o Clic droit sur le bouton *Setp*.
- Pour activer tous les canaux (numériques et analogiques) en type entrée :
  - o Clic droit sur le bouton *Setp ALL*

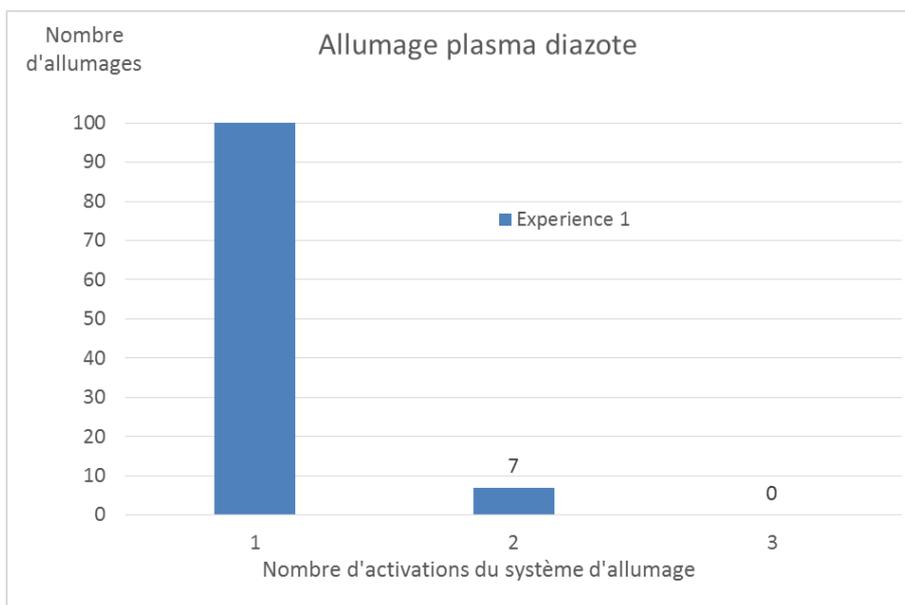
Vous pouvez également spécifiez tous les canaux à activer puis appuyer sur le bouton *Setp*.

- Pour effacer l'historique :
  - o Clic droit sur le bouton *Clear History*.
- Pour arrêter le programme :
  - o Clic droit sur le bouton *STOP*.

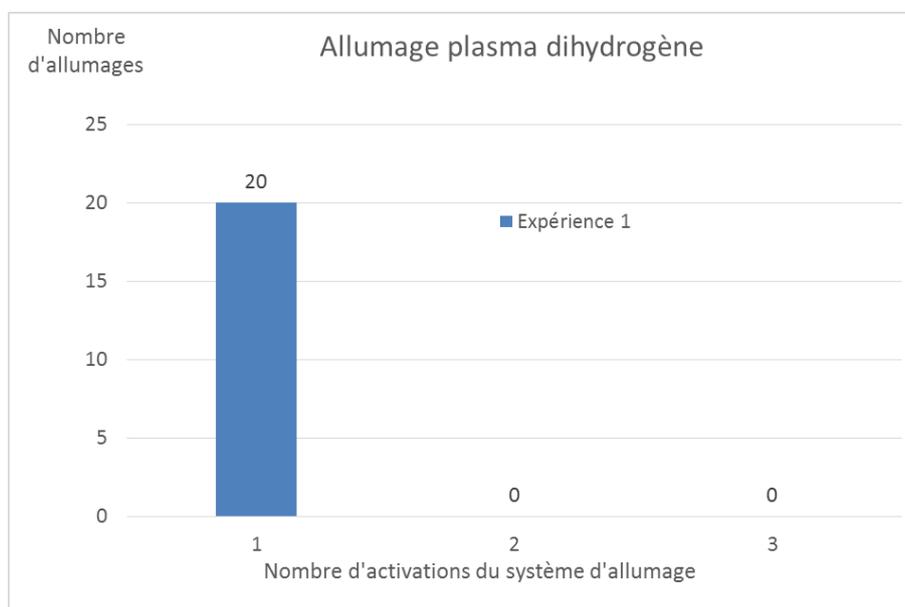
Annexe 8.2 : Programme Com with board.vi, diagramme des flux



## Annexe 9 : Résultats des essais d'allumages



	Puissance microonde (watts)	Pression (mbar)	Flux gazeux (sccm)	Nombre d'allumages	Nombre d'essais maximum
Expérience 1	10	3,8	(N <sub>2</sub> ) 0,513	110	3



	Puissance microonde (watts)	Pression (mbar)	Flux gazeux (sccm)	Nombre d'allumages	Nombre d'essais maximum
Expérience 1	10	3,8	(N <sub>2</sub> ) 0,513	110	3

## Annexe 10.1 : Spécifications Photodiode S2386 page 1



## Si photodiodes

### S2386 series

### For visible to near IR, general-purpose photometry

#### Features

- High sensitivity in visible to near infrared range
- Low dark current
- High reliability
- Superior linearity

#### Applications

- Analytical instruments
- Optical measurement equipment

#### Structure / Absolute maximum ratings

Type no.	Dimensional outline/ Window material*	Package	Photosensitive area size (mm)	Absolute maximum ratings		
				Reverse voltage V <sub>r</sub> max (V)	Operating temperature T <sub>opr</sub> (°C)	Storage temperature T <sub>stg</sub> (°C)
S2386-18K	(1)/K	TO-18	1.1 × 1.1	30	-40 to +100	-55 to +125
S2386-18L	(2)/L					
S2386-5K	(3)/K	TO-5	2.4 × 2.4			
S2386-44K	(4)/K		3.6 × 3.6			
S2386-45K	(5)/K		3.9 × 4.6			
S2386-8K	(6)/K	TO-8	5.8 × 5.8			

Note: Exceeding the absolute maximum ratings even momentarily may cause a drop in product quality. Always be sure to use the product within the absolute maximum ratings.  
\* Window material K=borosilicate glass, L=lens type borosilicate glass

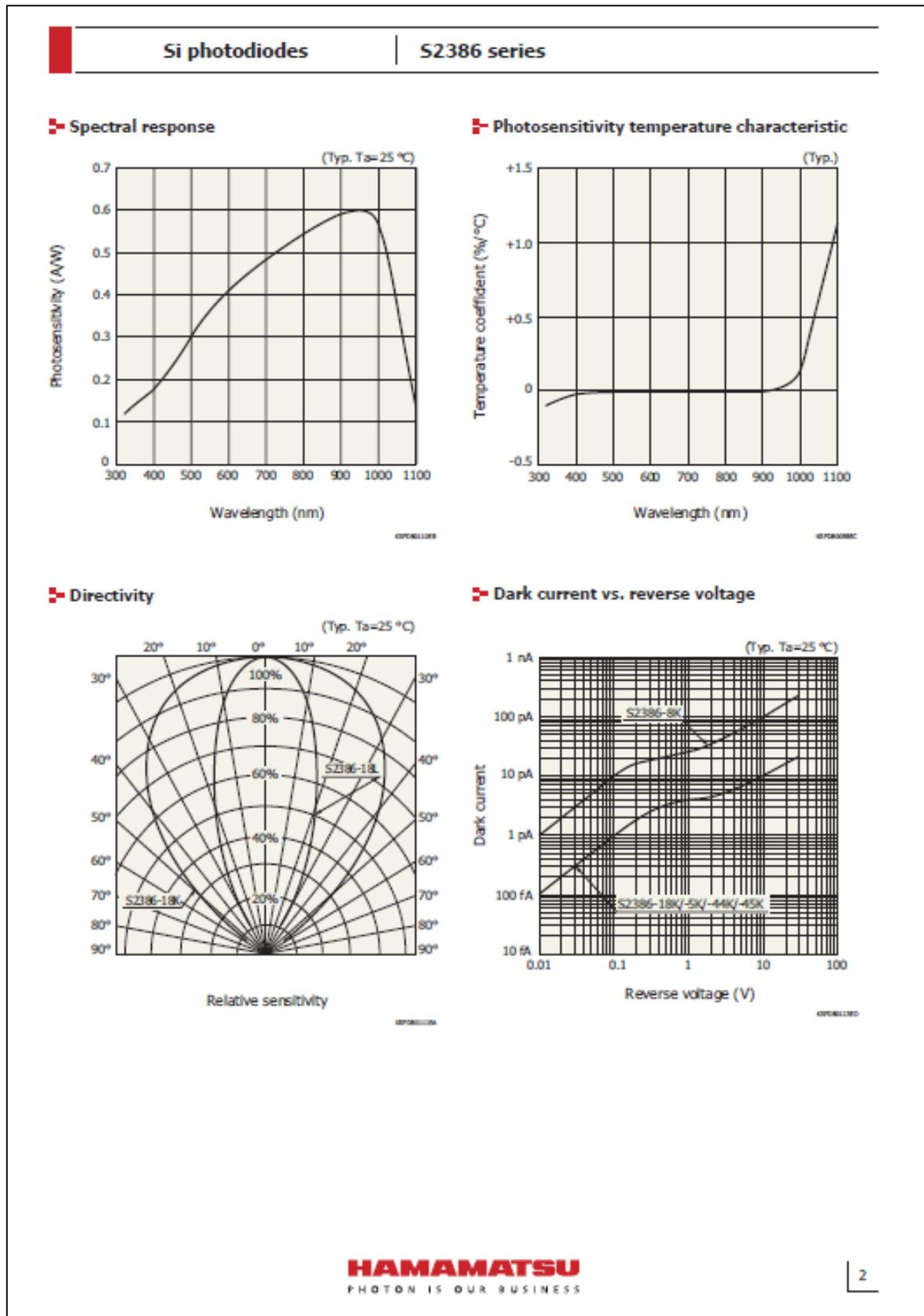
#### Electrical and optical characteristics (Typ. T<sub>a</sub>=25 °C, unless otherwise noted)

Type no.	Spectral response range λ (nm)	Peak sensitivity wavelength λ <sub>p</sub> (nm)	Photosensitivity S (A/W)				Short circuit current I <sub>sc</sub> 100 μs	Dark current I <sub>d</sub> V <sub>r</sub> =10 mV max.	Temp. coefficient of I <sub>d</sub> T <sub>CD</sub>	Rise time t <sub>r</sub> V <sub>r</sub> =0 V R <sub>L</sub> =1 kΩ	Terminal capacitance C <sub>t</sub> V <sub>r</sub> =0 V f=10 kHz	Shunt resistance R <sub>sh</sub> V <sub>r</sub> =10 mV		Noise equivalent power NEP V <sub>r</sub> =0 V λ=λ <sub>p</sub>				
			λ <sub>p</sub>	GaP LED 560 nm	He-Ne laser 633 nm	GaAs LED 930 nm						Min. (μA)	Typ. (μA)		Min. (GΩ)	Typ. (GΩ)		
S2386-18K	320 to 1100	960	0.6	0.38	0.43	0.59	1	1.3	2	1.12	0.4	140	5	100	6.8 × 10 <sup>-16</sup>			
S2386-18L																4	5.7	
S2386-5K																4.4	6.0	5
S2386-44K																9.6	12	20
S2386-45K																12	17	30
S2386-8K																26	33	50

www.hamamatsu.com

1

Annexe 10.2 : Spécifications Photodiode S2386 page 2



Annexe 10.3 : Spécifications Photodiode S2386 page 3

Si photodiodes | S2386 series

**(1) S2386-18K**

**(2) S2386-18L**

Photoreactive area: 1.1 x 1.1

Distance from photoreactive area center to cap center:  $-0.35GS \pm 0.3$   
 $-0.35YS \pm 0.3$

The glass window may extend a maximum of 0.2 mm above the upper surface of the cap.

Active area: 1.1 x 1.1

Distance from photoreactive area center to cap center:  $-0.35GS \pm 0.3$   
 $-0.35YS \pm 0.3$

The glass window may extend a maximum of 0.2 mm above the upper surface of the cap.

**(3) S2386-5K**

**(4) S2386-44K**

Photoreactive area: 2.4 x 2.4

Distance from photoreactive area center to cap center:  $-0.35GS \pm 0.3$   
 $-0.35YS \pm 0.3$

The glass window may extend a maximum of 0.2 mm above the upper surface of the cap.

Photoreactive area: 3.6 x 3.6

Distance from photoreactive area center to cap center:  $-0.65GS \pm 0.0$   
 $-0.35YS \pm 0.3$

The glass window may extend a maximum of 0.2 mm above the upper surface of the cap.

**HAMAMATSU**  
PHOTON IS OUR BUSINESS

3

Annexe 10.4 : Spécifications Photodiode S2386 page 4

**Si photodiodes**
**S2386 series**

(5) S2386-45K

(6) S2386-8K

Information described in this material is current as of November, 2013.  
 Product specifications are subject to change without prior notice due to improvements or other reasons. This document has been carefully prepared and the information contained is believed to be accurate. In rare cases, however, there may be inaccuracies such as text errors. Before using these products, always contact us for the delivery specification sheet to check the latest specifications.

The product warranty is valid for one year after delivery and is limited to product repair or replacement for defects discovered and reported to us within that one year period. However, even if within the warranty period we accept absolutely no liability for any loss caused by natural disasters or improper product use.  
 Copying or reprinting the contents described in this material in whole or in part is prohibited without our prior permission.

HAMAMATSU

www.hamamatsu.com

HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Solid State Division  
 1126-1 Ichino-cho, Higashi-ku, Hamamatsu City, 435-8558 Japan, Telephone: (81) 53-434-3311, Fax: (81) 53-434-5184  
 U.S.A.: Hamamatsu Corporation, 300 Booth Road, P.O.Box 6910, Bridgewater, N.J. 08807-0910, U.S.A., Telephone: (1) 908-231-0960, Fax: (1) 908-231-1318  
 Germany: Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH, A-23870, D-42111 Hamching am Ammersee, Germany, Telephone: (49) 852-375-0, Fax: (49) 852-385-8  
 France: Hamamatsu Photonics France S.A.R.L.: 19, Rue du Moulin de Houx, 91882 Houx Cedex, France, Telephone: 33-(1) 69 53 71 00, Fax: 33-(1) 69 53 71 10  
 United Kingdom: Hamamatsu Photonics UK Limited, 2 Howard Court, 10 Twin Road, Welwyn Garden City, Hertfordshire AL7 1JW United Kingdom, Telephone: (44) 1707-254888, Fax: (44) 1707-252777  
 North Europe: Hamamatsu Photonics Norden AB, Thors Hamngatan 25, 16460 Kista, Sweden, Telephone: (46) 8405-21-40, Fax: (46) 8405-421-42  
 Italy: Hamamatsu Photonics Italia S.R.L.: Strada della Noia, 1 Int. 6, 20020 Anave (Milano), Italy, Telephone: (39) 02-435-8-733, Fax: (39) 02-435-81-761  
 China: Hamamatsu Photonics (China) Co., Ltd.: 1208 Tower B, Jining Center, No.27 Dongjiahuan Dajie, Chaoyang District, Beijing 100020, China, Telephone: (86) 10-6286-6006, Fax: (86) 10-6286-2886

Cat. No. KSPD1035807 Nov. 2013 DN 4

## Annexe 11 : Dispositif photo détecteur, liste des pièces et commande

Composant	Référence
Régulateurs de tension	LM78L05A ; LM79L05A
Capacités	33K63 (x2) ; 1K63 (x2)
Résistors	620k ; 30k (x2) ; 1k ; 1.5k ; 10k
Diodes	1N4148 (x2)
Amplificateur	TLC272 PW package
Batteries	6LF22 9V (x2)
Photodiode	S2386 – 44k
Phototransistor	CNY74-2H
LED	LED blue 5 mm, WU-ASB5 254735
Interrupteur	Toggle switch on-on 3 P, 1A31-NF1STSE, Eledis
Batterie clip	Battery clip type I for 9V battery (x2)

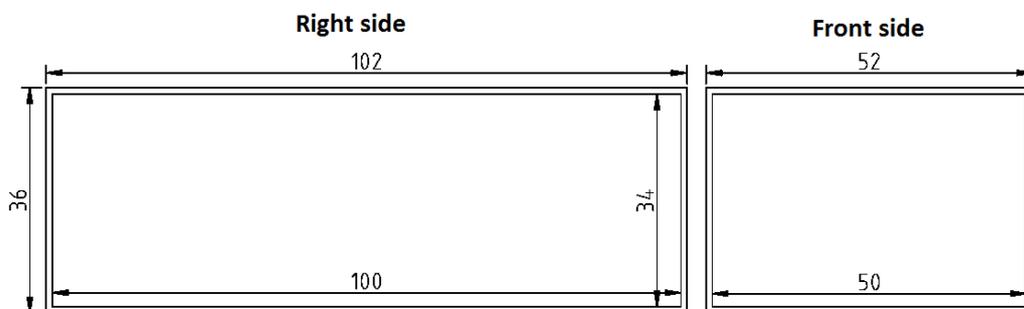
Composant	N° article	Site ou fabricant	Quantité	Prix par unité (CHF)
Régulateur de tension	512-LM78L05ACZ	Mouser	1	0.423
Régulateur de tension	512-LM79L05ACZ	Mouser	1	0.492
Résistor	603-MFR-25FTE52-620K	Mouser	1	0.118
Résistor	594-5063JD30K00F	Mouser	2	0.127
Résistor	594-MBB02070C1001FC1	Mouser	1	0.098
Résistor	594-MBB02070C1501FCT	Mouser	1	0.108
Résistor	594-MBB02070C1002FRP	Mouser	1	0.098
Diode	512-1N4148	Mouser	2	0.098
Batterie	658-6LF22XWA/C	Mouser	2	2.25
Phototransistor	782-CNY74-2H	Mouser	1	0.994
Capacité	871-B32529C104K189	Mouser	2	0.269
Capacité	80-MMK5333K63J01TR18	Mouser	2	0.404
Photodiode	S2386-44K	Hamamatsu	1	12
LED	254735	Distrelec	1	4.85
Interrupteur	200644	Distrelec	1	3.85
Batterie clip	650514 - 62	Conrad	2	0.65

Prix Total : 30.63 CHF

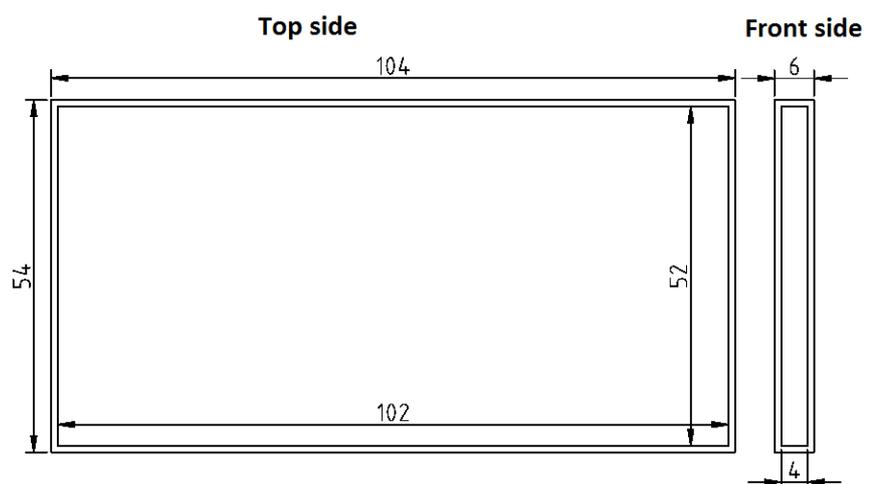
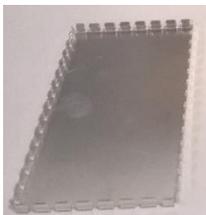
## Annexe 12.1 : Dispositif photo détecteur, dessins techniques

Dans les pages qui suivent «Front side » désigne le côté où se situe la photodiode et les distances sont exprimées en millimètres. Les dessins techniques ont été réalisés avec le logiciel QCAD.

### Enceinte métallique

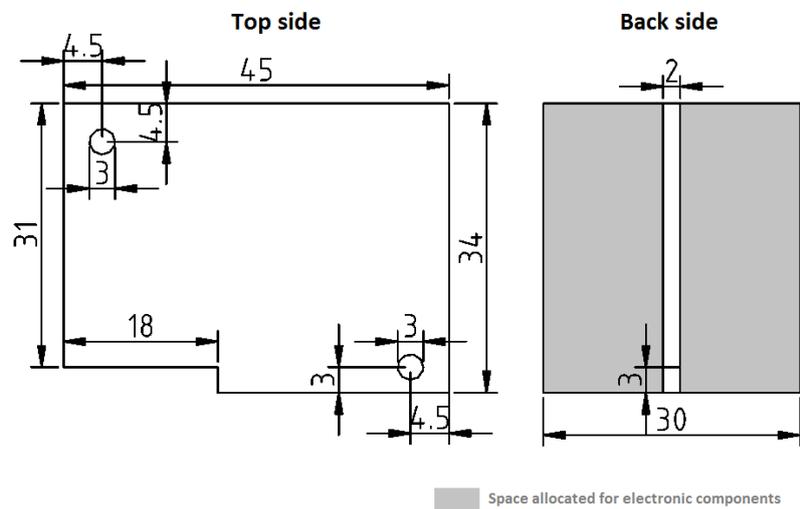
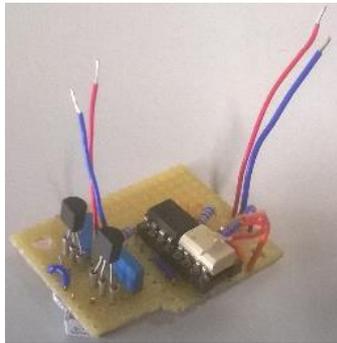


### Couvercle métallique



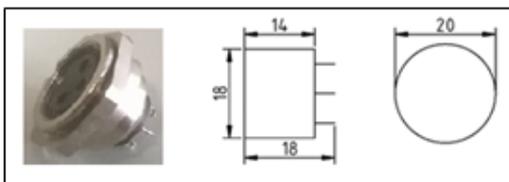
Annexe 12.2 : Dispositif photo détecteur, dessins techniques

Circuit électronique

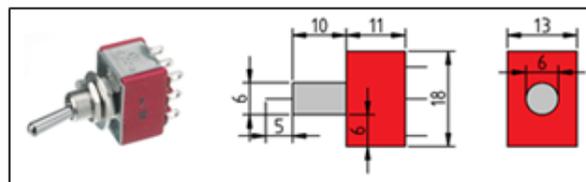


Autres composants

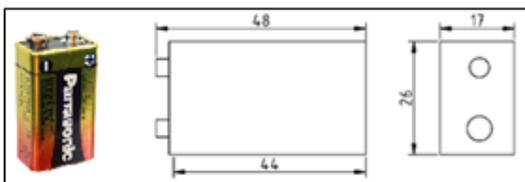
Connecteur



Interrupteur



Batterie



LED

