

Université d'Antananarivo  
Faculté des Sciences d'Antananarivo  
Département de Physique  
THESE Présentée A LA FACULTE DES SCIENCES D'ANTANANARIVO Pour l'obtention du titre de  
Docteur de Troisième Cycle  
En PHYSIQUE NUCLEAIRE, PHYSIQUE THEORIQUE ET PHYSIQUE APPLIQUEE  
Par  
**KALL Briant**

# Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINES DE SPECTROMETRIE X

Soutenue à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo Le 14 décembre  
2004 devant la commission d'examen  
Rapporteur : **M. RAMBOLAMANANA Gérard** Professeur à la Faculté des  
Sciences de l'Université d'Antananarivo  
Edité par Madagascar – I.N.S.T.N

Président : M. RAOELINA ANDRIAMBOLOLONA Professeur Titulaire de classe exceptionnelle à la  
Faculté de Sciences de l'Université d'Antananarivo Examinateurs : **M. RANDRIANARIVONY Edmond**  
Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo **M. RANDRIAMITANTSOA Paul**  
**Auguste** Professeur à l'Ecole Supérieure polytechnique de l'Université d'Antananarivo **M.**  
**RABOANARY Roland** Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo



# Table des matières

<b>PREFACE .</b>	<b>1</b>
<b>REMERCIEMENTS .</b>	<b>3</b>
<b>RESUME .</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .</b>	<b>7</b>
<b>CHAPITRE I .</b>	<b>9</b>
1.Electronique ..	9
1.1. Structure générale d'un Système automatique ..	9
1.2. Inventaire de Technologies ..	10
1.3. Commande par logique séquentielle [ 13], [ 17], [18 ], [25] .	11
1.4. Commande par logique programmée[12], [14], [ 19], [20], [33], [35], [39] .	13
1.5. Moteurs d'entraînement de <i>KEN-001</i> ..	26
1.6. Les Capteurs[13], [ 22 ], [29] .	29
1.7. Présentation Schématique du système électronique du KEN-001 [ 4 ], [ 5 ], [ 6 ]	30
.	
1.8. La programmation [ 8], [11], [30],[32] .	40
1.9 Programme de gestion de KEN-001 .	43
1.10. Conclusion ..	44
<b>CHAPITRE II .</b>	<b>47</b>
2 Mécanique ..	47
2.1. Le fonctionnement général ..	47
2.2. Grafcet du KEN-001 .	47
2.3. Notion de mathématique sur le positionnement ..	48
2.4. Schéma cinématiques du <i>KEN-001</i> [ 21], [ 25] .	51
2.5. Inventaire des pièces maîtresses ..	52
2.6.Materiaux de fabrications [ 2], [ 15 ], [ 27], [37] .	56
2.7. Le système mécanique [ 3], [ 8], [ 15], [ 21], [25], [27] .	57

2.8 Conclusion . . . .	71
<b>CHAPITRE III . . . .</b>	<b>73</b>
3. Le système d'aspiration . . . .	73
3.1 Etude du système d'aspiration [ 2 ], [ 14 ], [ 28 ], [ 29 ], [ 34 ] . . . .	73
3.2. Généralités sur les ventilateurs [ 29 ], [ 32 ], [ 34 ], [ 38 ] . . . .	76
3.3 Coefficient de Rateau . . . .	81
3.4 Perte de charge [ 28 ], [ 34 ], [ 27 ] . . . .	83
3.5. Choix du type de ventilateur [ 31 ], [ 37 ] . . . .	90
3.6. Description des organes d'un ventilateur centrifuge . . . .	91
3.7. Ventilateur centrifuge réel et rendement . . . .	92
3.8. Réglage des ventilateurs . . . .	93
3.9. Classification des réseaux aérauliques . . . .	94
3.10. Calcul du réseau . . . .	94
3.11 Conclusion . . . .	99
<b>CHAPITRE IV . . . .</b>	<b>101</b>
4. Rayons X . . . .	101
4.1 Généralités sur les rayons X [ 2 ], [ 16 ] . . . .	101
4.2. Production des rayons X . . . .	102
4.3. Les réflecteurs . . . .	103
4.4. Interaction des rayons X avec la matière . . . .	104
4.5. Rendement de la fluorescence . . . .	105
4.6. Intensité des raies X caractéristiques . . . .	106
4.7. Détection des rayons X [ 3 ], [ 4 ], [ 7 ], [ 23 ] . . . .	111
4.8. Principe de la méthode d'analyse TXRF [ 10 ], [ 11 ], [ 23 ] . . . .	116
4.9. Conclusion . . . .	128
<b>CHAPITRE V . . . .</b>	<b>129</b>
5. KEN-001 . . . .	129
5.1. Présentation de la logique du KEN-001[ 1 ], [ 8 ], [ 13 ], [ 37 ] . . . .	129
5.2. Cohérence de KEN-001 . . . .	132

5.3.Coûts de fabrication de KEN-001 .	132
CONCLUSION GENERALE .	134
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .</b>	<b>137</b>
<b>ANNEXE .</b>	<b>141</b>
ANNEXE 01 .	141
RESUME .	150
ABSTRACT .	151



## PREFACE

Le laboratoire de Physique Nucléaire et Physique appliquée (LPNPA) a été fondé en 1976 par le Professeur RAOELINA ANDRIAMBOLOLONA, professeur titulaire de classe exceptionnelle. A l'époque, ce laboratoire était sous la tutelle de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo. Mais vu

l'ampleur et l'extension grandissante prises par ce laboratoire, il a pris ensuite la structure d'un institut. En effet, en 1992, par le décret n°92/869 du gouvernement Malagasy du 30/09/92, l'ex-LPNPA s'est transformé en MADAGASCAR-Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires ( MADAGASCAR-INSTN ). Dirigé par son père fondateur, Professeur RAOELINA ANDRIAMBOLOLONA, jusqu'actuellement, cet institut se fixe comme objectifs de former des chercheurs, de contribuer au développement de Madagascar, et d'étendre sa collaboration avec les autres instituts ou laboratoires. « Le Nucléaire pour la paix, la protection de l'environnement et le développement durable », tel est son mot d'ordre. Il a pour mission entre autres de conseiller le gouvernement Malagasy dans le domaine de l'énergie Nucléaire et de veiller à la promotion des applications pacifiques des techniques Nucléaires pour le développement du pays. Ainsi pour y parvenir, **Madagascar - I.N.S.T.N.** utilise des techniques nucléaires dans le domaine de la production, de la recherche et de la formation.

De nos jours, sept départements constituent cet institut ; département de la dosimétrie et Radioprotection, département des techniques de fluorescences X et environnement, département d'Analyses et Techniques Nucléaires, département de maintenance et Instrumentation Nucléaire, département de physique théorique, département d'énergétiques et département d'informatique.

Le département de maintenance et d'instrumentation se charge de la maintenance de tous les instruments dont Madagascar - I.N.S.T.N utilise. Le personnel est aussi formé à la maintenance des appareils scientifiques d'où l'agrément donné par le MESRES par le décret :N° 079 / 2003 – MESRES. Il est également habilité à concevoir et à réaliser des appareils scientifiques de précision. De ces faits, il offre ses services aux organismes et laboratoires externes et aux particuliers.

Ce présent travail a été réalisé dans ce département dans le cadre d'instrumentation et pour munir le département de la fluorescence X d'un instrument d'échangeur d'échantillon autonome.



A mon fils KALL YANTH KENNEDY

" On peut oublier ce qu'on a entendu,  
On peut se souvenir de ce qu'on a vu,  
Mais on n'oublie jamais ce qu'on a fait,  
On apprend en faisant."

**Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE  
SPECTROMETRIE X**

---

## REMERCIEMENTS

Je ne saurais exprimer quoique ce soit sans m'adresser à **DIEU** créateur de l'univers pour le remercier de m'avoir donné le courage, les moyens et la possibilité de mener à terme ce travail.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à Pr ROELINA ANDRIAMBOLOLONA, professeur titulaire de classe exceptionnelle, père fondateur et Directeur général de MADAGASCAR- I.N.S.T.N ( ex- LPNPA ) de m'avoir permis de m'épanouir scientifiquement et socialement par ses enseignements. Je le remercie également de m'avoir donné l'opportunité et la faveur d'accomplir ce travail au sein de MADAGASCAR – I.N.S.T.N.

J'adresse également mes sincères remerciements à Pr Gérard RAMBOLAMANANA, professeur à l'Université d'Antanarivo, responsable de département de sismologie de l'I.O.G.A de m'avoir prodigué des idées et des précieux conseils pour la conception et réalisation de ces travaux. Je le remercie de même de m'avoir consacré ses temps malgré ses multiples obligations.

Mes remerciements s'adressent également aux membres de jury qui ont bien voulu honorer de leur présence cette soutenance et siéger pour porter jugement sur ce travail.

Je tiens à remercier M. Hery ANDRIANAINA, chef de département de maintenance et d'instrumentations de Madagascar - I.N.S.T.N de m'avoir proposé ce sujet et d'avoir mis à ma disposition des moyens techniques pour y parvenir. Par la même occasion, je remercie tous les membres de mon département pour leurs conseils et encouragement.

Je n'oublie également de remercier ma conjointe Christine M. MAHAZOTA de m'avoir encouragé et soutenu moralement surtout durant les moments où j'avais le moral à zéro.

Je remercie mon père M. Charlot KALO et mes tantes Annette RASOAMANARIVO et Arlette RASAINARIMANANA pour leurs soutiens moraux et financiers.

Je témoigne également mes reconnaissances à M. Georges O. RANDRIAMAENINA, M. Louis de Gonzague T. RANDRIAMANAMPISOA pour leurs conseils.

Que tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail voient ici l'expression de mes sincères remerciements.

**Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE  
SPECTROMETRIE X**

---

## **RESUME**

De nos jours, la science évolue et les techniques utilisées deviennent de plus en plus pointues. En même temps les instruments sont de plus en plus performants. Cette règle s'applique également dans le domaine de la science nucléaire. L'objet de ces travaux va dans ce sens et touche la branche de la spectrométrie X et qui se ramène à la conception et la réalisation d'un système échangeur d'échantillon automatique pour la chaîne de spectrométrie X. Baptisé KEN-001, c'est un instrument échangeur d'échantillon commandé à distance. En effet, des réflecteurs porte-échantillons sont placés d'avance dans des compartiments sur son plateau et par une commande, KEN-001 place un à un les réflecteurs dans le porte réflecteurs en vu d'une analyse. Une fois l'analyse terminée, il se charge de reprendre et de replacer le réflecteur dans son compartiment d'origine. De cette façon, on gagne en temps et donc en nombre d'analyse à effectuer dans un intervalle de temps donné. Cet instrument de précision contribue à l'amélioration de l'analyse et à l'évolution de la technique de la fluorescence X.

**Mots clés :** Automatisme, ventilateur, dépression, rayon X.

**Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE  
SPECTROMETRIE X**

---

## **ABSTRACT**

Nowadays, the science evolves and the used techniques become more pointed. At the same time, instruments are more powerful. This rule also applies in the domain of the nuclear science. The object of these works goes in this sense and touch the branch of the X-Ray spectrometry and that brings back himself to the conception and the realization of an automatic sample changer system for the chain of X-Ray Spectrometry. Baptized **KEN-001**, it is an instrument of sample changer ordered from certain distance. Indeed, the sample carriers are placed of advance in compartments on its tray and by a control, **KEN-001** put one by one those reflectors in the carries reflective for analysis. Once the analysis is finished, the system is in charge of taking and replacing the reflector in its compartment of origin. Of this way, one wins in time and therefore in number of analysis to do in an interval of time given. This instrument of precision contributes to the improvement of the analysis and the evolution of the technique of the X-Ray fluorescence

**Keys Words :** Automatism, fan, depression, X-ray

Rapporteur et directeur de thèse: Pr RAMBOLAMANANA Gérard

**Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE  
SPECTROMETRIE X**

---

# CHAPITRE I

## 1. Electronique

### **1.1. Structure générale d'un Système automatique**

Un système automatisé a une structure bien définie. Elle comprend essentiellement trois organes, à savoir : l'opérateur , l'organe de commande, l'organe opérateur.

L'échange d'informations entre ces trois parties s'opère surtout d'une façon logique. Il est fréquent pourtant, que la nature des informations échangées n'est pas compatible avec la technologie de la partie destinataire, ce qui nécessite une adaptation par des interfaces qui sont disposées comme le montre la figure 1.1.

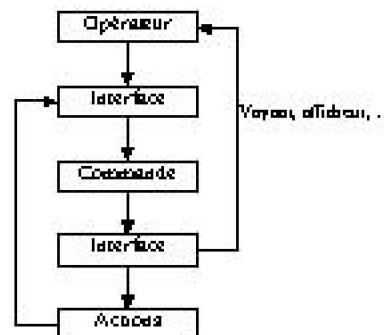


Figure 1.1. Structure d'un système automatique

## 1.2. Inventaire de Technologies

---

Le développement technologique actuel offre de multiples options pour réaliser un tel type de système. L'avancée de la technologie de pointe dans le domaine de l'automatisme nous permet de choisir entre deux possibilités : la technologie programmée et la technologie câblée. En effet, deux solutions peuvent être proposées et sont d'usages dans le cas de ces types de pilotage : commande en utilisant des logiques séquentielles et commande par logiques programmées. Chaque type de commande possède chacun leurs propres performances, et dans quelques cas l'une peut se substituer à l'autre selon l'environnement et les conditions d'utilisation. Après avoir étudié et imaginé les possibilités de conception du système mécanique du **KEN-001**, nous avons établi le chronogramme présenté par la figure 1.2 pour présenter l'électronique de commande. Ce chronogramme montre les différentes sorties des principaux modules du **KEN-001**.

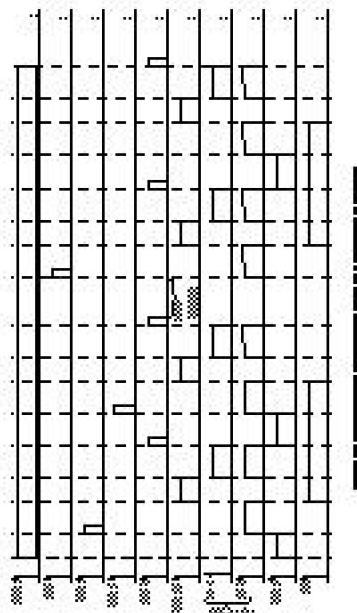


Figure 1.2 Chronogramme des principaux points de la commande de KEN-001

Si une touche numérotée de 1 à 7 est appuyée, cela entraîne automatiquement la

---

synchronisation des différents modules jusqu'à ce qu'une étape soit terminée. Par contre, la touche EJECT permet de refaire exactement les étapes inverses. Certes, selon la technologie de commande utilisée, celle-ci peut avoir une certaine variante.

### 1.2.1. Commande par logiques séquentielles

Elle est basée sur l'enclenchement en chaîne des modules électroniques ou mécaniques, qui sont reliés entre eux. Pour les modules électroniques, ils sont dans la plupart des cas basés sur l'utilisation des registres. Chaque module a son fonctionnement spécifique qui ne peut se substituer qu'à lui-même. Ainsi, les mouvements obtenus résultent du câblage des modules entre eux.

### 1.2.2. Automatisme programmé

Par contre, celui-ci est basé essentiellement sur la programmation c'est-à-dire sur l'utilisation des composants électroniques programmables. Pour cela on peut utiliser un microcontrôleur, EEPROM, etc.... De ce fait, les mouvements obtenus résultent de la programmation.

### 1.2.3. Choix de la technologie

Pour ce genre de réalisation, le choix de la technologie à utiliser est primordial. Il doit tenir compte du milieu où sera placé le module, des instruments locaux, du temps de réalisation, du moyen financier, et surtout de la précision exigée. Malgré toutes ces contraintes auxquelles on doit se soumettre, il faut cependant que l'automate garde sa fiabilité et sa fidélité.

## 1.3. Commande par logique séquentielle [ 13], [ 17], [18 ], [25]

---

Notre première approche était de concevoir un système séquentiel. Ce type de commande est très utilisé dans des cas industriels et d'autres. Il a déjà montré son efficacité. Ce système est basé sur l'utilisation des différentes bascules : monostable, R-S, K-K, D, etc... et de diviseur de fréquence pour une utilité précise. Le principe d'une telle commande repose sur le fait qu'un module est activé soit par une action extérieure ( bouton, capteurs, ...) soit par un autre module. Ensuite il se produit un effet de cascade. Au bout d'une chaîne d'activation se trouve donc le module à commander ( moteur, relais, ....). Après avoir étudié cette possibilité, nous avons étudié, réalisé et essayé le circuit représenté par le schéma synoptique de la figure 1.3.

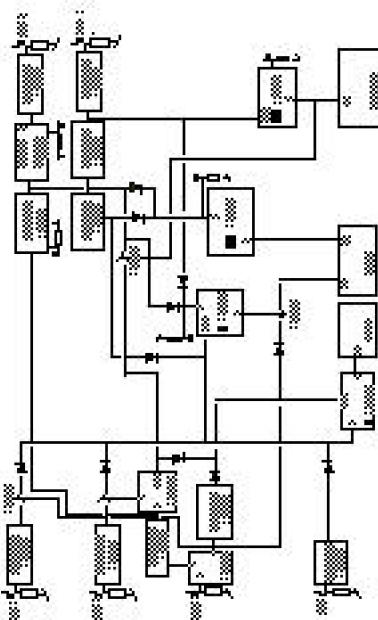


Figure 1.3 Schéma synoptique des commandes par registres

Pour de telles conceptions, nous avons respecté les conditions d'utilisation des circuits électroniques, surtout le « fan out ». Le fonctionnement de ce circuit répond exactement à l'utilisation de la logique séquentielle car il n'utilise que des circuits logiques et des registres. Quant à son fonctionnement :

- L'appui sur un des boutons numérotés de 1 à 7 produit l'activation du moteur relatif au plateau. Ensuite lorsque le réflecteur choisi se trouve au-dessous de la manche, celle-ci descend et le prend à l'aide d'un système d'aspiration. Une fois cette action terminée, la manche, avec le réflecteur porte-échantillon se déplacent vers le haut et y restent jusqu'à ce que le plateau, en tournant, présente une cavité au-dessous de la manche. A travers cette cavité, la manche dépose le réflecteur sur le compartiment d'analyse du porte-réflecteur de la chaîne avant de se retourner vers le haut. On peut alors commencer l'analyse. Une fois celle-ci terminée, la touche EJECT permettrait de refaire exactement toutes les actions mais à l'inverse. A la fin de ce cycle, le porte-échantillon devrait être déposé sur son compartiment initial sur le plateau. **KEN-001** attendrait alors une nouvelle touche appuyée pour un nouveau cycle complet.

Mais lors de nos essais, de nombreux problèmes ont été rencontrés. En effet, juste après la mise sous tension, les bascules devaient avoir des états bas sur chaque sortie. Des circuits *reset* RC prévus à cet effet assurent l'obtention de ces conditions initiales. Or chaque registre ne se comporte pas de la même façon vis-à-vis de la mise sous tension et de sa place dans l'ensemble du circuit. Ceci a une nécessité de dimensionnement différent pour le *reset* de chaque bascule voire même des tâtonnements pour trouver les valeurs adéquates. Le moindre parasite de la part du secteur est ressenti par le circuit sous forme de dérèglement de celui-ci. Ceci entraînait une paralysie ou un fonctionnement erroné de l'ensemble, malgré les propriétés de la technologie CMOS des circuits intégrés utilisés. Quant au circuit diviseur de fréquence par quatre CI5 construit avec un 4013, nous avons constaté que pendant les quatre premières impulsions d'entrées, l'état de sortie ne répond pas au chronogramme donné par la théorie. Après

---

avoir longuement réfléchi sur la cause de ce problème, nous avons conclu que cette théorie n'est valable que si la fréquence d'entrée est au-dessus d'une certaine valeur. Ceci n'est pas vérifié dans le cas de **KEN-001** car l'écart entre deux impulsions n'est ni fixe ni court. Or ce circuit est très important car il devrait permettre le *reset* complet des circuits entiers après la quatrième impulsion en attendant une nouvelle touche. Donc un dérèglement du diviseur de fréquence entraînait un échec total du fonctionnement de **KEN-001**.

Ces raisons entraînaient alors des fonctionnements aléatoires de **KEN-001**, ce qui nous à conduit à s'assurer qu'à partir d'un certain nombre de registres reliés entre eux, un ensemble présente une certaine certitude élevée au disfonctionnement.

Nous en avons conclu alors que l'utilisation de la logique séquentielle n'est pas la solution adéquate pour le circuit de commande de **KEN-001**. Nous avons donc écarté cette possibilité pour nous orienter vers la logique programmée.

## 1.4. Commande par logique programmée[12], [14], [ 19], [20], [33], [35], [39]

---

De nos jours, ce type de commande est le plus répandu et offre de meilleures performances pour certains systèmes compliqués. Pour la commande de **KEN-001**, nous utilisons

donc un microcontrôleur pour ses caractéristiques techniques. De multiples gammes de microcontrôleur sont offertes par des grands fabricants tels que : Intel, Motorola, Zilog, Texas instruments, etc. Nous avons choisi un microcontrôleur de chez MOTOROLA : Le 68HC11F1. Ce choix vient du fait qu'il est disponible dans les stocks du département de maintenance et d'instrumentation de Madagascar-I.N.S.T.N, de plus il est surtout parfaitement adapté à nos besoins

### 1.4.1. Description générale du microcontrôleur 68HC11F1

Actuellement, et vu l'évolution scientifique, beaucoup d'instruments sont à base de microcontrôleurs car ils sont simples à mettre en œuvre et possèdent des interfaces matérielles permettant de réduire la taille et la complexité des systèmes électroniques. En fait les microcontrôleurs sont des circuits intégrés possédant toutes les caractéristiques logiques d'un système microprocesseur où l'on a ajouté des mémoires et des interfaces. Mais par rapport aux microprocesseurs, le µC a un mode d'adressage très limité. En effet, un microcontrôleur renferme :

- Une unité centrale
- Une horloge
- Une mémoire
- Des périphériques d'entrées et sorties
- Un compteur programmable
- Un convertisseur analogique-numérique.

Puisque nous utilisons un 68HC11F1 allons décortiquer ce microcontrôleur pour justifier notre choix. La structure générale du 68HC11F1 est résumée par la figure 1.2

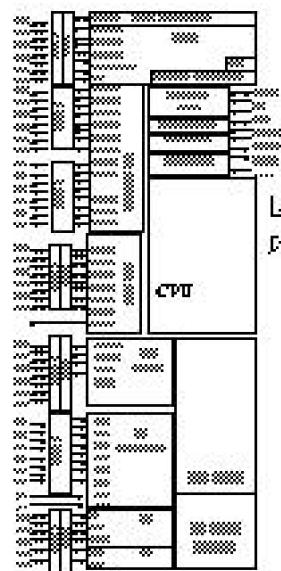


Figure 1.4 Le Bloc diagramme d'un 68HC11F1

#### 1.4.2. L'unité centrale du 68HC11F1

L'unité centrale d'un 68HC11 est à 8 bits. La structure interne des registres de l'unité centrale d'un 68HC11F1 est donnée par la figure ci-après.

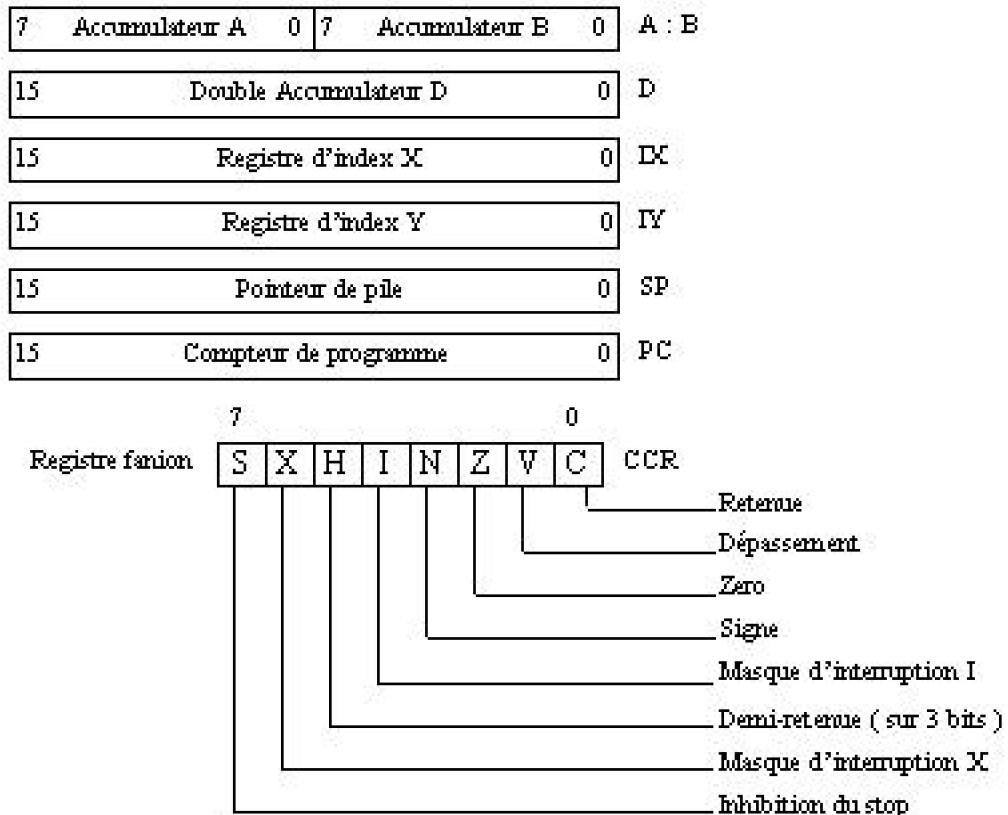


Figure 1.5 Registre de l'unité centrale

#### 1.4.2.1. Accumulateurs A, B, D

Les accumulateurs A et B sont à 8 bits et peuvent être utilisés concaténés AB et ainsi forment un double accumulateur D. Toutes les opérations sur le microcontrôleur doivent passer par un des accumulateurs parce qu'ils mémorisent les opérandes et contiennent les résultats après des calculs logiques ou arithmétiques. Les accumulateurs A et B assurent les même fonctions et leurs instructions sont pratiquement les mêmes à l'exception de quelques-unes.

#### 1.4.2.2. Registres d'index X et Y

Appelés aussi registres IX et IY. Ils sont utilisés pour le mode d'adressage indexé ou également comme pointeur en mémoire. Les mnémoniques relatives au registre IY sont tous codées sur deux octets, ce qui rend son exécution supérieure d'un cycle par rapport à l'utilisation du registre IX.

#### 1.4.2.3. Pointeur de pile ( SP : Stack Pointer )

Pour le 68HC11F1, le registre de pointeur de pile pointe en permanence sur la base d'une zone de mémoire en RAM d'une façon automatique. La pile, par contre, peut être utilisée comme mémoire de sauvegarde et placée n'importe où dans l'espace mémoire de

64Koctets, tandis que le pointeur de pile peut balayer toute l'espace mémoire. Dans le cas d'un appel d'un sous-programme, seul le compteur de programme PC y est stocké. A cause de toutes ses possibilités d'application, il faut cependant s'assurer que la taille de la pile est suffisante pour une application traitée afin d'éviter une perte de données, donc une exécution erronée du programme.

#### **1.4.2.4.Compteur de programme PC**

Un compteur de programme PC est un registre de 16 bits qui pointe en permanence sur la prochaine instruction ou de donnée à charger. Son contenu se modifie aussi automatiquement en fonction de l'évolution du déroulement du programme mais peut être modifié en fonction du mode d'adressage.

#### **1.4.2.5. Registre de Fanion CCR**

On l'appelle aussi registre d'état car il est utilisé principalement pour la mémorisation des indicateurs concernant le résultat d'une opération. C'est un registre de 8 bits contenant les cinq indicateurs qui sont de : demi-retenu ( H ), signe ( N ), zéro ( Z ), déplacement ( V ), retenue (C), deux masques d'interruptions qui sont les masques : d'interruption X ( X ), d'interruption I ( I ) et le bit d'inhibition du stop ( STOP ).

### **1.4.3. Modes de fonctionnement**

Les microcontrôleurs HC11 peuvent fonctionner selon 4 modes distincts. La sélection de ces 4 modes se fait par la combinaison des bits sur les broches MODA et MODB selon le tableau 1.1.

**Tableau 1.1 Sélection de modes de fonctionnement du 68HC11F1**

<del>MODA</del>
de
fonctionnement
<del>RESET</del>
Bootstrap
Etendu
Single
chip
Test

L'état de ces broches est lu à la mise sous tension ou lors d'un RESET. Pour cela, il faut que ces états de ces broches de sélection soient stables pendant la phase du RESET.

#### **1.4.3.1. Mode Single chip**

Ce mode permet au microcontrôleur de travailler sans l'aide d'une mémoire externe. Il est possible seulement pour les HC11 ayant des mémoires internes ROM, EPROM,

EEPROM dont l'espace est suffisamment grand pour contenir le programme d'application. Ainsi pour le 68HC11F1, il permet de consacrer toutes ses broches comme entrées-sorties pour des applications.

#### 1.4.3.2. Mode étendu

Ce mode permet au 68HC11F1 de travailler avec une ou des mémoires externes. Selon la version, la plupart des HC11 travaillent en mode étendu multiplexé mais seule la version F1 est non multiplexée. Elle y consacre trois ports : les ports B et F pour le bus d'adresses de 16 bits et le port C pour les données de 8 bits d'entrées-sorties. De plus quatre bits de sélection de mémoire prédecoder sont aussi disponibles sur le poids fort du port G.

#### 1.4.3.3. Mode Bootstrap

Ce mode est utilisé pour des programmes de tests pouvant se contenir dans la RAM. Le chargement de ce programme doit se faire par la liaison série SCI du port D. La vitesse de transmission peut se faire de 1200 ou 812 bauds pour une horloge  $E = 2 \text{ MHz}$ . Le fonctionnement du microcontrôleur 68HC11F1 sur ce mode est similaire au mode single chip.

#### 1.4.3.4. Mode Test

Ce mode utilise l'accès mémoire entendu. Il n'est pas utilisé par les utilisateurs car il permet des tests lors de fabrications.

#### 1.4.4. Modes d'adressage

Ils permettent d'effectuer des opérations sur des bits et sur un ou deux octets à l'intérieur de l'unité centrale c'est-à-dire avec la mémoire. Motorola utilise également certains noms pour les modes d'adressage que l'on ne trouve pas sur d'autres processeurs. Il utilise principalement six modes d'adressage tels que: adressage Immédiat, adressage Direct et étendu, adressage Indexé, adressage Inhérent, et adressage Relatif

#### 1.4.5. L'Horloge

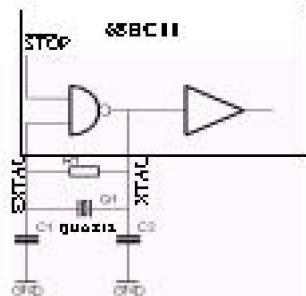


Figure 1.6 Connections du quartz à haute fréquence

Il y a deux façons d'assurer le cadencement de l'horloge d'un HC11F1. La première est

externes dépendent de plusieurs paramètres qui sont : la capacité et l'inductance du circuit

imprimé, la capacité parasite du support, La tension de fonctionnement, la fréquence et la technologie du quartz, etc.

Dans tous les cas, les valeurs typiques sont comprises entre:

1 – 20 MΩ pour  $R_1$ , des valeurs supérieures sont sensibles à l'humidité et celles inférieures réduisent le gain de l'amplificateur, donc peuvent empêcher le démarrage du processeur.

5 – 25 pF pour  $C_1$  : Valeur fixe.

5 – 25 pF pour  $C_2$  : Valeur réglable permettant d'ajuster la fréquence de l'oscillateur.

Le schéma interne et externe de branchement de ce quartz, pour notre application est donné par la figure ci-dessus pour une fréquence allant de 8 MHz dont les valeurs des composants sont :  $R_1 = 10\text{MHz}$ ,  $C_1 = C_2 = 22\text{pF}$ .

#### 1.4.6. Instructions

L'unité centrale d'un 68HC11F1 possède de multiples jeux d'instructions qui sont à utiliser selon le mode d'adressage. Elle peut exécuter 91 nouvelles instructions en plus de toutes les instructions du M6800 et M6801, ce qui lui permet d'avoir 256 instructions. La majorité de ces instructions nécessitent deux ou trois octets. Selon également le mode d'adressage, un jeu d'instruction peut occuper plusieurs octets et peut être exécuté en des temps différents. Les instructions portent essentiellement, sur les accumulateurs et la mémoire, sur le pointeur de pile et les registres d'index, sur le registre d'état et sur le contrôle du déroulement d'un programme.

#### 1.4.7. Mémoires

Le 68 HC11F1 possède trois mémoires dont la taille et la répartition sont données par la figure 1.7

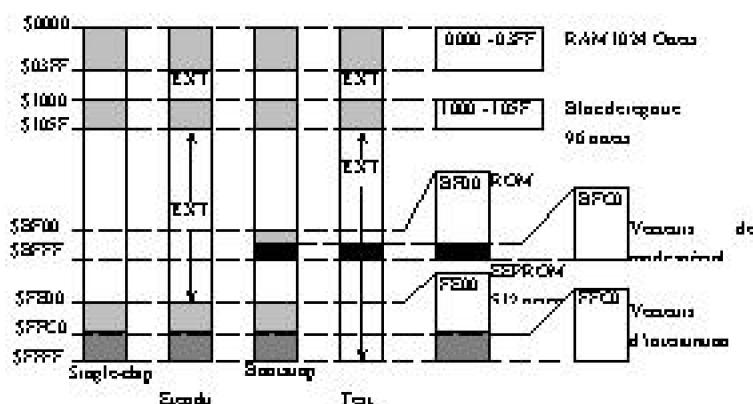


Figure 1.7 Carte mémoire du 68HC11F1

Ainsi, lors d'une programmation, il faut tenir compte du plan mémoire correct. Le tableau suivant montre le plan mémoire de la version F1 et le registre permettant de la

déplacer à partir de leurs emplacements par défaut lors d'un reset.

**Tableau 1.2 Plan mémoire du 68HC11F1**

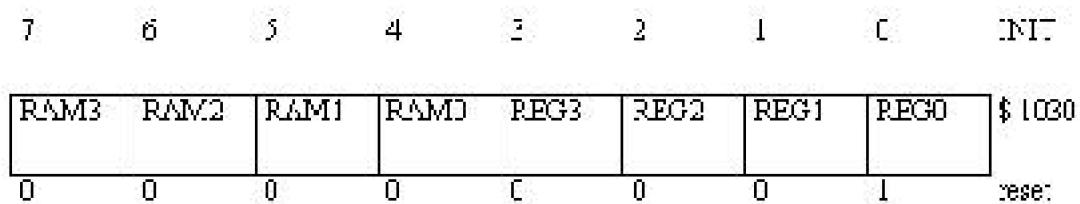
RAM308	RAM308HC
Reg (Init)	Reg (Init)
Initialization	Initialization
)	)
\$100g #	\$100g #
<3...0>	<3...0>

#### 1.4.7.1. La RAM ( Random Access Memory )

C'est une RAM statique. Le registre INIT permet de déplacer ses octets et les 64 octets de registre dans l'espace mémoire. Par défaut, le début de la RAM se place à l'adresse \$0000 tandis que celui des registres est à \$1000. Pourtant ils peuvent être déplacés, par pas de 4 Koctet en utilisant le registre INIT, à l'intérieur du 64 Koctets de l'espace d'adressage du processeur. En effet, il y a principalement deux raisons qui peuvent pousser à changer les adresses de RAM des registres internes :

- La rapidité d'exécution d'un programme. On peut déplacer les deux adresses à \$00 pour pouvoir travailler en page zéro avec l'adressage direct.
- La compatibilité avec les systèmes existants afin d'éviter les conflits d'adressage entre les mémoires internes ou externes.

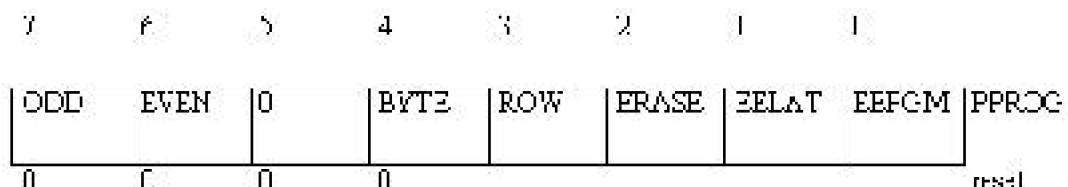
Cependant, il faut que ce registre soit initialisé dans les 64 premières impulsions d'horloge après le RESET du microcontrôleur. Le registre INIT est protégé en écriture pendant les premiers coups d'horloge. Dans ce cas, les registres sont prioritaires sur la RAM qui est lui-même prioritaire sur la ROM. La registre INIT se situe à l'adresse \$1030 et se compose en deux champs de 4 bits.



#### 1.4.7.2. L'EEPROM

Il sert à stocker des variables non-volatiles ou des programmes. Les cycles de lecture de l'EEPROM sont identiques à ceux de la ROM mais la procédée d'écriture diffère. L'écriture est contrôlée par le registre PPROG. Il faut, si on veut utiliser l'EEPROM, que le bit EEON du registre CONFIG soit à 1. Après l'effacement de l'EEPROM, tous les bits sont à 1. La programmation consiste alors à remplacer les 1 par des 0. Tenant compte des caractéristiques physiques d'un EEPROM, la programmation et l'effacement exigent

une tension élevée à partir de la tension d'alimentation 5V. Celles-ci dépendent non seulement de la fréquence d'horloge interne mais aussi de la durée de cycle d'écriture. Cette durée est de 10ms si l'horloge interne est de 2 MHz et 20ms pour 1MHz. Son registre se situe à l'adresse \$103B. Il doit être configuré après un RESET pour permettre un accès en lecture de l'EEPROM.



#### 1.4.8. Liaisons périphériques

##### 1.4.8.1. Les entrées et sorties parallèles

Comme le montre la figure 1.4, le 68HC11F1 possède 54 broches consacrées aux liaisons parallèles et reparties sur les 8 bits des ports : A, B, C, E, F, G et le port D de 6 bits. Certaines sont unidirectionnelles et d'autres sont bidirectionnelles grâce à l'existence des registres de direction relative à chacun d'entre eux. Selon le mode d'opération ou la fonction d'un périphérique activé, certains de ces ports peuvent servir à des fins autres que la liaison parallèle. Ce sont les ports A, D, E, G. Un port peut donc assurer des tâches différentes parmi les fonctions suivantes: Usage général en liaison parallèle, Liaison série , Timer, Compteur d'impulsion, Convertisseur analogique-digital, etc. Le tableau 1.3 résume les fonctions de chacun de ces ports par rapport au mode de fonctionnement du microcontrôleur.

###### - Port A

C'est un port 8 bits d'usage général bidirectionnel. De ce fait, il possède un registre de direction DDRA et un registre de donnée PORTA. Lorsque DDRA = 0, le port A est configuré en entrée et en sortie sinon. Ces broches servent également à un système TIMER 16 bits. Lorsqu'on écrit sur A, le DDRA stocke les données dans un registre interne et les conduit s'il est seulement configuré en sortie.

PORTA Bit 5

Bit 0

PA7	PA6	PA5	PA4	PA3	PA2	PA1	PA0	\$1000
1	:	1	1	1	1	1	1	Reset

PAI	OC2	CC3	OC4	IC4 OC5	IC1	IC2	IC3	Fonction
OC1	OC1	CC1	OC1	OC1	-	-	-	E1 / ou

DDRA Bit 7

Bit 0

DDA7	DDA6	DDA5	DDA4	DDA3	DDA2	DDA1	DDA0	\$1001
0	0	0	0	0	0	0	0	Reset

#### - Port B

C'est un port qui assure deux rôles selon le mode de fonctionnement du 68HC11F1. En mode single-chip et Bootstrap, c'est un port parallèle 8 bits configuré en sortie seulement. En mode test et étendu, il est en sortie et compose l'adresse supérieure d'un bus 16 bits. L'état des registres après le RESET dépend du mode utilisé.

PORT B+7

B+7

B

PB7	PB6	PB5	PB4	FB3	P32	FB1	PB0	\$1704
PB7	PB6	PB5	PB4	FB3	P32	FB1	PB0	Bootstrap

Single chip

ADDR ADDR ALDR ADDR ADDR ADDR ADDR ADDR Test

15 14 13 12 11 10 9 8

étendu

#### - Port C

C'est un port 8 bits possédant un registre de donnée PORTC et un registre de direction DDRC. Si DDRC = 0, le port C est en entrée et en sortie s'il est à 1. L'état des registres après le RESET dépend également du mode utilisé.

## Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE SPECTROMETRIE X

---

PORTE Port 7

Port 0

P17	P16	P15	P14	P13	P12	P11	P10	\$1006
P17							P10	Bootstrap

Single-  
chip

1 1 1 1 1 1 1 1 Reset

DAT47 DAT46 DAT45 DAT44 DAT43 DAT42 DAT41 DAT40 Test

Etenir

DDRD DDC7 DDC6 DDC5 DDC4 DDC3 DDC2 DDC1 DDC0

0 0 0 0 0 0 0 0 0 Reset

### - Port D

Les bits [ 5 : 0 ] peuvent être utilisés à part comme entrée-sortie parallèle ou avec un SCI et SPI. Avec les bits 1 et 0, la liaison peut se faire en série. Si DDRD [ 5 : 0 ] = 0, les bits correspondants sont en entrées, et s'ils sont à 1, ils sont en sorties.

PORTE B.1-7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
*	-*	-*	PDS*	*	*	*	*	*	*	PDO*	\$10C8*	*
*	0*	0*	1*	1*	1*	1*	1*	1*	1*	reset*	*	*
*	-*	-*	SCK*	MOSI*	MISO*	TxD*	RxD*	Autres	.....	functions*	*	*

DDRD*	-*	-*	DDD5*	DDD4*	DDD3*	DDD2*	DDD1*	DDD0*	DDRD*	*	*	*
*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	Reset*	*	*

### - Port E

C'est un port qui peut être utilisé en entrée parallèle 8 bits mais peut également servir de convertisseur Analogique-Digital ( A/D ). L'avantage du port E réside sur la possibilité d'utiliser en même temps des broches comme entrée et d'autres comme convertisseur A/D.

PORTR Bit7 <sub>8</sub>	Bit6 <sub>8</sub>	Bit5 <sub>8</sub>	Bit4 <sub>8</sub>	Bit3 <sub>8</sub>	Bit2 <sub>8</sub>	Bit1 <sub>8</sub>	Bit0 <sub>8</sub>			
0	PE7 <sub>8</sub>	PE6 <sub>8</sub>	PE5 <sub>8</sub>	PE4 <sub>8</sub>	PE3 <sub>8</sub>	PE2 <sub>8</sub>	PE1 <sub>8</sub>	PE0 <sub>8</sub>	\$100A <sub>8</sub>	0
0	1 <sub>8</sub>	1 <sub>8</sub>	Reserv <sub>8</sub>	0						
0	AN7 <sub>8</sub>	AN6 <sub>8</sub>	AN5 <sub>8</sub>	AN4 <sub>8</sub>	AN3 <sub>8</sub>	AN2 <sub>8</sub>	AN1 <sub>8</sub>	AN0 <sub>8</sub>	Fonction <sub>8</sub>	
									A/D <sub>8</sub>	

#### - Port F

En mode Single-chip ou Bootstrap, les broches du port F sont toutes en sorties parallèles. En mode Test et Etendu, le port F compose l'adresse inférieure d'un bus 16 Bits ( Avec le port B)

PORTR Bit7 <sub>8</sub>										
0	FF7 <sub>8</sub>	FF6 <sub>8</sub>	FF5 <sub>8</sub>	FF4 <sub>8</sub>	FF3 <sub>8</sub>	FF2 <sub>8</sub>	FF1 <sub>8</sub>	FF0 <sub>8</sub>	\$1005 <sub>8</sub>	0
0	FF7 <sub>8</sub>	FF6 <sub>8</sub>	FF5 <sub>8</sub>	FF4 <sub>8</sub>	FF3 <sub>8</sub>	FF2 <sub>8</sub>	FF1 <sub>8</sub>	FF0 <sub>8</sub>	Single-chip <sub>8</sub>	0
0	0x	1x	0x	0x	0x	0x	1x	0x	Reserv <sub>8</sub>	0
0	ADDR7	ADDR6	ADDR5	ADDR4	ADDR3	ADDR2	ADDR1	ADDR0	Etendu <sub>8</sub>	0
									Teste <sub>8</sub>	

#### - Port G

PCRIG Bit/	x	x	x	x	x	x	x	x	BitUs	x	x
*	PG7*	PG6*	PG5*	PG4*	PG3*	PG2*	PG1*	PG0*	\$10C2*	*	*
*	1s	1s	*	1s	1s	1s	1s	*	1s	Reset*	*
*	CSPROG*	CSEN*	CSIO1*	CSIO2*	-*	-*	-*	-*	Autor.	*	
									fonction		
DDRG*	DDG7*	DDG6*	DDG5*	DDG4*	DDG3*	DDG2*	DDG1*	DDG0*	*	*	*
*	0s	0s	0s	0s	0s	0s	0s	0s	0s	Reset*	*

#### 1.4.9.2. Liaisons Séries [ 31], [ 35] [36],

Les liaisons séries permettent au 68HC11F1 d'envoyer ou de recevoir des informations de l'extérieur c'est-à-dire d'un micro-ordinateur, d'un clavier ou entre microcontrôleurs, etc. Ces informations, qui sont des successions de bits sur une même broche, arrivent ou partent sur un intervalle régulier d'où la liaison série synchrone ou sur des intervalles irréguliers : liaison série asynchrone. Ce dernier nous est particulièrement utile puisque nous l'utilisons pour se communiquer avec le micro-ordinateur lors de chargement des programmes.

- Liaison série asynchrone

Le 68HC11F1 possède une interface communication SCI *full duplex* qui lui permet des échanges de données sur liaison série asynchrone. Pour cela, les informations arrivent en groupe en des instants aléatoires. Les échanges d'informations peuvent se faire aussi bien d'une façon unidirectionnelle que bidirectionnelle. Pour reconnaître le bit correspondant, le standard NRZ a été adopté, et dans lequel il y a un bit START qui est à 0 et un bit de STOP à 1. (figure 1.8). Lors de transfert des informations successives, les normes imposent la configuration binaire codée 7 bits ( code ASCII ). Le huitième bit définit alors la parité à l'aide duquel d'éventuelles erreurs de transmission peuvent être détectées.

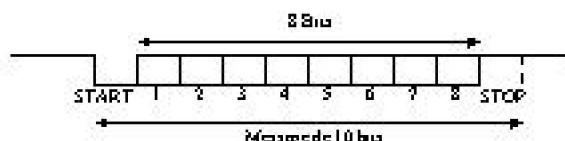


Figure 1.8 Format d'un message série

Les vitesses de transmission des données sont standardisées : 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600 baud, etc... Elles doivent être égales à l'émetteur qu'au récepteur. L'UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter ) assure la mise en œuvre de ce type de liaison.

### - Principe d'un UART

L'UART reçoit de la part du microprocesseur, un message formé de 7 à 8 bits en parallèle. Il traduit ce message parallèle en message série au rythme de l'horloge d'émission. Il ajoute à celui-ci un bit de START, un bit de contrôle de parité et un ou deux bits de STOP avant de l'envoyer aux périphériques. Dans le cas inverse, il reçoit le message série et le convertit en parallèle après avoir vérifié sa parité et son format contre d'éventuelles erreurs. Dans le cas du 68HC11F1, l'interface série utilise les broches PD0 pour la réception des données ( RxD ) et PD1 pour la transmission ( TxD ). Il utilise un format de données de 10 à 11 bits ( un bit START, 8 ou 9 bits de données, un bit STOP ). Le cadencement de l'horloge de transmission est généré par des circuits internes qui prennent pour référence l'horloge interne du HC11F1. Il faut pour cette liaison, utiliser un interface extérieur permettant d'adapter les niveaux 0 et 5 V du microprocesseur. Cette conversion se fait selon des normes bien définies et dans notre cas nous utilisons la norme RS232 qui est la plus utilisée dans beaucoup d'instruments.

### - Norme RS232

La norme RS 232 utilise les niveaux des tensions présentés sur le tableau suivant, pour assurer la communication.

**Tableau 1.4 Les Niveaux des tensions du RS232**

Réception
Bas
à
+25V
V
25ut
à
-3V

Grâce à cette norme, on peut transmettre des données séries pouvant aller jusqu'à 25 mètres ou plus. Pour cela des composants spéciaux alimentés sous +5 V assurent l'obtention de ces niveaux, dont le plus utilisé est le MAX 232. Cette norme utilise deux types de connecteurs standard; le DB25 et le DB9. La signification de chaque broche est donnée par la figure ( 1.9 )



Figure 1.9 Brochages de connecteurs de la norme RS232

## 1.5. Moteurs d'entraînement de KEN-001

---

Pour ce type d'actionneur, deux types de moteurs sont les plus fréquemment utilisés : Moteurs pas à pas et moteurs à courant continu. Ils permettent tous les deux d'avoir une grande précision si des commandes appropriées sont choisies. Pour KEN-001, utilisons des moteurs à courant continu.

### 1.5.1. Etude d'une machine à collecteur à courant continu [ 13], [ 24], [32]

Par définition, une machine à collecteur à courant continu est constituée d'un induit, un collecteur et des pôles magnétiques excités par une source de courant continu ( V.E.I 411.01.05). Elle peut donc fonctionner en tant que moteur ou générateur.

#### 1.5.1.1. Inductances de la machine à courant continu

L'étude des inductances de la machine est indispensable pour pouvoir établir les

conditions des régimes transitoires et les fonctions de transfert. En effet, ceux-ci sont très importants pour déterminer les caractéristiques de réglage d'une machine à courant continu. Pour cette étude, supposons que les balais tournent avec le rotor, et de ce fait, l'expression des réactances s'obtient comme si l'axe magnétique de l'enroulement rotorique tourne à une vitesse angulaire  $\omega_m$  ( figure 1.10 ). L'angle électrique instantané  $\theta(t)$

définit l'angle entre les axes magnétiques de l'inducteur et de l'induit, c'est à dire l'axe  $d$  et l'enroulement d'induit. En réalité, l'enroulement est pseudo-stationnaire. Mais l'introduction de l'angle  $\theta(t)$  prévoit les cas où il est différent de  $\pi/2$  pour permettre d'exprimer la dérivée de ces inductances.

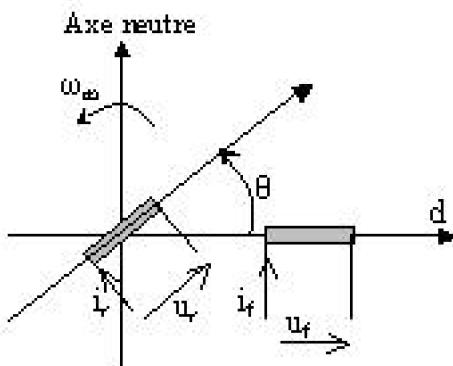


Figure 1.10 Schéma d'étude de l'inductance d'une machine à courant continu

- Inductance propre de l'enroulement inducteur

En effet, l'enroulement inducteur produit un flux que l'on peut décomposer en flux d'entrefer  $\Phi_d$  et en flux de fuite  $\Phi_{of}$ . A l'aide de la distribution spatiale de l'induction  $B_f(x)$ , on peut écrire :

$$\Phi_d = \alpha_i B_f(\max) T_p = \alpha_i \mu_0 (N_p i_f / \delta) T_p \quad (1.1)$$

Où  $\alpha_i$  est un coefficient obtenu par le rapport de la valeur moyenne sur le pas polaire et la valeur maximale de  $B_f(x)$ . Ce qui conduit au flux propre totalisé  $\Psi_f$  :

$$\Psi_f = 2pN_p (\Phi_d + \Phi_{of}) \quad (1.2)$$

$$\text{Et en posant } N_f = 2pN_p \text{ et } \Phi_f = (\Phi_d + \Phi_{of})$$

$$\text{On a: } \Psi_f = N_f \Phi_f \quad (1.3)$$

D'où l'inductance propre de l'enroulement inducteur  $L_f(\theta)$  :

$$L_f(\theta) = (\Psi_f / i_f) = (N_f \Phi_f / i_f) \quad (1.4)$$

C'est une valeur qui ne dépend pas de  $\theta$ , donc elle est constante :

$$L_f(\theta) = L_f = C^{te} \quad (1.5)$$

Ce qui vérifie le caractère isotrope du rotor.

- Inductance propre du circuit d'induit

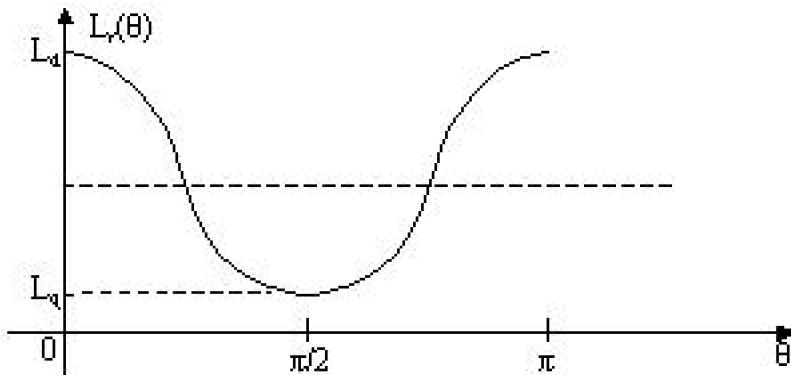
Contrairement à l'inductance propre de l'enroulement inducteur, l'inductance propre d'induit  $L_a(\theta)$  varie en fonction de  $\theta$ . Ce qui confirme le caractère anisotrope du stator. L'inductance résultante  $L_r(\theta)$  des enroulements traversés par le courant total d'induit  $i_r$  varie également et présente des valeurs maximales  $L_d$  et minimale  $L_q$ . Ces valeurs correspondent respectivement à  $\theta = 0$  et  $\theta = \pi/2$ .

Pratiquement on obtient alors :

$$L_r(\theta) = \frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta \quad (1.6)$$

Cependant,  $L_q$  a toujours une valeur faible par rapport à  $L_d$  à cause de la compensation magnétique exercée par les enroulements de commutation et de

compensation.



*Figure 1.11. Allure de la variation de l'inductance propre*

### 1.5.2. Équations de fonctionnement d'une machine à courant continu

Les expressions de la tension induite  $\mu_i$  et du couple électromagnétique  $T_{em}$  valent :

$$\mu_i = (p/a) Z_r \Phi_d = C_m \Omega_m \Phi_d \text{ et } T_{em} = C_m \Phi_m i_r \quad (1.7)$$

$$\text{Avec : } C_m = (p/a) (Z/2\pi) \quad (1.8)$$

En supposant une machine idéale à 2p pôles, ces expressions valent :

$$\begin{aligned} \mu_i &= \frac{Z}{2\pi a} \omega_m \Phi_d = L'_n \omega_m i_f & (1.9) \\ T_{em} &= \frac{\mu_i i_r}{\Omega_m} = p \frac{\mu_i i_r}{\omega_m} = p L'_n i_r \end{aligned}$$

Dans le cas où  $\theta = \pi/2$ , les enroulements inducteur et induit sont en quadrature d'où :

$$\mu_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (1.10)$$

Et l'équation de la tension de l'induit s'écrit :

$$\mu_r = L'_n \omega_m i_f + R_r i_r + L_r \frac{di_r}{dt} \quad (1.11)$$

Où :  $R_r$  : Somme des résistances de l'enroulement d'induit, des enroulements en série avec l'induit et la résistance de contact entre les balais et collecteur. Ainsi l'équation (1.11) et (1.12) traduisent le comportement transitoire d'une machine à courant continu.

$$T_{\text{ext}} + T_{\text{int}} = J \frac{d\Omega}{dt} = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} \quad (1.12)$$

## 1.6. Les Capteurs[13], [ 22 ], [29]

### 1.6.1. Caractéristiques des capteurs

Les capteurs déterminent des grandeurs précises à laquelle est référé un mouvement ou une action. Ils mesurent une température, une force, une pression, une vitesse, ... ou une position exacte. Ils comportent cependant, trois principaux points communs qui les caractérisent :

- La rapidité ; qui définit le temps de réponse entre la variation de la grandeur à mesurer et le transfert de celui-ci à l'organe de traitement.
- La sensibilité, qui définit la plus petite variation de la grandeur à mesurer que le capteur peut détecter et transférer sans défaut à l'organe de traitement,
- L'étendu de mesure, qui définit la variation de la grandeur mesurable entre la plus petite et la plus grande valeur sans porter défaut ni au fonctionnement ni au physique du capteur.

Parmi ces capteurs, nous utilisons des capteurs de position pour le système **KEN-001**.

### 1.6.2. Capteurs de position

En principe, un capteur de position fournit une information logique. Lorsque la position voulue est atteinte, la sortie du capteur fournit un niveau électrique logique haut ( ou bas selon le branchement et le mode de fonctionnement du capteur ) dans les cas contraires, ils présentent les niveaux logiques opposés. Il y a principalement deux types de capteurs de position : Capteurs mécaniques, Capteurs électriques. Comme le résume la figure 1.12, il y a deux modes d'activation d'un capteur de position, soit par contact physique, soit sans contact. Selon le contexte du milieu d'implantation d'un capteur, on détermine le type à utiliser. Le choix sera accès sur les critères

suivants : rôle ( pupitre ou machine outil ), effort d'actionnement, mode d'actionnement (mécanique ou manuel ), encombrement ( espace de fixation), et l'environnement. Il est cependant plus prudent d'utiliser des capteurs pneumatiques dans le cas où ils seront placés sous l'influence importante des milieux dans lesquels il existe des dépôts de crasses, de champs magnétiques de forte intensité, des ondes acoustiques importantes, ou des dangers d'explosion, mais sinon on peut utiliser aisément des capteurs électriques.

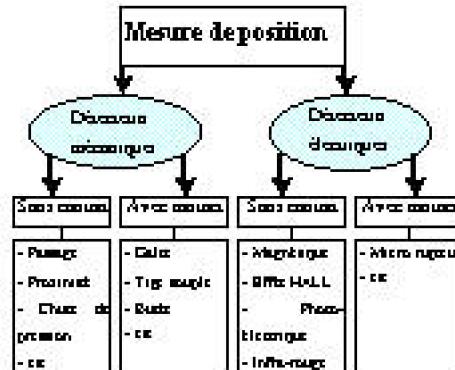


Figure 1.12 Différents types de capteurs

## 1.7. Présentation Schématique du système électronique du KEN-001 [4], [5], [6]

---

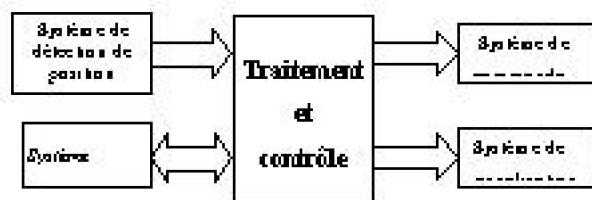


Figure 1.13 Description synoptique du système électronique du KEN-001

### 1.7.1. Le système de traitement d'informations et de contrôle [ 12], [ 13], [30], [35]

Le système de traitement et de contrôle est essentiellement composé du microcontrôleur 68HC11F1. le schéma détaillé est montré par la figure 1.14. La communication série, en vu d'un chargement des programmes venant d'un micro-ordinateur est assuré par IC1 : un MAX 232. Ses broches 11 et 12 ( TxD et RxD ) sont connectées respectivement aux pins 29 et 28 ( Rxd et TxD ) du µC. Le micro-switch S3 sert à connecter la sortie de RxD du IC1 à l'entrée d'interruption XIRQ du IC2 lors de fonctionnement en mode Bootstrap. Le reset du µC est assuré par une bascule monostable construit autour de IC3 : CD4093. Le signal monostable est actif à l'état bas et est injecté à l'entrer 17 du µC. L'oscillateur externe est assuré par un circuit Quartz de coupe AT et de fréquence 8 Mhz. Il est connecté entre les broches 6 et 7 du µC. le choix du mode de fonctionnement est confié au micro-switch S2. Selon la combinaison de celui-ci, le µC fonctionne dans l'un de ces quatre modes de fonctionnement. Les sorties sont connectées à des séries de résistance servant de « pull up » pour la sécurité du µC. Ce circuit permet d'utiliser le µC avec toutes ses possibilités d'exploitation en reliant sur les connecteurs JP les circuits d'extensions.

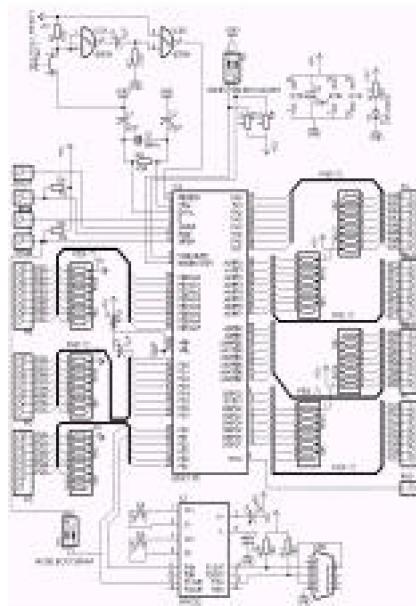


Figure 1.14 Circuit du système de traitement et de contrôle

### 1.7.2. Système du clavier [ 18], [ 26], [ 35], [ 39]

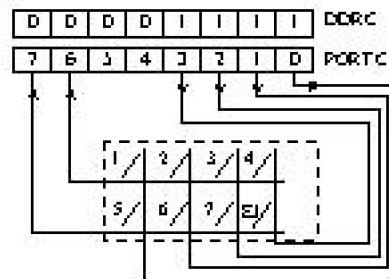
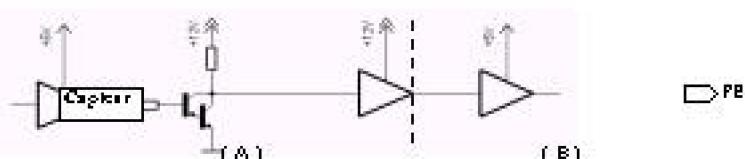


Figure 1.15 Décodage clavier

bits de la colonne. Une touche appuyée impose un niveau bas à un des bits de la ligne. Ainsi on reconnaît laquelle des touches est enfoncée. Après une temporisation logicielle pour éviter un rebondissement, la reconnaissance de la touche est alors fonction du code hexadécimal obtenu.

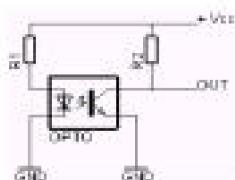
### 1.7.3. Système de détection de positions[18], [ 26]

La représentation descriptive de notre système de capture de positions est donnée par la figure 1.16.

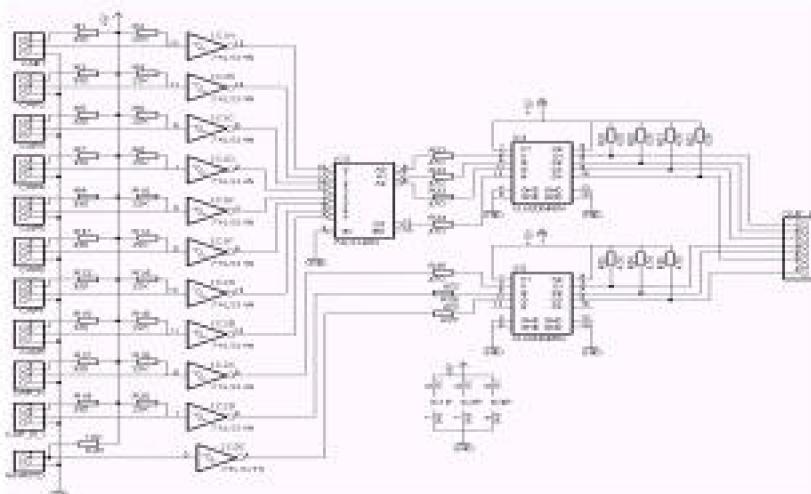


*Figure 1.16 Schéma descriptif du système de détection de position*

La capture des signaux venant des capteurs est confiée au port E qui est un port parallèle 8 bits. Ce port d'entrée ne peut traiter qu'une tension de +5V au maximum. Les capteurs utilisés sont aussi alimentés sous +5V. Nous utilisons deux types de capteurs de positions : capteurs à infra-rouge pour le plateau et capteurs mécaniques ( micro-switch ) pour la manche. La distance entre les capteurs et le microcontrôleur est d'environ de 10m. Ainsi il faut ajouter des circuits d'adaptation. Ces circuits d'adaptation sont des transistors utilisés en commutateurs pour avoir une tension dont le niveau haut est la plus proche possible de +12V et le niveau bas de 0V. Les détails de la partie (A) de la figure 1.16 sont donnés sur le schéma présenté par la figure 1.18 tandis que la partie (B) par la figure 1.19. Voyons d'abord la partie (A) en détail. Les signaux venant des capteurs sont véhiculés



*Figure 1.17 Montage du capteur à infra-rouge*



*Figure 1.18 Interface capteurs ( Partie A )*

Concernant la figure 1.19, l'entrée */N-CAP* reçoit les signaux sortant du connecteur *OUT-CA* de la figure 1.21. Nous utilisons des comparateurs : LM339 dont le niveau de basculement est de  $V_{DD}/2$ . En fait à cause des fils de liaison, il se trouve que des signaux parasites de hautes fréquences soient collectées car ils se comportent comme des antennes. Ces parasites ont des faibles amplitudes ce qui ne risque pas de perturber nos signaux à cause du point de basculement des comparateurs. Les signaux à la sortie des comparateurs sont donc totalement dépourvus de parasites. Les circuits 4010 sont des tampons convertisseurs dont la sortie en niveau logique haut est de +5V. Ce sont des circuits à travers lesquels on peut interfaçer deux systèmes logiques alimentés par des tensions comprises entre +3 et +15V. Ils peuvent donc être utilisés comme interface

CMOS/TTL tout en respectant la condition  $V_{CC} \leq V_{DD}$ . Ainsi ses sorties sont reliées aux 8 bits parallèles du port E du 68HC11 par le biais du connecteur *IN-PE*.

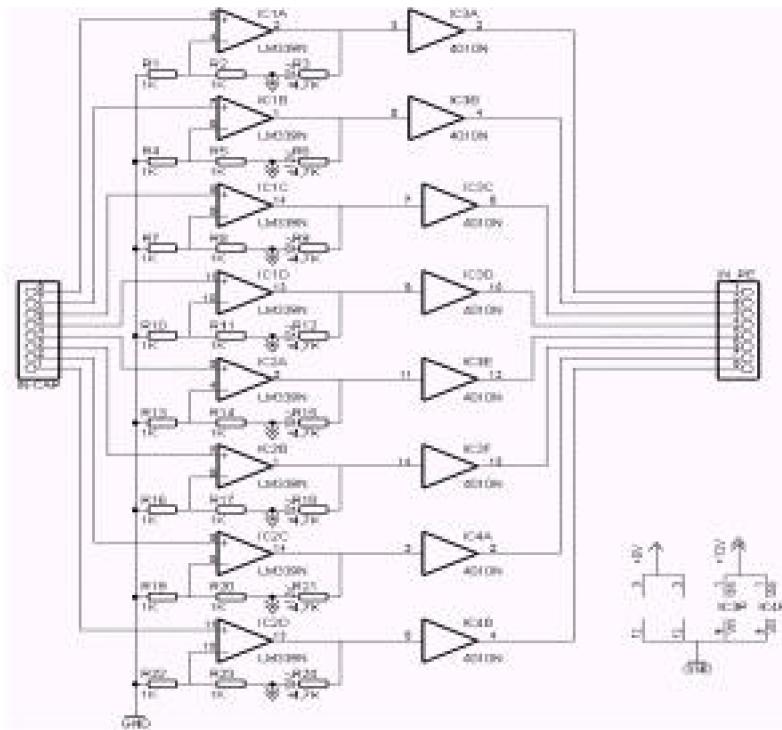


Figure 1.19 Interface capteurs (partie B)

#### 1.7.4. Système de commande [18], [26]

La représentation générale de ce système est donnée par la figure 2.20

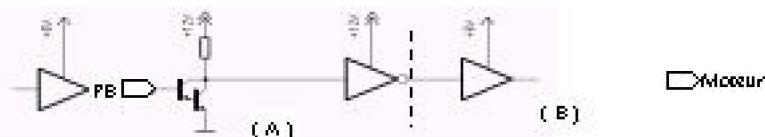


Figure 1.20 Schéma descriptif du système de commande

Nous voulons commander deux moteurs à courant continu et un moteur électrique de moyenne puissance. Le fonctionnement de ce système est similaire à celui du système de capture inversé c'est à dire que les informations viennent du système minimal. La figure 1.20 est détaillée sur le schéma de la figure 1.21. Les signaux TTL venant du port B passent d'abord par un circuit Trigger de Schmitt inverseur avant d'attaquer les bases des transistors NPN darlington. A travers ces transistors, nous avons un niveau haut d'environ +12V avec une commande de +5V. Après avoir été véhiculés par des fils longs, les signaux passent à travers des comparateurs construits avec un LM339. Ceux-ci assurent les mêmes fonctions que pour le système de capture. Avant d'arriver sur les modules de pilotage, les signaux repassent par un circuit Trigger de Schmitt inverseur : 4093. Alors trois bits commandent les modules de pilotage des moteurs à courant continu : deux vont gérer le moteur affecté à la manche et un bit celui relatif au plateau.

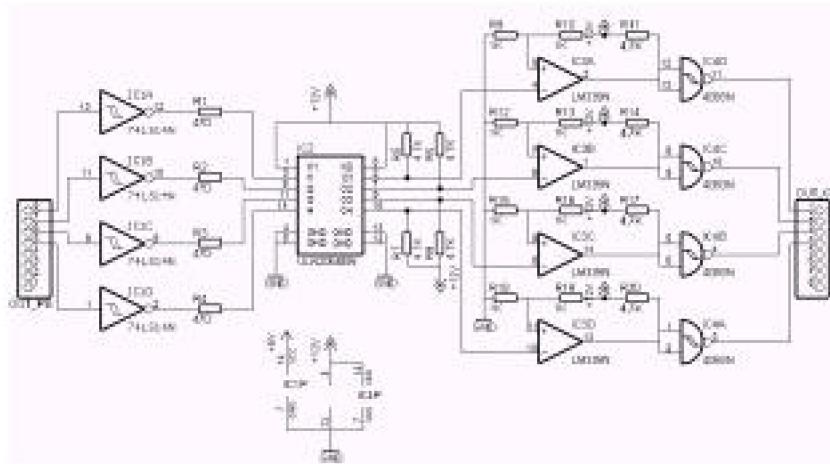


Figure 1.21 Interface de sortie de port B aux commandes

#### 1.7.4.1. Pilotage des moteurs à courant continu [13], [18],[ 26]

Pour notre application, les caractéristiques importantes pour un moteur à courant continu sont : les conditions de démarrage, la stabilité et le réglage de vitesse. D'abord soulignons qu'il y a actuellement deux types de moteur à excitation séparée soit par des aimants permanents (samarium, cobalt, ...) pour des faibles puissances, soit par des enroulements magnétisant un noyau magnétique pour des puissances plus grandes. La simplification de la mise en équation de ces types de moteur nous permet de donner l'expression de la puissance mécanique fournie par :

$$P_m = T_m \cdot \Omega \quad (1.13)$$

Où :  $P_m$  : puissance utile ( W ),

$T_m$  : Couple utile sur l'arbre moteur ( N.m ),

$\Omega$  : Vitesse angulaire de l'arbre ( rd/s ).

Cependant la fréquence de rotation est fonction de la tension appliquée à l'induit ( à flux inducteur constant ) par la relation :

$$E = N \cdot n \cdot \Phi \cdot ( p/a ) \quad (1.14)$$

Où :  $E$  : f.e.m ( V ),

$N$  : Nombre de conducteur actif de l'induit,

$n$  : fréquence de rotation,

$\Phi$  : Flux inducteur ( Wb ),

$P$  : Nombre de paires de pôles,

$a$  : Nombre de paires de voies enroulement.

Et le couple moteur s'écrit :

$$T_m = \frac{IpN\Phi}{2\pi} \quad (1.15)$$

Où :  $I$ : courant nominal ( A ),

#### - Les conditions de démarrage d'un moteur c.c

Il importe souvent que le démarrage soit rapide. La durée de démarrage dépend essentiellement de la différence :  $T_{em} - T_r = K \cdot I_m ; (dV_r / dt) (1.16)$

Avec :  $T_r$  : Couple résistant,

$I_m$  : Moment d'inertie de toutes les masses en mouvement,

$V_r : (60 / 2) \omega$  : Vitesse de rotation.

Mais elle présente une certaine valeur limite au-delà de laquelle le moteur serait endommagé au moment du démarrage. Ainsi  $T_{em}$  et  $T_r$  sont fonctions du temps et il faut que l'écart  $T_{em} - T_r$  soit grand pour avoir un démarrage rapide. Le choix du type et les conditions d'utilisation d'un moteur est cependant fixé en fonction de l'allure du couple résistant.

#### - La stabilité d'un moteur c.c

Pour une utilisation en automatisme, il convient à la fois d'employer des moteurs qui ne présentent pas eux-mêmes des risques d'instabilité et de déterminer les conditions d'utilisations de façon à s'écartez des zones de fonctionnement peu stables. Le principe même de l'asservissement entraîne une certaine probabilité d'instabilité du moteur. Cela peut venir du type ou d'une utilisation non adaptée du moteur. Pour un fonctionnement stable, une variation de vitesse du moteur doit produire un couple résultant tendant à s'opposer à cette variation. En effet,  $T_{em} = T_R + j \frac{d\Omega}{dt}$ , (Avec  $j$  : inertie totale des masses en mouvements) où  $T_R$  est fonction de la vitesse de rotation. Le point d'intersection de ces deux courbes détermine le point de fonctionnement en régime continu.

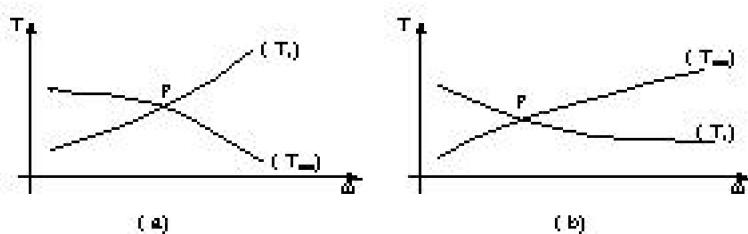


Figure 1.22 Courbes des couples du moteur à courant continu

La figure 1.22 a) présente un fonctionnement stable. Une augmentation de vitesse fournit un couple résultant (ou couple accélérateur) résistant tendant à ralentir le moteur ( $T_{em} - T_r < 0$ ), le cas contraire tend alors à l'accélérer ( $T_{em} - T_r > 0$ ). On constate que la courbe  $T_{em}$  traverse celle de  $T_r$  en descendant. La stabilité est accrue si l'angle que fait les deux courbes, à partir du point P est grand. Par contre la figure 1.22b) correspond à un régime instable car quelque soit la variation de la vitesse, le couple résultant fait en sorte que cela s'amplifie d'avantage.

#### - Réglage de vitesse d'un moteur c.c

Le réglage de la vitesse peut se faire en utilisant un variateur. Celui-ci est un système

à boucle ouvert et muni d'une consigne d'entrée mais aucun retour d'information ce qui perturbe la grandeur de sortie dès qu'une charge lui est connectée. Variation du nombre de pôles, variation du rapport d'engrenage, ... tels sont les procédés à caractère discontinu que l'on peut exploiter pour varier la vitesse de rotation d'un moteur c.c. mais pour le cas continu, on peut choisir entre un réglage :

- par variation de flux
- par variation de la tension d'induit,
- par variation de fréquence de pilotage,
- par décalage de balais.

En effet ; l'interaction du champ magnétique  $H_s$  créée par le circuit inducteur ( stator ) et  $H_r$  fourni par l'induit ( rotor ) produit un couple de moment :

$$C_{\text{mou}} = k \times (H_r \wedge H_s) \cdot 1.17 \cdot 1$$

où  $k$  est une constante. Puisque  $H_s$  est dépendant du flux  $\Phi$  créé par l'inducteur et  $H_r$  par l'intensité du courant  $I$ , alors on peut encore écrire :

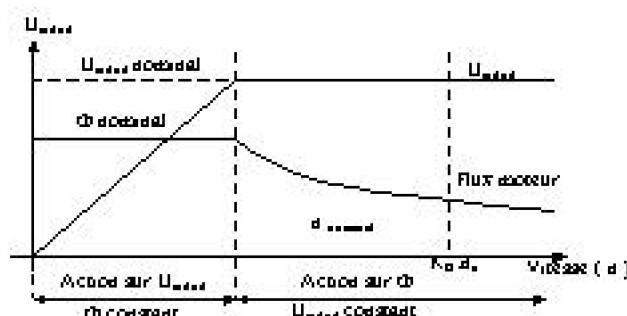
$$|C_{\text{mou}}| = k \times |I| \times |\Phi| \times \sin(\vec{I}, \vec{\Phi}) \cdot 1.18 \cdot 1$$

$$U_{\text{induit}} = E + RI = \left( \frac{pN}{a} \right) n \Phi + RI \cdot 1.19 \cdot 1$$

On tire alors :

$$n = \frac{U - RI}{\left( \frac{p}{a} \right) N \Phi} \cdot 1.20 \cdot 1$$

Ces équations mettent en évidence la possibilité de varier la vitesse d'une machine à courant continu.



*Figure 1.23 Caractéristiques de  $U_{\text{induit}} = f(n)$*

Dans tous les cas, l'utilisation d'une de ces possibilités de réglage comporte des limites. Selon l'utilisation, le procédé mis en œuvre devrait respecter les caractéristiques

du moteur. La figure 1.26 montre la variation de  $U_{induit}$  en fonction de la vitesse  $n$  avec  $KD$  est le coefficient de désexcitation ( donné par le constructeur ). Cette courbe montre que :

d'une part, l'action sur  $U_{induit}$  ne devrait se faire que jusqu'à la vitesse nominale qui correspond à une valeur limite de la tension inter-lame  $U_{nomine}$  ( cette valeur est donnée par le constructeur ), sinon il y a destruction du moteur,

D'autre part, l'action sur le courant d'excitation ( donc le flux ) entraîne une variation de vitesse qui est inversement proportionnelle à celui-ci.

Les moteurs que nous utilisons pour actionner les deux bloc du système du **KEN-001** sont des moteurs de 12V/5W et 12C/2W pour la manche et le plateau respectivement. Donc l'application de cette tension leur fait tourner à leur vitesse maximale, ce qui est trop rapide et trop brusque. Il nous fallait alors un certain réglage de vitesse pour satisfaire nos conditions optimum d'utilisation. Parmi les différentes possibilité de réglage évoquées ci-dessus, deux sont les plus utilisées :

réglage par variation de tension de polarisation,

réglage par variation de flux.

La première possibilité est la plus simple à mettre en œuvre. Il suffit en effet de faire varier la tension d'alimentation du moteur dans une plage raisonnable. Lors de nos essai, nous avons varié celle-ci de 5 à 12V. En fait, en dessous de 5V, nous avons constaté que le moteur avait tendance à ce bloquer. De plus lors du régime de fonctionnement en charge, le mouvement du plateau avait présenté une certaine instabilité au fur et à mesure que la rotation se ralentit. Ce fait est contraire au principe de l'utilisation d'un moteur pour un système tel que **KEN-001** qui exige une stabilité de mouvement dans la limite de fonctionnement. Nous avons donc éliminé cette possibilité.

La seconde possibilité, la plus utilisée en toutes applications de précision est le réglage par la variation de flux. Ce procédé est le mieux adapté pour **KEN-001** car il présente des intérêts majeurs tels que la stabilité et la précision. En effet, pour une charge constante, il permet un mouvement stable. Le moyen le plus efficace et d'ailleurs utilisé en automatisme et robotisme est la commande par P.W.M. Ceci traduit pratiquement ce mode de pilotage car il agit sur la durée d'impulsion à une fréquence de signal constante. De plus ce type de commande à des avantages tels que :

- Une fois la fréquence déterminée, seules les largeurs d'impulsion comptent pour ralentir ou accélérer la vitesse de rotation du rotor.

- En agissant sur le rapport cyclique du signal, on peut à la fois accélérer ou changer le sens de rotation du moteur en passant par l'arrêt.

- Du point de vu de l'alimentation, nous savons que lors de démarrage d'un moteur à courant continu, celui-ci demande de surplus de courant. Avec le P.W.M. on limite le courant de démarrage et la consommation du moteur en régime tout en gardant son efficacité.

Pour piloter **KEN-001**, nous avions envisagé de créer les signaux P.W.M des deux moteurs par le 68HC11F1 qui peut effectivement assurer cette fonction. Mais à cause des

inductions créées par les moteurs lors des fonctionnements, le 68HC11F1 peut être endommagé ou perturbé ce qui modifie la lecture du programme écrit dans la mémoire. Pour ne pas prendre des risques et en protégeant le microcontrôleur, nous préférions concevoir un circuit extérieur et le processeur assure donc un contrôle et l'activation des moteurs.

Pilotage de moteur c.c par PWM ( Pulse Width Modulation )

$$t_H = 0,693 [(R_1 + R_2) + R_3] C_1 \quad (1.21)$$

$$t_L = 0,693 (R_3) C_1 \quad (1.22)$$

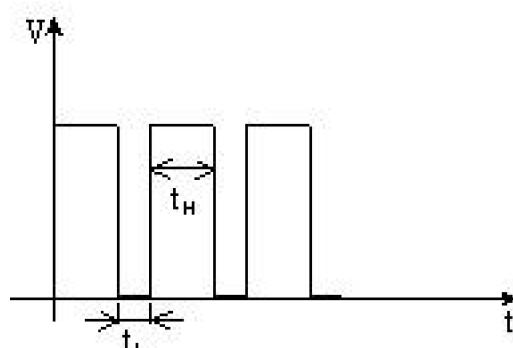
d'où la période:

$$t_H + t_L = 0,693 [(R_1 + R_2) + 2R_3] C_1 \quad (1.23)$$

Fréquence

$$f_r = \frac{1,44}{[(R_1 + R_2) + 2R_3] C_1} \quad (1.24)$$

Ainsi en utilisant le diagramme donné par



*Figure 1.24 Oscilloscopogramme d'une fonction à stable*

le constructeur et les relations ci-dessus, nous avons :  $R_1 = 100\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 56\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 100\Omega$ ,  $C_1 = 100\text{nF}$  pour délivrer une fréquence voisine de 100Hz. Ce signal va ensuite déclencher un autre NE555 monté en générateur de signal P.W.M. L'entrée 2 de IC2 reçoit donc le signal d'horloge nécessaire de la part de IC1. Une tension variable dont la valeur maximale est de 9V sert de signal modulant. Ce signal modulant est injecté à l'entrée 5 de IC2. Une diode Zener de 9V assure une bonne stabilité de cette tension car une variation parasite provoque une variation indésirable du signal P.W.M et l'action de P1 règle ce signal de façon à avoir une condition optimale pour les moteurs. Le signal P.W.M est ensuite injecté à un multiplexeur/démultiplexeur analogique à deux canaux : 4053. Sa broche 12 reçoit directement ce signal tandis que 13 un signal inversé par le 4093. La broche de direction 14 permet d'aiguiller la sortie 14 sur 12 ou 13. Le signal sélectionné est dirigé en 1 d'une part et inversé par IC3 d'autre part. Les broches d'activation 10 et 9 interconnectées servent à transmettre ou de bloquer les sorties 15 et 4. Ensuite ces deux sorties vont attaquer le circuit de puissance construit avec les transistors T1 à T4. Les bornes du moteur sont donc connectées entre T1T3 et T4T2.

Nous utilisons des transistors *Darlington* pour leur gain élevé. Ainsi un faible courant de base suffit pour les commander. D'ailleurs un circuit CMOS ne permet pas de délivrer un courant important. Les diodes D2 à D5 jouent le rôle des diodes *roues libres* c'est-à-dire d'éliminer les pics de tension qui subviennent lors de la rupture de la tension d'alimentation de l'enroulement du moteur.

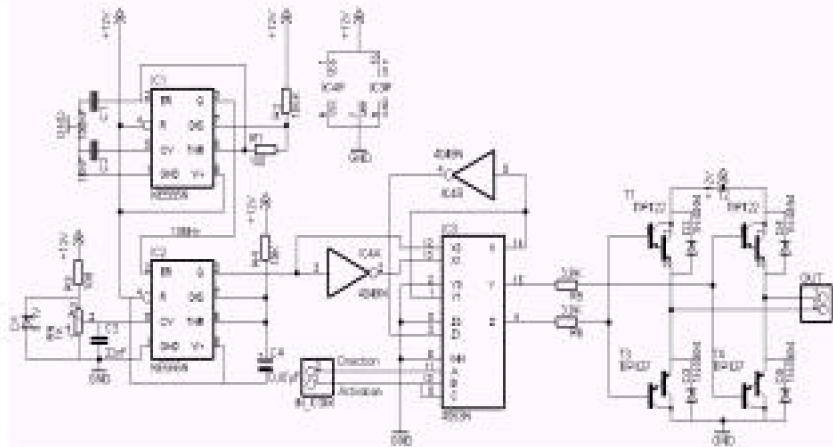


Figure 1.25 Circuit puissance des moteurs

#### Commande du moteur du système d'aspiration

Pour le système d'aspiration, nous utilisons un moteur électrique pour supporter les puissances nécessaires. Ce moteur est alimenté par une tension alternative. Il ne nécessite pas une précaution particulière car une application d'une tension alternative lui est suffisante pour fonctionner. C'est sa puissance et le nombre de rotation par minute, qu'il peut effectuer qui nous incite à l'utiliser. Nous utilisons donc un moteur de chez : KOKUSAN DENKI Co.ltd ayant les caractéristiques suivantes :

Tension d'alimentation 220 V<sub>eff</sub> et 1900 rotations par minute.

Son activation est donc confiée à un relais électromagnétique commandé à travers le port B du 68HC11F1. Sur la figure 1.29, le connecteur COM\_ASP reçoit le signal venant du µC. L'interface se fait avec un transistor de faible puissance : 2N2219.

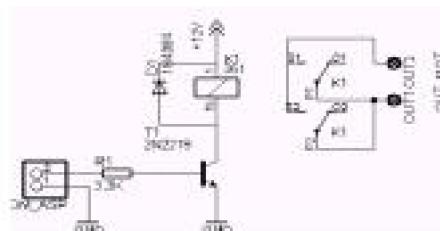


Figure 1.26 Circuit de puissance du moteur du système d'aspiration

#### 1.7.5. Système d'affichage[18],[ 26]

Ainsi, il nous suffit d'envoyer 4 bits pour afficher un nombre de 0 à 9 et un bit pour la broche LE ( figure 1.27 ). Donc de la part du système minimal, 5 bits sont nécessaires

pour l'affichage. Les 3 autres du port G peuvent être utilisés à d'autres fins.

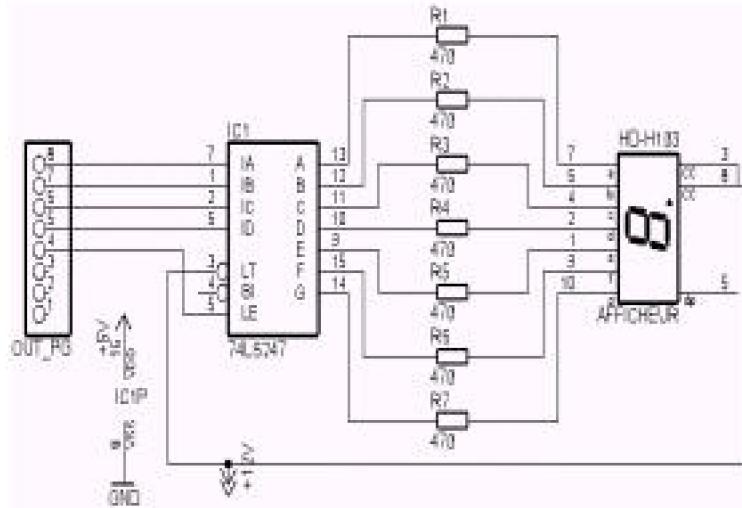


Figure 1.27 Circuit d'affichage

### 1.7.6. Circuit d'alimentation[18],[ 26]

Vu la variation très peu de la tension secteur de la JIRAMA, une alimentation stabilisée conventionnelle nous convient parfaitement. Il nous faut des basses tensions continues très stables de 12V et 5V. Pour cela nous utilisons le schéma représenté par la figure 1.28.

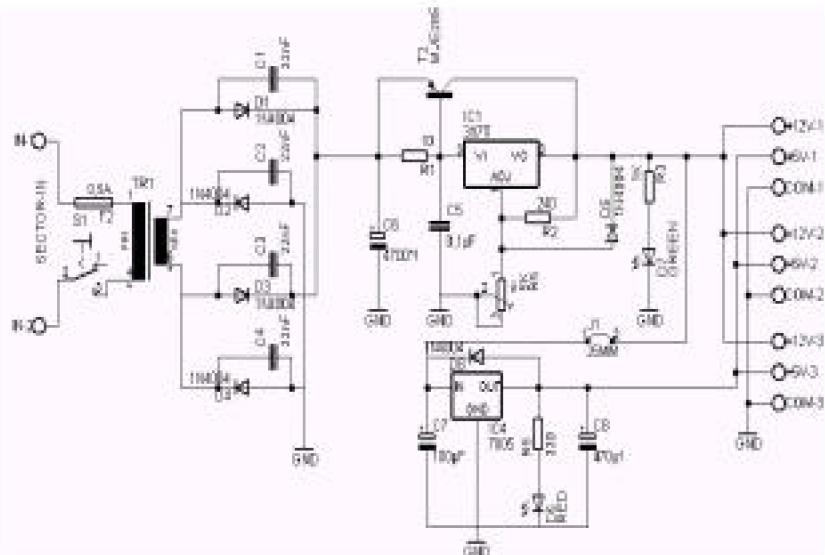


Figure 1.28 Schéma du circuit d'alimentation

## 1.8. La programmation [ 8], [11], [30],[32]

---

	B07	B06	B05	B04	B03	B02	B01	B00	
31000	PA7	PA6	PA5	PA4	PA3	PA2	PA1	PA0	PORT A
31001	DDA7	DDA6	DDA5	DDA4	DDA3	DDA2	DDA1	DDA0	DDRA
31002	PG7	PG6	PG5	PG4	PG3	PG2	PG1	PG0	PORTG
31003	DDG7	DDG6	DDG5	DDG4	DDG3	DDG2	DDG1	DDG0	DDRG
31004	PB7	PB6	PB5	PB4	PB3	PB2	PB1	PB0	PORTB
31005	PF7	PF6	PF5	PF4	PF3	PF2	PF1	PF0	PORTF
31006	PC7	PC6	PC5	PC4	PC3	PC2	PC1	PC0	PORTC
31007	DDC7	DDC6	DDC5	DDC4	DDC3	DDC2	DDC1	DDC0	DDRC
31008	D	D	PD3	PD4	PD3	PD2	PD1	PD0	PORTD
31009	D	D	DD03	DD04	DD03	DD02	DD01	DD00	DDRD
3100A	PB7	PB6	PB5	PB4	PB3	PB2	PB1	PB0	PORTE

Tableau 1.10 Extrait de registre d'entrées-sorties du 68HC11F1

( Pour plus d'informations consulter **HC11 Programming reference guide** )

Le 68HC11F1 possède quatre modes de fonctionnement différents qui peuvent être utilisés selon le besoin et l'opportunité. Nous utilisons donc successivement deux modes différents pour notre application. Le mode bootstrap qui nous permet de charger les programmes à partir d'un micro-ordinateur et le mode single-chip lorsque le microcontrôleur travaille en autonomie. Nous utilisons principalement ce deuxième mode car notre programme d'application principal est assez court pour être contenu dans L'E<sup>2</sup>PROM. Le chargement du programme en assembleur ( langage connu par la famille des processeurs MOTOROLA ) traduisant cet organigramme se fait à l'aide d'un micro-ordinateur IBM, Pentium I de 75MHz. Il contient le logiciel PCBUG11 installé sous DOS 6.02. Ce logiciel permet de développer le programme avant de le charger dans le microcontrôleur par liaison série

### 1.8.1. L'organigramme principal de KEN-001

Ecriture du programme source avec un éditeur de texte,

Assemblage et vérification syntaxique du programme source,

Création d'un fichier au format S.19,

Chargement du fichier S.19 dans une mémoire ( RAM ou EEPROM ).

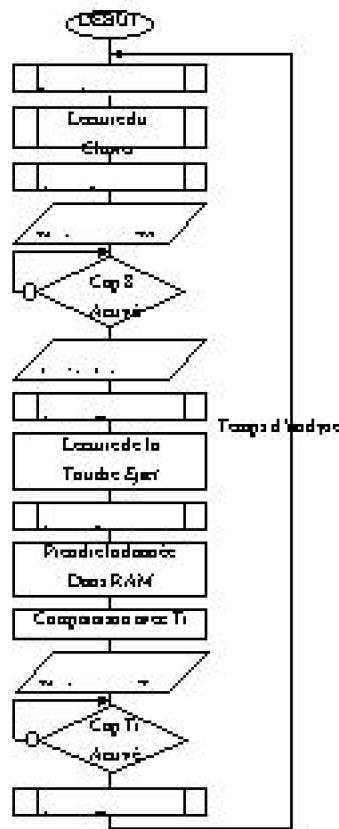


Figure 1.29 Organigramme principal de pilotage de KEN-001

#### 1.8.1.1. L'organigramme des sous-programmes

Le développement des sous programmes se fait de la manière suivante :

- Initialisation

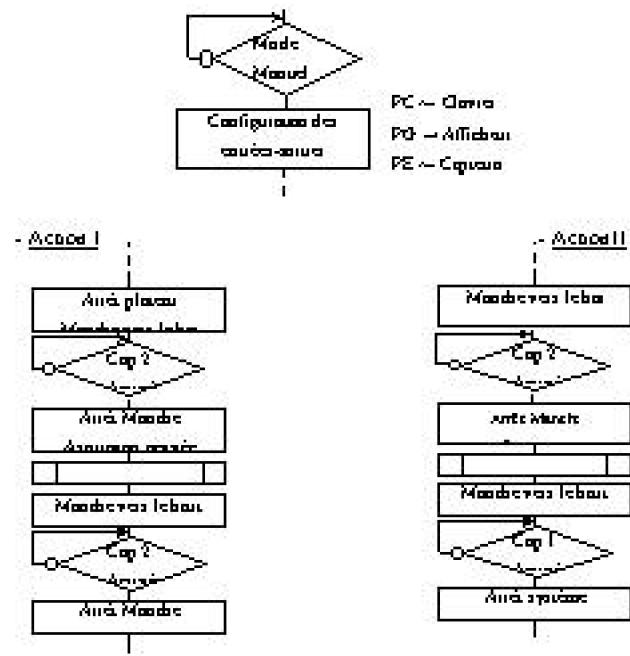


Figure 1.30 Organigramme des Action I et Action II

- Lecture du clavier

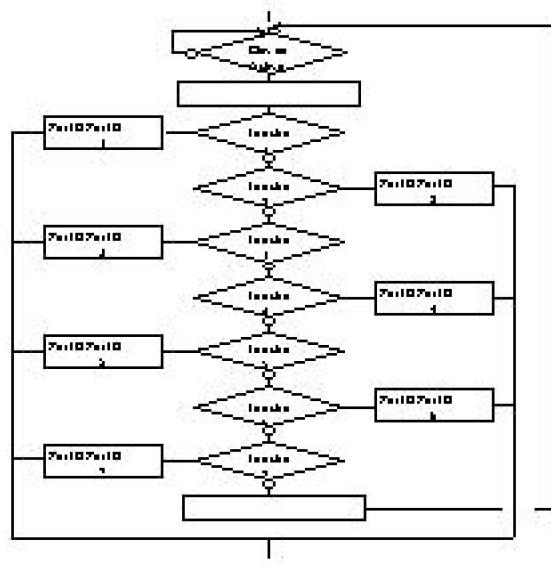


Figure 1.31 Organigramme de lecture du clavier

## 1.9 Programme de gestion de KEN-001

En utilisant le PCBUG11, et après avoir étudié les diverses possibilités d'adressages du 68HC11F1, nous sommes arrivés au programme de pilotage de **KEN-001** dont le fichier s.19 est donné ci-dessous :

300B000020202020202020202034†  
S1217E0086FFD710C3860FD7:00786C0371004D6100A8410910026F77F10047F:002E?¶  
S1217E1EB6100A84101810127F7C6F3F7100EB610C634F03:F027293CCE07D00936FD3E¶  
S1217E3C38B610UJ081E727281UJ7277481EB272F81ED274U81EE27D181DD275281J83B¶  
S1217E5A277520C90D59C1F724C520C186F1BDFFEE6100A813626F9BDFF03BDFF4  
CAF¶  
S1217E7E877FF7F36F2ADFF7F8A6107A81892F9377F013AF.FF4C7EFF7F8AF3ADFFF66  
6A0†  
S1217E9610CA81462679LDDF03BDFF4C7E7F7T8SF4PDDFFBDS100A3:0E25F9PDDFF0  
362¶  
S1217EB46DFF4C7EFF7F3C2A86F3ECFF336100A812626F9BDFF03BDFF4C7EFF738  
6CE¶  
S1217ED2F6BDFE7BB6100A81A626F9BDFF03BDFF4C7EFF7F36F7BDFE7BB6100A81  
6A9H¶¶  
S1217EFC25F9PDDFF03BDFF4C7EFF7FB7:002:6PDDFF2B39353CB7100436100A8408316  
1¶  
S12:FF0EJ326F73610B71004BDFF3786L0B710C4B6100A8410810026F73DFF3..293689¶  
S12:FF2C20B71004398530B71004393CCE01F4BDFF43C926FA38393CCE07D00936FD3  
0¶  
S12:TT4A3839D6100A84B031EC2677BDFF59398690371C04D6100A8408810826F77FC2¶  
S12:FF6810C4BDFF3786C0B710C4B6100A8410810026F77F10043986FEB71006B6107A¶  
S12:FF860681CE36F96DFFC3BCFF31C1F127:AC:FF2723C1F32720C1F42735C1F5274  
4¶  
S12:FFA43E71F6C747C:FF7275F20F2P6107A8:FF26F5P7FF597EFF.I8P6:00A8136568  
B¶  
S12:FFC2F93DFF597EFE18B6100A8:4626F9BDFF597EFE18B6100A81A626F9BDFF59  
D1¶  
S12:FFB072FE18B610CA813626F93DFF597EFE18B6100A81A626F9BDFF597EFE:8E6  
B7¶  
S10FFFFE100A816626F9PDDFF597EFE182A¶

Et le programme complet décrit en langage assembleur est présenté à l'annexe 01.

## 1.10. Conclusion

---

La description générale des systèmes automatisés ne tient pas compte de la technologie mise en œuvre ni quelques moyens qu'ils soient. Seules les séquences et les étapes sont précisées. Cette description englobe les deux principaux composants d'un automate sans faire une distinction précise quant à leur fonctionnement respectif. En effet, la mention *automate* sous-entend des parties mécaniques, électronique et / ou électriques qui se relient non seulement dans un contexte de complémentarité mais surtout de dépendance totale. Ces aspects imposent que séparées, les deux parties n'ont ni de sens réel ni d'importance dans de tels environnements. Ainsi la commande de **KEN-001** est confiée au 68HC11F1 pour plus de fiabilité et de rapidité d'exécution des différentes étapes de fonctionnement.

La représentation sur la figure 1.32 résume l'interdépendance et le déroulement général de chaque étape.

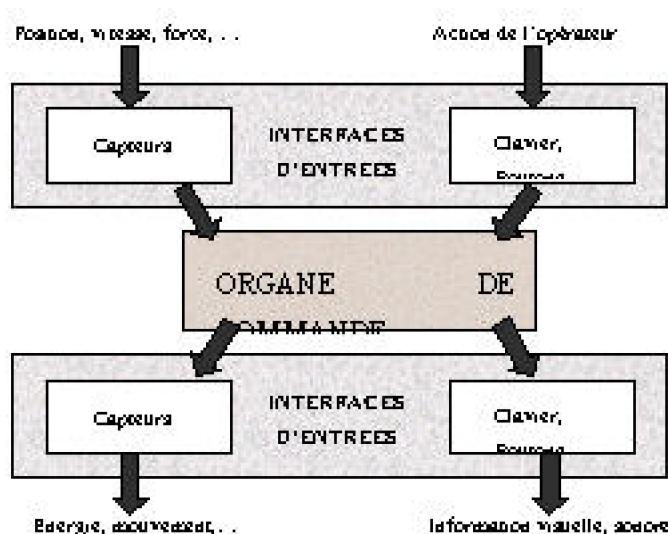


Figure 1.32 Liaison périphérique – commande – périphérique

**Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE  
SPECTROMETRIE X**

---

# CHAPITRE II

## 2 Mécanique

### 2.1. Le fonctionnement général

---

*KEN-001* est un système permettant, sans se déplacer, de changer volontairement des échantillons en vu d'éventuelles analyses. En effet, au lieu de placer un à un les échantillons dans le porte-échantillon au moyen d'un dispositif assez rustique, l'opérateur reste auprès de l'ordinateur personnel d'analyse. Pour ce faire, il doit d'abord placer sur ***KEN-001*** tous les échantillons, et avec une commande à distance, les faire défiler à volonté pour analyse. Une fois toutes les analyses terminées, il lui reste à les enlever et à les remplacer par une autre série d'échantillons.

### 2.2. Graftet du KEN-001

---

Pour un système automatisé, l'évolution du processus est prédéfinie d'avance et les actions successives y référant sont consignées dans un ordre chronologique bien déterminé. Avant de passer d'une étape à une autre, des conditions précises doivent être

impérativement remplies, c'est à dire une fin de course, une temporisation, etc.... Le grafcet est une méthode descriptive graphique représentant l'alternance étapes-transitions. Ainsi il interprète le cahier des charges de tout un système séquentiel. Ainsi la figure ci-après illustre le grafcet niveau II du KEN-001.

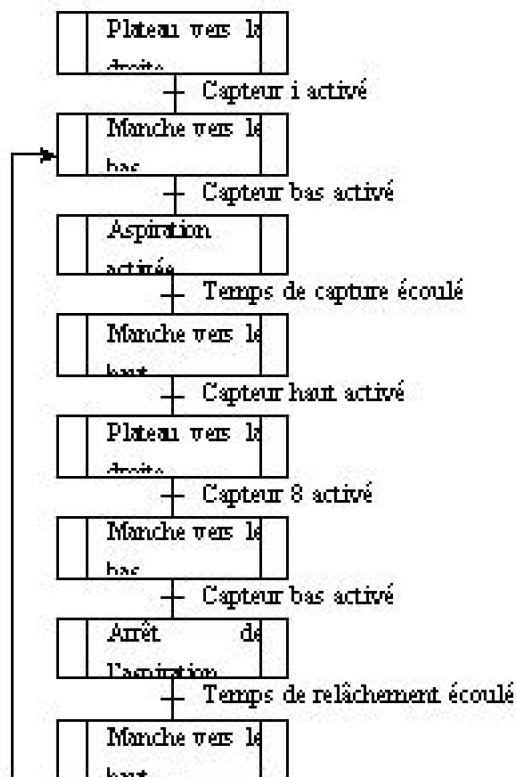


Figure 2.1 Grafcet de KEN-001

### **2.3. Notion de mathématique sur le positionnement**

---

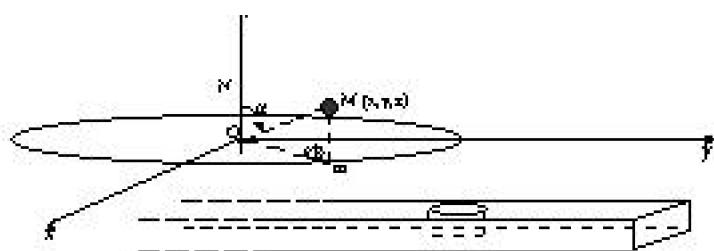


Figure 2.2 Représentation mathématique du système mécanique

#### **2.3.1. Positionnement**

L'étude de positionnement traduit le fonctionnement de **KEN-001** et le déplacement du porte-échantillon. Quelque soit le mouvement dans un espace à trois dimensions, il peut se décomposer au maximum en deux : mouvement de rotation et mouvement de translation. Théoriquement une rotation est une isométrie dont il existe une unique direction invariante ( c'est-à-dire son axe ) dans son espace représentatif. Et l'angle de

rotation est défini entre un vecteur et sa transformée pour les vecteurs du plan orthogonal à l'axe. Les représentations matricielles ci-dessous définissent chacune des rotations autour d'un axe principal donné de l'espace à trois dimensions :

$$\cdot R_{\alpha,x} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \cdot R_{\beta,y} = \begin{pmatrix} \sin \beta & 0 & \cos \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \beta & 0 & -\sin \beta \end{pmatrix}, \cdot R_{\gamma,z} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Remarques

Dans le cas où une rotation ne se fait pas autour d'un de ces axes, alors on obtient sa représentation matricielle par la décomposition de **Jordan**, qui correspond à un changement de base d'application linéaire.

$$R_a = R_x R_{\alpha,x} R_x^{-1} = R_x R_{\alpha,x} R_x^T \quad (2.2)$$

Où  $R_a$  est une rotation alignant l'axe x choisi de la base sur l'axe u de rotation.

### 2.3.2 Liaisons cinématiques

$$\square \cdot \text{EMBED} \cdot \text{Equation.3} \cdots C = ({}^iC_p)({}^iC_q)({}^iC_c) \quad (2.3)$$

#### 2.3.2.1. Modèle de Denavit-Hartenberg

Ce modèle est le plus utilisé en robotique. Il correspond à un cas simple : les liaisons n'autorisent qu'un seul degré de liberté à la fois : en translation le long d'un seul axe ou en rotation. Pour l'exemple ci contre,  $R_i$  se déplace vers le nouveau repère  $R_{i+1}$ , en subissant une translation selon  $x_i$ , une rotation suivant  $x$  ( $x_i$ ), puis une translation suivant  $x$  ( $x_{i+1}$ ) et enfin il pivote suivant  $x$  ( $\Theta_{i+1}$ ). La transformation géométrique vaut alors :

$${}^{i+1}C = T_{x,\alpha} R_{x,\alpha} T_{x,\theta_{i+1}} R_{x,\theta_{i+1}} = ({}^iC_p)({}^iC(t)) \quad (2.4)$$

Figure 2.3 Exemple de liaison selon Denavit-Hartenberg

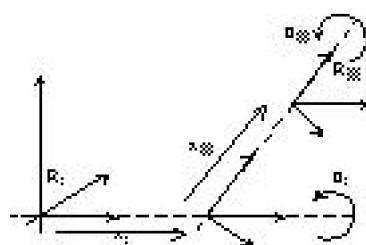


Figure 2.3 Exemple de liaison selon Denavit-Hartenberg

Ce modèle est donc le mieux adapté pour le système **KEN-001**. Pour étudier et concevoir les différentes parties mécaniques, il est d'abord nécessaire d'évoquer que le porte-échantillon ne pèse que quelques grammes ( n'excédant pas les 10 grammes ) pour une dimension de 30mm de diamètre et 4mm d'épaisseur. Ce poids est réparti uniformément sur cette dimension et en tenant compte de ces caractéristiques nous pouvons, pour étudier le déplacement de ce corps, l'assimiler à un point matériel. Mécaniquement, pour soulever et déplacer un tel corps, les forces nécessaires peuvent être considérablement réduites. De ce fait, le système mécanique sera d'un poids relativement faible. Ainsi une étude cinématique est alors justifiée, nécessaire et suffisante.

En considérant la figure 2.2 et en posant

$$\alpha = (\overline{OM}, \vec{k}), \theta = (\overline{Om}, \vec{j}),$$

avec m la projection de M sur le plan x0y. Alors le point M est repéré dans cet espace par :

$$x = \|\overline{OM}\| \sin \alpha \sin \theta$$

$$\overline{OM} \quad y = \|\overline{OM}\| \sin \alpha \cos \theta (2.5)$$

$$z = \|\overline{OM}\| \cos \alpha$$

A la limite  $0 \leq \theta \leq 2\pi$  et  $0 \leq \alpha \leq \pi$

Le mouvement du point M se fait distinctement en deux temps : un mouvement de translation de haut en bas ( et vice versa ) suivant l'axe Oz et une rotation dans le plan (x0y) et à rayon r constant. Dans la réalité, ces deux mouvements se succèdent donc on n'a pas un mouvement de lissage.

- Mouvement de rotation

La rotation se fait par rapport à l'axe oz. De ce fait l'angle  $\theta$  peut varier de [ 0 ,  $2\pi$  ], selon l'emplacement initial du porte-échantillon choisi sur le plateau

$$( \text{avec } \alpha = \frac{\pi}{2} )$$

: mais le déplacement minimum est de

$$\frac{\pi}{4}$$

- Mouvement de translation

Si nous considérons le plan ( y0z) dans lequel se trouve le déplacement du point M ( car la translation se fait uniquement lorsque  $\theta = 0$  ), alors nous obtenons la figure 2.4.

Où A : Le point le plus haut que peut atteindre M

B : le point le plus bas que peut atteindre M ( Ceci équivaut à son emplacement pour l'analyse).

K : L'emplacement initial du point M ( sur le plateau )

Posons encore un angle  $\beta$  tel que  $\beta = \pi - \alpha$ .

Si OK = L , l'angle  $\beta$  varie donc entre deux extrêmes :

$$-\arctan \frac{KB}{OK} \leq \beta \leq \arctan \frac{AK}{OK} \quad (2.6)$$

Or OK = 7 cm,

AK = 2 cm,

KB = 7 cm

Ce qui nous conduit à

$$\frac{5\pi}{12} \leq \alpha \leq \frac{3\pi}{4}$$

Figure 2.4 Mouvement du point M suivant le plan ( yoz )

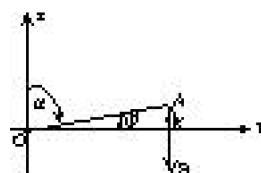


Figure 2.4 Mouvement du point M suivant le plan ( yoz )

## 2.4. Schéma cinématiques du KEN-001[ 21], [ 25]

Le schéma cinématique est une modélisation simplifiée du problème d'un système mécanique en vue d'une compréhension de celui-ci, quel que soit son niveau de complexité. Il tient uniquement compte des degrés de libertés fonctionnels. Cependant, il n'est pas le seul critère qui doit être pris en compte pour réaliser un système automatisé. Ainsi le schéma cinématique ne reflète pas le choix technologique, ni l'architecture détaillée d'un mécanisme. Par application directe du modèle de **Denavit-Hartenberg**, nous utilisons donc un système à un seul degré de liberté à la fois avec des liaisons pivot et des liaisons glissière. De ce fait nous proposons le schéma présenté par la figure 2.5.

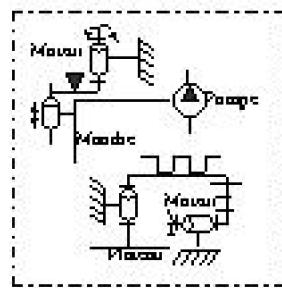


Figure 2.5 Schéma cinématique de KEN-001

## 2.5. Inventaire des pièces maîtresses

---

Dans la réalisation des systèmes mécaniques, bon nombre de pièces, souvent de natures différentes, sont utilisées. Leurs utilisations demandent pourtant des connaissances de leurs fonctionnements, leurs limites d'utilisation et surtout l'environnement dans lequel elles vont être insérées.

### 2.5.1. Engrenages

C'est un dispositif formant un ensemble de deux roues crantées (dentées) qui s'engrènent. Conventionnellement, la roue ayant le diamètre du cercle primitif le plus petit est appelé : pignon et la plus grande : couronne( figure 2.6). Il faut cependant que les deux roues aient le même pas circonférentiel  $p$  qui se définit comme étant la longueur d'arc de circonférence primitive comprise entre deux profits identiques de deux dents consécutives. On donne  $p = \frac{\pi}{2} d_1/Z_1 = \frac{\pi}{2} d_2/Z_2$ . ( 2.7 )

Avec :  $d_1$  et  $d_2$  sont les diamètres primitifs des roues 1 et 2 respectives.

$Z_1$  et  $Z_2$  sont le nombre de dents des roues 1 et 2 respectives.

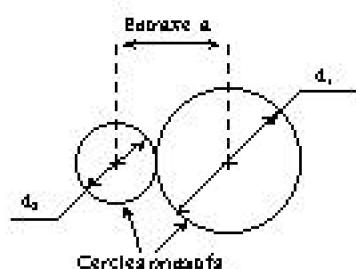


Figure 2.6 Présentation des cercles primitifs

L'atout majeur de l'engrenage réside sur l'obtention d'un rapport des vitesses constant : c'est-à-dire  $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{Z_2}{Z_1}$ . ( 2.8 )

Dans la pratique, les engrenages sont présentés avec des caractéristiques standards en rapport avec les modules. Ainsi on les choisit en fonction de la force à laquelle elles seront soumises et la propriété chimique des matériaux avec lesquels elles sont fabriquées. Le choix d'une roue dentée doit également être fonction des données sur la denture tel qu'il est résumé sur le tableau ci-dessus.

**Tableau 2.1 Résumé des principales grandeurs de denture**

## Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE SPECTROMETRIE X

---

Saillie  
=  
m  
Diamètre  
primitif  
m.Z  
Pas  
=  
m. $\square$   
Greux  
=  
1,25.m  
Hauteur  
de  
2,5m  
Diamètre  
de  
tête  
+  
2m  
Diamètre  
de  
pied  
—  
2,5  
bargeur  
de  
Remise  
Avec  
7  
 $\square$   
K  
 $\square$   
12  
Entraxe  
=  
(  
d<sub>1</sub>  
+  
d<sub>2</sub>)  
2  
Transmission  
de  
Puissance

cos  
Flexion  
de  
Farbre  
porteur  
de la  
roue  
dentée

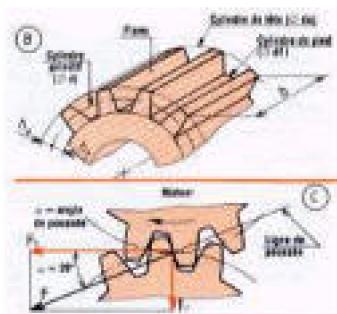


Figure 2.7 Présentation d'une denture

### 2.5.2. Les courroies

Les courroies font parties des organes fréquemment utilisées dans la transmission de mouvements de rotation sans inversion de sens brusques. Elles sont dans la plupart des cas utilisées soient pour augmenter, soient pour réduire la vitesse de rotation entre deux poulies de diamètres différents. Il y a plusieurs types de courroies mais évoquons seulement deux types.

#### 2.5.2.1. Courroies trapézoïdales

Les courroies trapézoïdales sont insérées dans lagorge de deux poulies et le rapport théorique des vitesses de telles courroies est donné par la relation :

$$\square_1 / \square_2 = d_2 / d_1 \quad (2.9)$$

Avec :  $\square_1$  et  $\square_2$  sont les vitesses de rotation respectivement de la poulie 1 et 2.

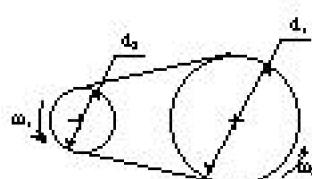


Figure 2.8 Présentation d'une courroie

$d_2$  et  $d_1$  sont les diamètres primitifs respectivement de la poulie 1 et 2.

Le diamètre primitif est le diamètre de la gorge d'une poulie prise à un certain niveau. La ligne primitive  $L_p$  qui détermine la longueur nominale de la courroie est donnée

justement en fonction de ce diamètre primitif. Pour deux poulies fabriquées avec les mêmes matériaux et ayant une tension identique, l'adhésion de la courroie est pratiquement trois fois plus élevée que pour les courroies plates. Elles comportent pourtant des inconvénients tels que : amplitude importante du réglage de l'entrave pour le montage-démontage, parallélisme des axes et coïncidence des plans médians des deux poulies doivent être ajustés avec précision. A cause de l'inévitable glissement courroie-poulie, surtout lors du démarrage, qui est compris entre 1 à 2, , le rapport réel des vitesses est sensiblement inférieur au rapport théorique donné ci-dessus.

### **2.5.2.2.Courroies synchrones**

Ce sont des courroies dentées et qui ne peuvent s'adapter qu'avec des poulies dentées munies de flaques latérales permettant le maintien de la courroie. Elles assurent une parfaite synchronisation entre les deux poulies car ils ne permettent aucun glissement. Ainsi le rapport réel des vitesses est donné par la relation :

$$\square_1/\square_2 = d_2/d_1 = Z_2/Z_1 \quad (2.10)$$

$Z_1$  et  $Z_2$  sont les nombres de dents respectives de la poulie motrice et de la poulie réceptrice. Ce type de courroie, à cause de sa bonne performance, est beaucoup utilisée pour les transmissions de mouvement dans un système automatique et robotique.

### **2.5.3. Les roulements**

Les roulements sont d'une grande utilité pour minimiser les effets de frottements sur deux composants mécaniques en contacts rotationnels. De ce fait, les résistances passives voient leurs intensités largement réduites au minimum, ce qui améliore davantage les mouvements dans le cas des systèmes automatisés. Il y a plusieurs types de roulements qui sont utilisés selon leurs caractéristiques, à savoir : roulements BC, roulements BT, roulements BE, roulements KB , etc. Hormis la dimension, le critère le plus important pour choisir un roulement est cependant la valeur de l'angle  $\square$  qui se définit comme étant le demi-angle au sommet du cône médian des chemins de roulement car la direction de la charge doit correspondre à celui-ci. Il a pourtant deux valeurs limites : 0 et 90°.

## **2.6.Materiaux de fabrications [ 2], [ 15 ], [ 27], [37]**

---

Le choix des matériaux doit se faire selon des critères satisfaisants des diverses contraintes pour ne pas citer que ; les contraintes techniques ( résistance des matériaux, ), les contraintes temps, les contraintes esthétiques, et même les contraintes financières, etc. Dans la plupart des cas, il faut trouver une attente entre ces principales contraintes et d'utiliser le matériau adéquat à chaque application. Pour une machine, il se peut que l'on utilise des matériaux de natures différentes car chaque pièce mécanique doit être étudiée d'abord séparément et ensuite en considérant les autres avec lesquelles elle sera raccordée. Pourtant, dans certaines applications, il faut aussi tenir compte de la composition physico-chimique du matériau à utiliser surtout lors d'une réalisation mécanique telle qu'un instrument de laboratoire. Pour cela, il nous faut connaître quelques propriétés des matériaux à usiner et d'introduire le problème fondamental du

choix et l'influence de celui-ci sur leurs usages. Pour notre cas, l'instrument sera placé très proche d'un faisceau de rayon X et les pièces qu'on aura à déplacer ( les porte-échantillons ) contiennent les échantillons à analyser. Essentiellement pour cette raison, le choix des composants des pièces qui seront en contact direct avec les porte-échantillons doit être minutieux. De plus il faut que ces composants aient des numéros atomiques assez faibles. Ces pièces dont il faut apporter des précautions particulières sont donc le plateau et la ventouse du système d'aspiration. Mises à part les parties mécaniques à réaliser avec du cuivre, de l'acier inox, etc..., voyons tout spécialement le plateau. Il sera réalisé avec du plastique qui fait partie d'une vaste famille de polymères.

### 2.6.1. Polymères

Il y a deux types de polymères ; les polymères naturels ( os, cuir, bois, ... ) et les polymères artificiels ( plastiques formaldéhydes, bakélite,... ). Certes, ces matériaux à base de polymères sont moins rigides et moins résistants que les métaux mais ils ont également comme avantages d'avoir des masses volumiques assez faible par rapport à ces derniers. Il existe une multitude de variété de polymères si nous ne citons que :

- Les thermoplastiques comme le polyéthylène,
- Les élastomères ou caoutchoucs,
- Les polymères naturels comme la cellulose et la lignine.

Les polymères sont faits des macromolécules avec un squelette covalent d'atomes de carbone, qui sont liées les unes aux autres par des liaisons hydrogènes ou de ***Van der Waals***, ou même par des ponts covalents supplémentaires. Le choix réside donc essentiellement sur ces composants chimiques qui ne sont constitués que majoritairement de carbone, ainsi les matières plastiques pourront convenir à notre application car le plateau ne sera pratiquement soumis à aucune contrainte mécanique. Puisque les caoutchoucs sont également des polymères et plus précisément des élastomères (de même que les plastiques ) alors il est adéquat pour notre ventouse. D'ailleurs il est en contact avec les porte-échantillons sur la surface supérieure des réflecteurs porte-échantillons. Mais cependant, il faut qu'elle ne salisse pas les porte-échantillons pour ne pas rendre encore plus difficile le lavage de ce dernier.

## 2.7. Le système mécanique [ 3], [ 8], [ 15], [ 21], [25], [27]

Nous pouvons distinguer deux sous-systèmes mécaniques de **KEN-001** : le système de la manche et le système du plateau. Puisque **KEN-001** est le seul dispositif autonome à effectuer ce type de manœuvre dans le domaine des rayons X, alors nous ne disposons d'aucune référence pour la conception de la partie mécanique. Le schéma général du système mécanique est présenté par le schéma intitulé «système complet » à l'annexe 02. Ce schéma montre, en vu de coté, l'ensemble plateau et manche. Chaque pièce est notée et répond aux désignations figurant dans le tableau suivant



*Tableau 2.2. Désignation des pièces du système complet du KEN-001*

**Tableau 2.2. Désignation des pièces du système complet du KEN-001**

---

## **Désignations**

**Soie**

Inox

**Boîte**

**guide**

**Plastique**

**Râte**

moteur

**Broche**

d'aspiration

**Plastique**

**Plastique**

des

switchers

**Plastique**

**Rebout**

et

vis

de

pression

**Acier**

filetée

M6

**Plastique**

**Choristouc**

**Choristouc**

d'aspiration

**Choristouc**

**\$Switch**

inférieur

**\$Switch**

supérieur

**Acier**

inox

**Palier**

Inox

**Plastique**

porte-échantillon

**Plastique**

(

porte-échantillon

)

**Choristouc**

crantée

**Plastique**

de  
courroie  
~~Plastique~~  
~~Plastique~~  
~~Plastique~~  
~~Plastique~~  
~~Moteur~~  
,  
12V/2W  
~~Plastique~~  
moteur

### 2.7.1. Le système du plateau

Le système du plateau contient les réflecteurs porte-échantillon en suprasil. Les porte-échantillons seront placés sur chaque compartiment qui sont numérotés de 1 à 7. Leurs dispositions y sont faites de telle sorte que les échantillons déposés sur les réflecteurs se placent en bas. Cette disposition évite la contamination par les aérosols des échantillons en entendant leur analyse respective. Pour faire tourner le plateau, plusieurs dispositifs peuvent être imaginés. Mais quoi qu'il en soit, il nous faut le faire par l'intermédiaire d'un moteur. Nous avons essayé le dispositif représenté par la figure 2.9. Il est très simple et facile à concevoir. D'ailleurs beaucoup de dispositifs sont ainsi faits. D'après nos essais, nous avons remarqué que celui-ci était sujet à des nombreux défauts :

L'arbre du rotor du moteur supporte directement toutes les masses, ce qui pourrait l'endommager rapidement compte tenu de la taille du moteur de **KEN-001**.

A cause du moment d'inertie du plateau et des réflecteurs qui y sont disposés, le démarrage se fait difficilement. De plus, lorsqu'on coupe l'alimentation du moteur, le plateau continue à tourner d'un certain angle. Cet angle n'a pas une valeur constante car elle dépend de la masse du plateau entier, donc du nombre de réflecteurs porte-échantillon sur celui-ci. Bref, compte tenu de la précision que doit avoir impérativement KEN-001, ce dispositif n'est pas utilisable.

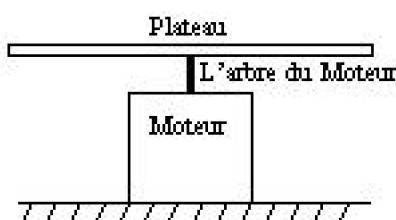


Figure 2.9 Dispositif simplifié de la conception de départ du système du plateau

Après une étude poussée des exigences de KEN-001 et ses conditions d'utilisation, nous sommes arrivés à la conception du dispositif représenté par la figure 2.10.

Le schéma simplifié représenté par la figure (2.10) montre le système du plateau vu

de dessus. Les numérotations sont interprétées sur le tableau ( 2.3 ).

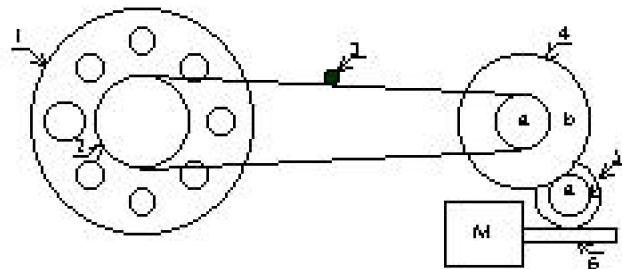


Figure 2.10 Schéma simplifié du système du plateau

Tableau 2.3 Cotes des dentures des mécanismes du plateau

# Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE SPECTROMETRIE X

---

Répétitives

Plateau

177,

e

6

Poulie

Coépatrice

e

7,4

,

Z

=

124

Tendeur

de

courroie

Poulie

étagée

14,5

,

Za

=

32,

dp<sub>b</sub>

=

53

,

Zb

=

77

Poales

=

12,5

,

Za

=

19

,

dp<sub>b</sub>

=

21,4

,

Zb

=

32

vis  
sans  
fil,  
,  
pas  
2,5

e : épaisseur

dp : diamètre primitif

z : nombre de dents.

Pour les parties 6 et 5 ( figure 2.10 ) :

Cette partie de KEN-001 est composée d'une roue et d'une vis à axes perpendiculaires comme le montre la figure 2.11. Nous l'avons choisi ainsi à cause de son grand rapport de réduction. Ce dispositif impose une poussée axiale importante de la part de la vis mais nous l'avons muni d'une butée pour en limiter la conséquence. Nous avons fait en sorte également que les angles d'inclinaison  $\alpha$  des hélices de la vis et celle de la roue  $\beta$  soient complémentaires ce qui satisfait

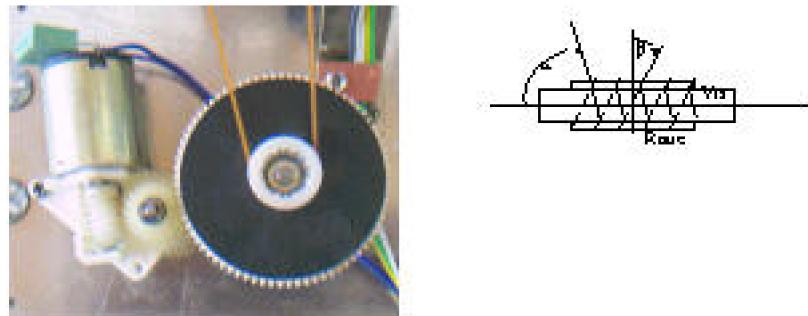


Figure 2.11 Représentation de  $\alpha$  et  $\beta$  pour un engrenage à vis

amplement la condition nécessaire pour ce type de montage. De plus  $\alpha = 10^\circ$  pour permettre au système une réversibilité de rotation.

Pour KEN-001, la vis est reliée à l'arbre du moteur et est composée de 4 filets et la roue de 32 dents ce qui permet d'avoir un rapport de vitesse de  $1/8^{\text{ème}}$ . Cette roue est étagée avec une petite de 19 dents. Les deux sont solidaires ce qui implique qu'elles ont la même vitesse de rotation.

Pour les parties 5 et 4 :

Ensuite celle-ci est connectée à un autre bloc de roue étagée. La roue plus grande de second bloc est connectée au pignon le plus petit de premier bloc pour avoir une réduction de vitesse de  $19/77^{\text{ème}}$ .

Pour les parties 4 et 2 :

La transmission de mouvement vers la roue solidaire du plateau se fait par une courroie crantée. Comme nous l'avons déjà explicité précédemment, ce type de courroie permet une transmission sans glissement. Les dentures de la courroie sont synchrones à

celles des deux roues qu'elle relie, ce qui remplit ses conditions d'utilisation. Ainsi, nous avons donc un rapport pratiquement de 8/31ème. De ce fait, KEN-001 bénéficie d'un grand rapport de réduction entre le moteur du plateau et le plateau lui-même.

Les avantages d'une telle conception pour le plateau résident sur :

La justification de l'utilisation d'un moteur de faible puissance,

La réduction des effets de démarrage du plateau vis à vis du moteur,

Lorsque l'on coupe l'alimentation du moteur, le plateau s'arrête instantanément car la force résultante causée par le moment d'inertie du système tournant entier est d'une faible intensité. Ces caractéristiques nous permettent d'affirmer que ce dispositif est idéal pour KEN-001 car il associe l'efficacité et la précision.

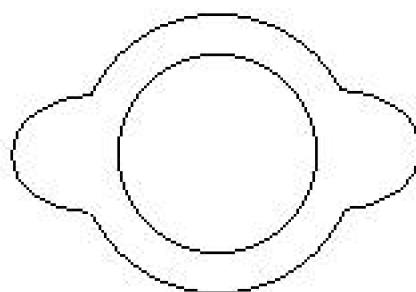
Le schéma intitulé « Le plateau » à l'annexe 03 donne les détails de fabrication du système du plateau avec les cotations.

### **2.7.1.1. La disposition des porte-échantillons**

Avant d'être placés sur le porte-réflecteur, les porte-échantillons sont d'abord posés dans des compartiments sur le plateau. Ce dernier peut contenir 7 porte-échantillons disposés chacun d'un angle de 45° l'un par rapport à l'autre. Le centre de chaque compartiment se trouve à une distance de 66 mm du centre du plateau.

### **2.7.1.2. Les compartiments des réflecteurs porte-échantillons**

C'est la partie la plus délicate du plateau. En fait, ils sont responsables ou non de la contamination des échantillons. Ils forment avec la ventouse les parties qui sont en contact direct avec les réflecteurs) Il a un diamètre de 31 mm et une profondeur de 4 mm. Les réflecteurs y sont déposés et y restent pendant quelques temps avant les analyses. Ainsi, la partie inférieure de chaque compartiment est fermée pour éviter la contamination des échantillons par des aérosols en suspension dans l'air



*Figure 2.12. Compartiment du réflecteur porte-échantillon*

### **2.7.2. Le système de la manche**

Ce système est posé verticalement et perpendiculaire à celui du plateau. Il assure la montée et la descente du porte-échantillon car sur lui est fixé le tube relié au système d'aspiration. Sa course permet un déplacement total de 11 cm de la ventouse. Pour réaliser un système répondant à ces caractéristiques, plusieurs solutions peuvent être

envisagées: entre autres celle qui fait appel à des vérins (hydrauliques ou pneumatiques) et celle qui utilise des vis d' **Archimède** . Nous avons donc étudié la possibilité d'utiliser du vérin. Signalons qu'il y a deux types de vérins d'usage habituels ; vérin simple effet et vérin double effet. Le système **KEN-001** a besoin d'avoir une manche pouvant avoir une course et une force relativement faible.

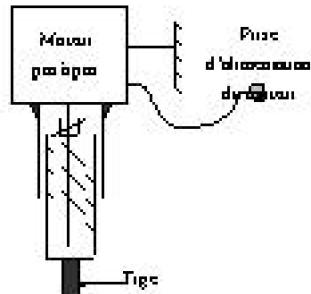


Figure 2.13 Vérin pousseur à écrou fixe

En réalité, la manche supportera juste le poids du réflecteur porte-échantillon et du tuyau d'aspiration qui est en matière P.V.C. Dès la conception alors, nous avons écarté l'utilisation des vérins à cause du fait qu'ils sont spécialement utilisés pour développer des forces importantes. Nous avons alors pensé aux vérins spéciaux comme le montre la figure 2.12. On l'appelle vérin pousseur à écrou fixe à vis sortante. Il est actionné par un moteur pas à pas. Ce type de vérin est utilisé pour des précisions car un pas du moteur entraîne un déplacement de 1 µm. Il a un faible encombrement. Théoriquement, le vérin spécial serait l'idéal pour constituer la manche de KEN-001, mais il est connu également qu'il est réputé pour son prix élevé. De plus le capteur de position intégré détecte des positions standard de 4, 10, 16, 25 mm. Aucune ne figure donc dans nos exigences c'est à dire à partir de la position initiale 20 mm et 70 mm vers le bas. Ces raisons nous ont poussé à abandonner cette idée car elle n'est pas conforme à notre cahier de charge.

Nous avons alors exploité le principe de la vis d' **Archimède** . La figure 2.14 représente la conclusion de nos études. La base d'une telle conception repose sur la conversion d'un mouvement de rotation en mouvement de translation. En effet lorsqu'on tourne un écrou sur une vis, le premier se déplace le long de ce dernier. Pour notre application, nous avons inversé le rôle de chacun c'est à dire nous faisons tourner la vis pour avoir le déplacement de l'écrou vers le haut ou le bas selon le sens de rotation de la vis. Nous avons fixé des poulies sur la vis et sur l'arbre du rotor du moteur. Le moteur fait alors tourner la vis par l'intermédiaire d'une



*Figure 2.14 Schéma simplifié du système de la manche du KEN-001*

transmission par courroie. Nous avons respecté le parallélisme des axes des poulies et la coïncidence des plans médians. Ceci nous permet d'utiliser une courroie trapézoïdale car de ce fait son glissement est 1 à 2 % ( ce qui est pratiquement négligeable ). De plus, la vitesse de rotation du moteur est choisie pour une valeur assez faible. Sur les deux bases de la vis, nous avons collé un cuivre comme le montre le schéma intitulé « Butée inférieure » à l'annexe05 . Ceci vient du fait que les bases en plastique pourront s'endommager rapidement lors de l'utilisation. En utilisant du cuivre la durée de vie des bases est prolongée ce qui améliore la fiabilité de la manche. Pour minimiser les frottements nous lubrifions donc les bases et la vis.

Les avantages de ce système sont :

Une course importante en fonction de la vis ( dans notre cas nous nous sommes limités à 11 cm ).

La possibilité d'utiliser un moteur de faible puissance,

Un coût réduit par rapport aux autres possibilités,

Une possibilité de réalisation avec les moyens locaux,

Une précision pouvant aller jusqu'à 1µm pour un tour du moteur si les deux poulies sont dimensionnées avec un rapport adéquat.

Ces inconvénients résident essentiellement sur le fait qu'il n'est pas accompagné d'aucun capteur de position intégré. Il est assez fragile et ne pouvant donc être utilisé pour des applications nécessitant des forces importantes sauf si on change le type de moteur et l'organe de transmission.

Mais pour remédier à l'absence de capteurs alors nous l'en avons adjoint. Précisons qu'il nous faut déterminer trois positions de la manche du KEN-001 :

Haute ( position de repos ),

Intermédiaire ( relative à la prise des réflecteurs sur le plateau ),

Basse ( relative au dépôt du réflecteur sur le porte réflecteur de la chaîne de mesure ).

Il nous faudrait alors trois capteurs mais plus les capteurs sont nombreux plus les circuits électroniques associés sont nombreux. Mais en analysant les positions de la manche de KEN-001, nous avons remarqué qu'en fait nous pouvons réduire celles - ci en deux : haut et bas. Un capteur sert de détecter la position haute et un autre pour les deux autres. Ainsi les positions intermédiaire et basse sont distinguées par l'organe de traitement. La position du deuxième capteur est montrée sur le schéma intitulé «la manche» à l'annexe 04 . Comme le montre ce schéma, le capteur est solidaire à la manche ( qui sert également de tuyau d'aspiration ) et un écrou est relié à une tige en plastique vers la manche. Nous avons donc deux blocs qui sont reliés par un ressort muni d'une vis. Cette vis sert à la fois de guidage et de réglage de l'écart de repos. Compte tenu de ces rôles, nous utilisons un ressort à boudin qui est surtout utilisé en compression. Ce dernier est une pièce maîtresse des deux blocs et a dû être dimensionnée correctement. Pour les caractéristiques de ce ressort, il fallait tenir compte du diamètre du fil, du nombre de spires, de la longueur libre  $L_o$ , de la flexibilité, du raideur du ressort, et du raideur en torsion du ressort. Pour cette partie de KEN-001, nous avons choisi : ( figure 2.14 )  $d = 0,56 \text{ mm}$ ,  $D_m = 6 \text{ mm}$ ,  $L_o = 14 \text{ mm}$ . le ressort est réalisé avec du maillechorts ( Cu Zn 22 N 18 ). Ces valeurs ont été calculées pour que le ressort ne soit pas soumis au flambage ( C'est à dire  $D_m \square 10$  et  $L_o \square 5 D_m$  ). Alors lorsque la manche se déplace vers le haut, la vis supporte tout le poids car la distance Dr est réglée à la longueur au repos du ressort. En fait le ressort ne s'active qu'à un moment précis. En effet, lors d'une descente, lorsque la manche se heurte à un obstacle, le ressort se comprime jusqu'à ce que le capteur soit activé par la languette reliée à l'écrou, ce qui entraîne l'arrêt du moteur.



Figure 2.15 Configuration du ressort de la manche

De cette façon, puisqu'elle se heurte à un obstacle deux fois ( sur le réflecteur posé sur le plateau et sur le porte-réflecteur ) alors un seul capteur est suffisant.

Les avantages de ce dispositif sont : un poids léger et une possibilité de réglage de la vis selon une condition optimum de fonctionnement.

Le schéma intitulé « La manche » à l'annexe 04 montre l'ensemble du système de la manche en vu de côté.

### 2.7.3. Le dispositif de prise des réflecteurs porte-échantillons

Cette partie exige une précaution particulière puisqu'elle est l'objet principal du système de la manche. Cette précaution n'est pas axée de point de vu de la précision mais surtout de propreté et de la non-contamination des échantillons. En effet, elle touche directement les porte-échantillons. Pour ce type de tâches, on peut répertorier, par rapport aux moyens actuels, différentes possibilités techniques qui possèdent chacune des limites et des caractéristiques propres.

D'abord, il faut se rappeler que la mesure diamétrale du porte-échantillon ne laisse que 0,5 mm d'espace de part et d'autres des cotés lorsqu'il est dans le compartiment prévu pour l'analyse. Le dilemme est alors d'y insérer le porte-échantillon et de l'y enlever sans causer de dommage, ni à l'échantillon, ni au réflecteur. Nous avons donc essayé chaque solution pour en tirer la meilleure.

### **2.7.3.1. Possibilité mécanique**

Cette technique est la plus répandue dans le domaine de l'industrie, de la robotique et de l'automatique. Elle présente un atout majeur : c'est de pouvoir tenir une masse importante et de la déplacer ensuite. Nous avons donc étudié cette possibilité pour notre réalisation. Alors pour plus de sûreté, il nous a fallu concevoir une prise en utilisant une pince mécanique avec au moins 2 mors. Notre étude nous a mené à l'aboutissement de la pince présentée par la figure 2.15. Mais pour la réalisation nous avons rencontré les problèmes suivants : Pour que la pince soit vraiment efficace, il fallait utiliser 3 mors ou plus au lieu de deux. De plus les mors

l'automatique. Elle présente un atout majeur : c'est de pouvoir tenir une masse importante et de la déplacer ensuite. Nous avons donc étudié cette possibilité pour notre réalisation. Alors pour plus de sûreté, il nous a fallu concevoir une prise en utilisant une pince mécanique avec au moins 2 mors. Notre étude nous a mené à l'aboutissement de la pince présentée par la figure 2.15. Mais pour la réalisation nous avons rencontré les problèmes suivants : Pour que la pince soit vraiment efficace, il fallait utiliser 3 mors ou plus au lieu de deux. De plus les mors devaient impérativement avoir chacun une épaisseur strictement inférieure à 0,5mm. En effet, des épaisseurs proches de 0,5mm accroîtra d'avantage la nécessité de précision de la manche, ce qui est pratiquement irréalisable compte tenu de nos moyens de réalisations. Puisqu'il faut déterminer la force nécessaire pour tenir le réflecteur, alors il aurait fallu utiliser un capteur de force qui aurait permis de stopper le moteur. Mais les jauge extensométries sur le marché actuel n'ont aucunes dimensions qui soient assez petites pour nos mors. Ces problèmes techniques nous ont poussé à conclure que cette technique n'est pas adaptée à notre application si on veut avoir plus d'efficacité et de fiabilité.

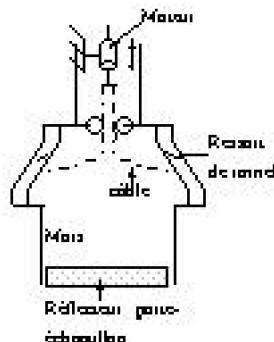


Figure 2.16 Pince mécanique avec deux mors

devaient impérativement avoir chacun une épaisseur strictement inférieure à 0,5mm. En effet, des épaisseurs proches de 0,5mm accroîtra d'avantage la nécessité de précision de la manche, ce qui est pratiquement irréalisable compte tenu de nos moyens de réalisations. Puisqu'il faut déterminer la force nécessaire pour tenir le réflecteur, alors il aurait fallu utiliser un capteur de force qui aurait permis de stopper le moteur. Mais les jauge extensométriques sur le marché actuel n'ont aucunes dimensions qui soient assez petites pour nos mors. Ces problèmes techniques nous ont poussé à conclure que cette technique n'est pas adaptée à notre application si on veut avoir plus d'efficacité et de fiabilité.

### 2.7.3.2. Possibilités électromécaniques

Avec cette possibilité, on peut encore soulever des tonnes de masse métalliques. Elle consiste surtout à utiliser un électroaimant dont la force résultante nécessaire fournie par les champs magnétiques est fonction de la masse à soulever. Elle est donc valable aussi pour des masses de faibles valeurs. Le schéma de principe d'un tel système est présenté par la figure 2.16. En fait, la valeur de la masse à soulever est proportionnelle au courant circulant dans le solénoïde et du nombre de spires. Cette technique est la plus facile et la plus pratique à réaliser et ne produit aucun bruit lors de son fonctionnement. Compte tenu de notre application, un courant assez faible mais avec un certain nombre de spires a été nécessaire pour que cela soit fonctionnel. Mais une fois encore nous nous sommes confrontés à un problème incontournable. En fait, il fallait coller une plaque métallique sur la surface supérieure du réflecteur. Or un réflecteur est à usage fréquent c'est-à-dire qu'avant chaque usage, il faut le laver avec un produit adéquat et de l'eau bi-distillée pour enlever toutes impuretés. La plaque de métal peut donc compliquer d'autant plus ce processus de lavage voire même une impossibilité d'éliminer la contamination par le fer. Déjà, naturellement, le taux de fer dans la nature est très élevé et du fait de la rouille de la plaque à longueur de temps, la contamination en fer sera donc accentuée. De plus, on est obligé de modifier le réflecteur en y collant un métal, ce qui est contradictoire à notre charge (ne pas modifier le système). Ces raisons nous ont conduit à ignorer cette technique et à chercher d'autres solutions.

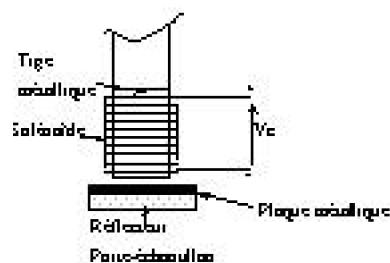


Figure 2.17 Schéma descriptif d'un Système à électroaimant

### 2.7.3.3. Possibilité pneumatique

L'utilisation de la méthode pneumatique est une méthode très répandue dans beaucoup de domaine. L'utilisation la plus courante de ce genre de technique est l'exploitation du principe de **Venturi**. Dans la plupart des cas, cette technique est utilisée dans la saisie des pièces relativement légères. Alors nous avons également expérimenté cette possibilité puisqu'il peut répondre à nos besoins. Le schéma simplifié que nous avons élaboré est montré par la figure 2.17. Le principe d'un tel dispositif est basé sur la création d'une basse pression dans la branche du réseau reliée à la ventouse. Selon cette figure, le souffleur sert à déplacer du vent à une très grande vitesse à travers le dispositif. Cet air a donc un composant horizontal et sort par une fente assez large vers l'extérieur. Une fente reliée à la ventouse est percée verticalement par rapport à la direction de ce flux d'air. Ainsi, il se produit une dépression dans cette branche. La force engendrée par celle-ci est alors équilibrée par celle du poids du réflecteur porte-échantillon. L'efficacité de ce dispositif réside essentiellement sur la puissance du souffleur car plus l'air se déplace à grande vitesse, plus la dépression est grande donc une bonne prise. Techniquement, ce type de dispositif ne pose pas de problème de réalisation. Mais il faut un souffleur assez puissant pour qu'il marche, ce qui est synonyme de bruit car un souffleur est puissant si son moteur est puissant. Ce dispositif est relié au bout de la manche, donc très près des réflecteurs. Lors de nos essais, nous avons constaté que sur l'air environnant, le flux d'air produit un effet de turbulence assez fort. Pourtant l'air environnant a des particules en suspensions qui peuvent affecter les échantillons sur les réflecteurs. Ceci est donc la principale cause qui nous a conduit à ne pas l'utiliser si nous ne voulons pas avoir des résultats d'analyse perturbés par les aérosols déplacés par l'effet de turbulence. De plus un flux d'air de cette envergure n'est pas commode dans une salle d'analyse.

Les méthodes les plus utilisées de nos jours ne peuvent donc s'adapter à notre besoin si nous ne voulons pas changer la géométrie de la chaîne tout en conservant la fiabilité de cette dernière. Pour répondre à nos exigences nous avons donc imaginé le dispositif suivant qui est basé sur l'utilisation des ventilateurs en créant une forte dépression. L'étude de celui-ci est l'objet du chapitre III.

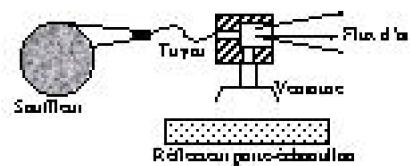


Figure 2.18 Ventouse à Venturi

## 2.8 Conclusion

Tout comme les autres parties, celle de la mécanique tient un rôle important dans la constitution de **KEN-001**. Pour cela, elle se doit d'être précise. Les matériaux de fabrication ne pouvaient pas être choisis par hasard ou n'importe comment, surtout les parties qui sont en contacts directs avec les porte-échantillons car les échantillons posés dessus sont très délicats à la manipulation à cause de la dimension de l'échantillon à analyser et de la sensibilité de la chaîne d'analyse. Différents matériaux devront donc constituer la partie mécanique selon leur nature, leur rôle et leur place chacun. Il faut également que la mécanique s'insère parfaitement au système déjà en place et puisse assurer sa fonction normalement.

**Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE  
SPECTROMETRIE X**

---

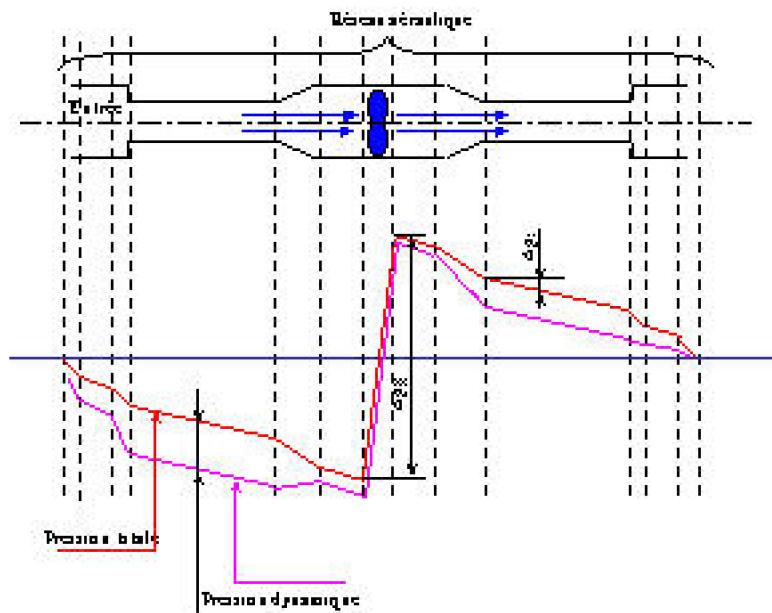
# CHAPITRE III

## 3. Le système d'aspiration

### 3.1 Etude du système d'aspiration [ 2 ], [ 14 ], [ 28 ], [ 29 ], [ 34 ]

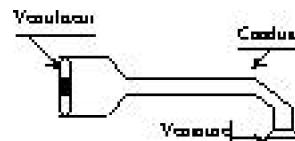
---

Cette partie aéraulique est primordiale et se doit d'être traitée avec précaution pour avoir une bonne confiance sur la fiabilité du système à inventer. En effet la prise des porte-échantillons, est confiée à ce système aéraulique. Dans la majorité des cas, un ventilateur est utilisé pour accélérer l'air c'est à dire que l'air qui en sort, possède une vitesse plus grande qu'à l'entrée. Si nous observons les allures des pressions à l'intérieur d'un réseau ( figure 3.1 ), nous voyons alors une certaine symétrie de la pression totale en amont et en aval d'un ventilateur inséré au milieu de celui-ci. D'habitude, la plupart des applications exploite les caractéristiques en aval du ventilateur surtout dans le domaine de l'industrie alimentaire qui manipule les sachets d'emballages. Mais compte tenu de cette symétrie, nous pouvons alors exploiter les caractéristiques en amont pour le système d'aspiration de **KEN-001** car techniquement rien ne nous en empêche.



*Figure 3.1 Allure des courbes de pressions à l'intérieur d'un réseau aéraulique.*

Puisque notre application n'est encore répandue alors développons les grandeurs caractéristiques d'un tel dispositif et les points les plus importants pour en comprendre le fonctionnement. Cette étude est alors en relation directe avec l'aéraulique dont l'objet est principalement la caractérisation du déplacement de l'air. Les ventilateurs, reliés à une ventouse, offrent une bonne stabilité car ils ne subissent qu'un mouvement de rotation autour d'un axe. Pour leur faire soulever une masse, on peut alors envisager d'amorcer une pré-action en insérant une chambre de décompression. Ainsi la prise d'une pièce à soulever sur la ventouse sera établie en ouvrant une électrovanne (ou tout autre dispositif assurant la même fonction) avec un ventilateur qui fonctionne continuellement. Mais en fonction de la puissance, du rendement du ventilateur, de la qualité du circuit aéraulique et de la masse à soulever, il se trouve parfois que l'on peut se passer de la chambre de décompression. Et c'est notre cas



*Figure 3.2 Schéma simplifié du système d'aspiration*



*Figure 3.3 Représentation des forces agissant sur le réflecteur porte-échantillon*

Pour nos études, distinguons alors trois points importants. D'abord les ventilateurs ainsi que leurs principaux caractéristiques. Ensuite, l'étude des pertes de charges et la relation entre la masse à soulever et la pression nécessaire pour soulever le réflecteur porte-échantillon. Ainsi pour déterminer la valeur de la dépression sur la ventouse, il faut obligatoirement considérer les pertes de charge. Nous évoquerons alors quatre points essentiels où elles se manifestent :

Conduit droit,

Rétrécissement d'un conduit,

Elargissement d'un conduit,

Coude d'un conduit.

Dans ce cas la force sur la ventouse est

$$W = P_r \cdot S \quad (3.1)$$

Avec  $P_r$  : La pression réelle sur la ventouse

$S$  : la section de la ventouse ;

C'est alors qu'il faut égaliser  $W$  au poids de l'objet à soulever c'est-à-dire  $W = P = m \cdot g$

Avec  $m$  : la masse de l'objet

$g$  : l'accélération de la pesanteur.

Il y a alors trois cas possibles liant le poids ( $P$ ) et la force  $W$ .

Soit

$W \square P$  ; Impossible de coller l'objet sur la ventouse.

$W = P$  ; On peut à peine coller l'objet sur la ventouse mais la condition est à la limite ce qui peut entraîner une certaine incertitude car l'équilibre est trop fragile.

$W \square P$  ; En supposant qu'il est impossible que l'objet soit aspiré à l'intérieur de la ventouse, alors cette condition est la plus sûre.

Quoique dans notre cas, on fera en sorte que la condition  $W \square P$  soit remplie et de plus la surface de la ventouse est inférieure à celle de l'objet et que celui-ci n'est pas

déformable par les forces à quoi il sera exposé. De plus, la surface de l'objet doit être aussi lisse que possible pour qu'il n'y ait pas d'avantage de perte de pression due à la non-étanchéité, qui peut entraîner l'impossibilité d'une telle opération.

$$\text{Ainsi } W = P_r \cdot S = m \cdot g$$

D'où la valeur de la masse maximale qu'on peut soulever est donnée par la relation :

$$m = \frac{P_r S}{g} \quad (3.2)$$

Pour une pression fixée, la masse de l'objet doit être inférieure à celle donnée par la relation (3.2).

$P_r$  est la pression sur la ventouse et qui se déduit de la pression réelle  $P_v$  fournie par la machine aspirante après la considération des pertes de charges dans le réseau. Alors  $P_r$  et  $P_v$  doivent vérifier la relation  $P_r \leq P_v$ . Pour cela étudions d'abord la machine aspirante et puis les pertes de charges dans le réseau entier.

## 3.2. Généralités sur les ventilateurs [ 29 ], [ 32 ], [ 34 ], [ 38 ]

---

### 3.2.1. Caractéristiques générales des Ventilateurs

Les ventilateurs sont des turbo-machines dont le rôle est de comprimer (ou aspirer) des fluides gazeux et permettant ainsi d'avoir des faibles ou des fortes surpressions (ou dépressions). Ils sont classés selon la trajectoire du fluide à quoi ils impriment des mouvements mais aussi leurs emplacements dans le circuit à considérer. En effet, pour un ventilateur, l'application de la quantité de mouvement en un volume fini, en se plaçant du point de vue de **Lagrange**, nous permet d'écrire qu'au temps  $t$  une masse précise contenue dans un volume  $D$  subit une variation de quantité de mouvement

$$\sum \frac{dm}{dt} \vec{v}$$

D'ailleurs le théorème d' **Euler** appliqué à cette étude permet d'écrire que :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \iiint_D \frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} dV + \iint_S \vec{v} \cdot \rho (\vec{v} \cdot \vec{N}_e) dS \quad (3.3)$$

traduisant le fait que l'ensemble des forces extérieures au système équivaut, pour celui-ci, à la variation de la quantité de mouvement par unité de temps et  $\square$  étant la contrainte à la surface  $S$ .

Ceci explique alors que ce théorème tient compte :

Des forces de pesanteur appliquées au volume fluide,

Des forces exercées par une machine située à l'intérieur du volume, mais agissant à l'extérieur,

Des forces de pressions,  
D'éventuelles forces de frottement.

Considérons alors les deux types de ventilateurs les plus utilisés et faisons-en les études pour pouvoir choisir lequel est le mieux adapté à nos besoins.

### 3.2.2. Ventilateurs centrifuges

#### 3.2.2.1. Définition

Ce sont des turbopompes pouvant être réalisées avec une ou plusieurs roues, à écoulement radial engendré par l'action de la force centrifuge et des forces de **Coriolis**. Il y a principalement deux classes de pompes centrifuges : d'une part, les pompes à écoulement forcé par les canaux de roue et d'autre part celle dites à écoulement libre avec un propulseur ouvert. Les différences entre ces deux classes viennent essentiellement des éléments tels que :

- le nombre de roues :
- Les pompes à une roue ou encore pompes à un étage,
- Les pompes à plusieurs roues ou pompes multicellulaires (pour des roues arrangeées en série)
- La disposition de l'axe de l'arbre : Elle peut être aussi bien horizontale ( pompes horizontales ) que verticale ( pompes verticales ).

Et une des caractéristiques importantes reste la forme de la roue car d'elle dépend le type d'aspiration. Selon la disposition des roues, on distingue les pompes :

- à roue à simple aspiration ( à une ouïe )
- à roue à double aspiration ( à deux ouïes )

Et en fonction de tubulaire d'entrée aussi, on distingue :

- Les pompes à entrée axiale, construites avec des roues à une ouïe ( Le type de pompe le plus répandu )
- les pompes à entrée latérale, construites avec des roues à deux ouïes.

#### 3.2.2.2. Etude d'un ventilateur centrifuge idéal

Pour connaître le comportement d'un ventilateur centrifuge idéal, étudions d'abord le triangle de vitesses. C'est une représentation des compositions des vecteurs vitesses par rapport au plan méridien. Il est référé à l'entrée et à la sortie du rotor ( figure 3.4 ). En un point quelconque de la roue, la vitesse peut être décomposée en trois composantes distinctes : la vitesse axiale  $V_a$ , la vitesse radiale  $V_d$ , la vitesse tangentielle  $V_t$ . La vitesse absolue

$$\bar{V} = \bar{V}_e + \bar{V}_r,$$

se trouvant dans le plan méridien où est définie la vitesse

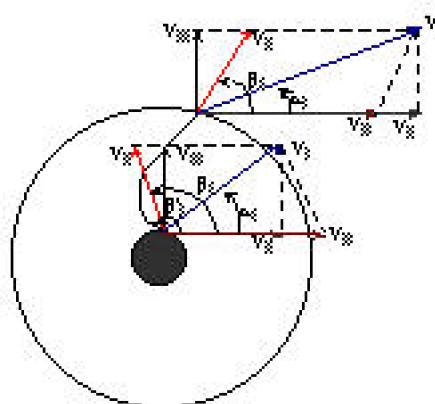
méridienne  $V_m = V_d + V_r$  est due à deux mouvements :

- Mouvement d'entraînement qui est associé au rotor engendrant la vitesse  $V_e = \omega \wedge r$ ,

Où :  $\omega$  : vitesse angulaire du rotor,

$r$  : la distance du point considéré à l'axe.

- Mouvement relatif du fluide par rapport au rotor.



*Figure 3.4 Triangle des vitesses pour un ventilateur centrifuge*

- Equation de continuité

En se référant à la figure ( 3.4 ) et en appliquant l'équation de continuité pour un fluide incompressible, nous avons la conservation des débits volumique :

$$Q = 2\pi r_1 e_1 V_m = 2\pi r_2 e_2 V_m \quad (3.4)$$

Où :  $e$  : la largeur de la section normale à l'écoulement méridien

Remarque

Pour un débit volumique et rayon de sortie donnée :

$V_{m2}$  ne dépend que de l'angle  $\beta_2$ ,

$V_{e2}$  ne dépend que de  $r_2$  et de  $\omega$ ,

$V_2$  dépend de la valeur de l'angle  $\beta_2$  et entraîne que  $V_2$  ( $\beta_2 < \pi/2$ )  $>$   $V_2$  ( $\beta_2 > \pi/2$ ).

- caractéristiques d'un ventilateur centrifuge idéal

En gardant les hypothèses requises pour un cas idéal et en appliquant l'équation de **Bernoulli** entre l'entrée et la sortie de la roue, on a :

$$\left( \frac{p_2}{\omega} + \frac{V_{r2}^2}{2g} + z_2 \right) - \left( \frac{p_1}{\omega} + \frac{V_{d1}^2}{2g} + z_1 \right) = \Delta H_m \quad (3.5)$$

Mais en écrivant ce théorème par rapport à la trajectoire relative, on peut écrire encore :

$$\left( \frac{p_2}{\omega} + \frac{V_{r2}^2}{2g} + z_2 \right) - \left( \frac{p_1}{\omega} + \frac{V_{r1}^2}{2g} + z_1 \right) = \frac{V_{r2}^2 - V_{r1}^2}{2g} \quad (3.6)$$

De plus en se referant au triangle de vitesses, on a :

$$V_r^2 = V_\infty^2 + (V_\infty - V_t)^2 = V^2 - V_t^2 + (V_\infty - V_t)^2 = V_\infty^2 + V^2 - 2V_\infty V_t \quad (3.7)$$

Et en combinant les équations (3.5), (3.6) et (3.17), on a la hauteur manométrique du ventilateur

$$\Delta H_m = \frac{V_{r2} \cdot V_\infty - V_{r1} \cdot V_\infty}{g} \quad (3.8)$$

Si le fluide entrant ne subit aucune giration, ce qui entraîne  $V_{t1} = 0$ , on a :

$$\Delta H_m = \frac{V_{r2} V_\infty}{g} \quad (3.9)$$

Dans le cas général où le fluide entre avec une certaine pré-giration due au ventelles, la relation (3.9) devient :

$$\Delta H_m = \frac{V_{r2}}{g} \left( V_{r2} - \frac{r_1}{r_2} V_{r1} \right) \quad (3.10)$$

Dans la pratique, il est plus commode d'exprimer  $\Delta H_m$  en fonction du débit volumique. En effet en tirant des équations de continuité et du triangle de vitesse les relations suivantes :

$$\begin{aligned} V_r &= \frac{q}{2\pi r} \\ V_{r2} &= V_{r1} + \frac{V_{r1}}{\operatorname{tg} \beta_2} \quad (3.11) \\ V_{r1} &= \frac{V_{r1}}{\operatorname{tg} \alpha_1} \end{aligned}$$

Et en les remplaçant dans (3.10) et en arrangeant, on obtient :

$$\Delta H_m = \left( \frac{r_2}{g} \right) \omega^2 + \left( \frac{\cot \beta_2}{2\pi r_2 g} - \frac{\cot \alpha_1}{2\pi r_1 g} \right) q = K_1 \omega^2 + K_2 \omega q \quad (3.12)$$

où  $K_1$  et  $K_2$  sont liés aux dimensions géométriques de la roue. Leurs signes sont :

$K_1 > 0$ ,

Et si :  $\beta_2 < \pi/2 \rightarrow \cot \beta_2 > 0 \rightarrow K_2 > 0$

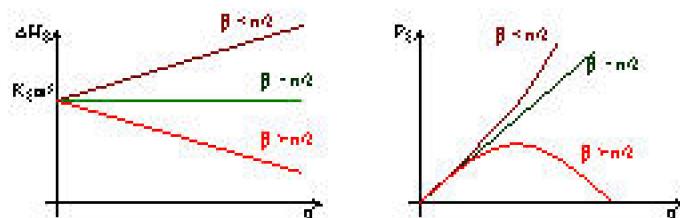
$\beta_2 = \pi/2 \rightarrow \cot \beta_2 = 0 \rightarrow K_2 = 0$

$$\beta_2 > \pi/2 \rightarrow \cotg \beta_2 < 0 \rightarrow K_2 < 0$$

Ainsi la puissance utile  $P_u$  s'écrit :

$$R = \Delta p_m q = \rho g \Delta H_m q \quad (3.13)^{*}$$

Les allures de  $\Delta H_m$  et de  $P_u$  sont données à la figure (3.5) pour les différentes valeurs de  $\beta_2$ .



*Figure 3.5. Allures des caractéristiques des ventilateurs centrifuges idéaux*

Remarques

Le paramètre d'incidence  $\alpha_1$  a une valeur pratique proche de  $\pi/2$  et sa faible variation affecte peu les valeurs de  $\Delta H_m$  et de  $P_u$ , mais permet le réglage du ventilateur par l'orientation des ventelles.

### 3.2.3. Ventilateur axial

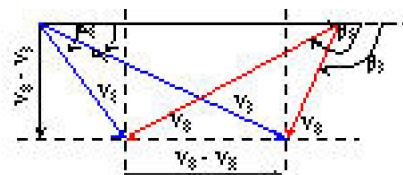
#### 3.2.3.1. Définition

C'est une turbopompe dont l'air, pendant la compression, subit un mouvement hélicoïdal. De ce fait, elle garde un écart constant entre l'axe de rotation de la roue et la veine fluide. Dans le cas d'un ventilateur axial, les vitesses d'entraînements sont les mêmes à l'entrée qu'à la sortie ( $V_{e2} = V_{e1}$ ). En dressant les triangles de vitesses à l'entrée et à la sortie d'une roue et en se servant du  $V_e$  comme base commune, alors nous avons la représentation ci-dessus. En considérant l'équation de continuité, on a :

$$Q = V_{a1} S_1 = V_{a2} S_2 \quad (3.14)$$

Or  $V_{a2} = V_{a1}$  et d'autre part  $S_2 = S_1$  et de plus  $V_m = V_a$ , nous obtenons alors :

$$V_e = \frac{q}{S_1} = \frac{q}{S_2} = V_{a2} = V_a = V_m \quad (3.15)^{*}$$



#### 3.2.3.2. Etude d'un ventilateur axial idéal

En appliquant le théorème de **Bernoulli**, de la même manière que pour le ventilateur

centrifuge, on aboutit toujours à la relation (3.5). Par apport à un mouvement relatif, cette relation s'écrit :

$$\left( \frac{p_2}{\omega} + \frac{V_{r2}^2}{2g} + z_2 \right) - \left( \frac{p_1}{\omega} + \frac{V_{r1}^2}{2g} + z_1 \right) = \frac{V_{e2}^2 - V_{e1}^2}{2g} = 0 \quad (3.16)$$

La relation (3.4) est toujours valable et en la portant dans (3.5) et (3.16), on tire :

$$\Delta H_e = \frac{V_e}{g} (V_{r2} - V_{r1}) \quad (3.17)$$

Or en utilisant le triangle des vitesses, on peut tirer :

$$V_{r2} = V_e + V_a \cot g \beta_2 \quad (3.18)$$

$$V_{r1} = V_a \cot g \alpha_1 \quad (3.19)$$

En portant (3.18) et (3.19) sur (3.17), on a :

$$\Delta H_e = \frac{V_e^2}{g} + \frac{V_e}{g} V_a (\cot g \beta_2 - \cot g \alpha_1) \quad (3.20)$$

Et en tenant compte de l'équation de continuité, on obtient :

$$\Delta H_e = \frac{V_e^2}{g} + \frac{V_e}{g} \cdot \frac{q}{S} (\cot g \beta_2 - \cot g \alpha_1) \quad (3.21)$$

De plus comme  $V_e = \omega r$ , on a :

$$\Delta H_e = \left( \frac{r^2}{g} \right) \omega^2 + \left[ \frac{r}{gS} (\cot g \beta_2 - \cot g \alpha_1) \right] \omega q \quad (3.22)$$

Et on peut encore écrire :

$$\Delta H_e = K_1 \omega^2 + K_2 \omega q \quad (3.23)$$

Nous constatons que l'équation (3.23) est analogue à l'équation (3.12).

### 3.3 Coefficient de Rateau

Le coefficient de Rateau caractérise une machine idéale traversée par un fluide incompressible. Nous avons vu que la hauteur manométrique s'écrit sous la forme :

$$\Delta H_e = K_1 \omega^2 + K_2 \omega q \quad (3.24)$$

Ainsi le fluide reçoit une puissance mécanique qui s'écrit par:

$$P_m = Q \Delta p = Q \rho g H_m = \rho g (K_1 \omega^2 q + K_2 \omega q^2) \quad (3.25)$$

En adimensionnaliser l'équation (3.22) et en divisant par une relation homogène à une longueur

$$\left( \frac{\omega^2 r_i^2}{g} \right),$$

on a :

$$\left[ \frac{gH}{\omega^2 r_i^2} \right] = 1 + a(\alpha_1, \alpha_2, r_i) \left[ \frac{q}{\omega r_i} \right] \quad (3.26)$$

Avec  $a$  : un coefficient relatif aux dimensions géométriques.

Alors si de plus on pose :

$$\begin{aligned} \mu &= \left[ \frac{gH}{\omega^2 r_i^2} \right] = \left[ \frac{gH}{u_i^2} \right] \quad (3.27) \\ \delta &= \left[ \frac{q}{\omega r_i} \right] = \left[ \frac{q}{u_i r_i} \right] \end{aligned}$$

Car  $u = \omega \cdot r$

Alors ( 3.26) peut s'écrire sous la forme:

$$\mu = 1 + a\delta \quad (3.28)$$

Donc c'est l'équation d'une droite dont 'a' est le coefficient directeur et d'ordonnée '1'.

En adimensionnaliser l'équation relative à la puissance ( 3.25), on a encore :

$$P = \rho g \left[ \frac{r_i^2 \omega^2}{g} q + a(\alpha_1, \beta_1, r_i) \omega q^2 \right] \quad (3.29)$$

Ou

$$P = \rho \left[ u_i^2 q + a(\alpha_1, \beta_1, r_i) \frac{u_i}{r_i} q^2 \right] \quad (3.30)$$

Soit on peut encore utiliser :

$$P = \rho \left[ \left( u_i^3 r_i^{-2} \left( \frac{q}{u_i r_i^2} \right) + \left( \frac{\cot g \beta_i r_i}{2\pi \epsilon_i} \right) u_i^3 r_i^{-2} \left( \frac{q}{u_i r_i^2} \right)^2 \right) \right] \quad (3.31)$$

que l'on peut écrire sous la forme :

$$\frac{P}{\rho(u_i^3 r_i^{-2})} = \frac{q}{u_i r_i^2} + \left( \frac{\cot g \beta_i r_i}{2\pi \epsilon_i} \right) \left( \frac{q}{u_i r_i^2} \right)^2 \quad (3.32)$$

En posant

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P}{\rho(u_i^3 r_i^{-2})} \\ \alpha &= \left( \frac{\cot g \beta_i r_i}{2\pi \epsilon_i} \right) \end{aligned} \quad (3.33)$$

On obtient donc une équation de la forme

$$\tau = \delta + \alpha \delta^2 \quad (3.34)$$

Alors de l'équation (3.26) et (3.30), on définit :

$\mu$  : coefficient manométrique de Rateau,

$\delta$  : coefficient de débit de Rateau,

$\tau$  : coefficient de puissance de Rateau.

Remarques :

Les équations (3.28) et (3.38) montrent que toutes machines homologues (c'est à dire ayant les mêmes dimensions géométriques semblables) ont les mêmes caractéristiques adimensionnelles  $\mu = f(\delta)$  et  $\tau = f(\delta)$ .

### 3.4 Perte de charge [ 28 ], [ 34 ], [ 27 ]

#### 3.4.1. Etude d'une perte de charge

Pour étudier les caractéristiques d'un fluide en un point considéré, nous disposons de six équations :

L'équation de continuité exprimant la conservation de la masse,

Trois équations de la dynamique projetées sur les axes,

Une équation d'énergie exprimant le premier principe de thermodynamique,

Une équation caractéristique du fluide de la forme  $F(p, \square, T) = 0$ .

Et en tenant compte :

Des conditions initiales,

Des conditions finales,

Et des conditions aux limites,

On déduit alors les six fonctions principales qui ne sont autres que celles de :

La vitesse  $V$  (  $u, v, w$  ) ( projection sur les axes  $x, y$ , et  $z$  d'un repère à trois dimensions ),

La masse volumique  $\rho$ ,

La pression  $p$ ,

Et la température  $T$ .

Les pertes de charge se manifestent par une dégradation de l'énergie sous forme d'une force résistante à la déformation d'un fluide en mouvement. Elles agissent directement au rendement d'un circuit. Les pertes de charge sont dues, en effet, à deux causes majeures :

- Les pertes dues à la nature des parois. Dans le cas des conduites où le régime de débit atteint son équilibre, les pertes de charges sont dues au travail de frottement sur les parois du canal.

- Les pertes singulières En se basant sur la figure 3.7.

D'après le théorème de **BERNOULLI** généralisée ( ou théorème de E. COTTON et A. FORTIER ), étendu à un volume  $D$  limité par la surface  $S_0$ , on

$$\rho \iiint_D \frac{\partial \left( \frac{V^2}{2} + \rho U \right)}{\partial t} d\omega - \iiint_D p dv V \partial \omega + \iint_S \left( p + \rho U + \rho \frac{V^2}{2} \right) V_n d\sigma = -W_f + W \quad (3.35)$$

Avec :

$p$  : La pression statique au point d'intérêt,

$\rho$  : La masse volumique au point d'intérêt,

$W$  : Le travail fournit par la machine installée à l'intérieur de  $D$ ,

-  $\rho W_f$  : Le travail dû aux forces de frottement totales ( extérieures et intérieures),

$U$  : Le potentiel d'où sont dérivées les forces de pesanteur,

$d\omega$  : Volume élémentaire de masse volumique  $\rho$ .

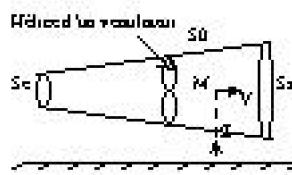


Figure 3.7 Présentation générale d'un conduit

Alors si d'autant plus le mouvement est permanent, la quantité

$$\iiint_D \frac{\rho \left( \frac{V^2}{2} + \rho U \right)}{g} d\sigma = 0$$

et

$V_n = 0$  le long de la surface  $S_0$ .

De ce fait, la relation (3.31) devient :

$$\iint_{S_1} \rho \left( \frac{V^2}{2} + gZ \right) V_n d\sigma - \iint_{S_1} \rho \left( \frac{V^2}{2} + gZ \right) V_n d\sigma + \iiint_D \nabla \cdot g \vec{F} ad p \partial \omega = W_f - |W_f| \quad (3.36)$$

Avec ,  $Z$  : La côte du point M prise par rapport au plan de référence C (comptée positivement vers le haut ).

Et maintenant, soit  $q$  le débit-masse du fluide traversant un conduit dans lequel il n'y a pas de machine, alors les frottements entraînent une perte d'énergie dissipée par unité de masse de fluide :

$$\frac{|W_f|}{q},$$

où  $|W_f|$  vient de la relation de **Bernoulli** généralisée en prenant  $W=0$ .

On a alors

$$-\frac{|W_f|}{q} = \frac{1}{q} \left[ \iint_{S_1} \rho \left( \frac{V^2}{2} + gZ \right) d\sigma - \iint_{S_1} \rho \left( \frac{V^2}{2} + gZ \right) V_n d\sigma + \iiint_D \nabla \cdot g \vec{F} ad p \partial \omega \right] \quad (3.37)$$

Dans la pratique, il est plus judicieux de procéder, pour le calcul de la perte de charge, à des mesures locales en tous points dans le conduit car il n'est pas évident de calculer la quantité

$$\iiint_D \nabla \cdot g \vec{F} ad p \partial \omega,$$

surtout si le conduit présente une forme variée.

En résumé, on peut mesurer les quantités suivantes, dans une section d'aire S ayant pour centre le point M :

$$\iint_S V_n d\sigma, \iint_S p V_n d\sigma, \iint_S \rho g Z V_n d\sigma, \text{ et } \iint_S \rho \frac{V^2}{2} V_n d\sigma,$$

Pour cela et dans la mesure du possible, il faut déjà mesurer en un point M à l'intérieur du conduit :

La température,

La hauteur Z,

La masse volumique  $\bar{\rho}$  en mesurant la pression statique (en utilisant par exemple un tube de Pitot),

La pression dynamique [  $\bar{\rho} (\bar{V}^2/2)$  ].

Par ailleurs, posons par convention :

$$U = \frac{1}{S} \iint_S V_n d\sigma \quad (3.38)$$

la vitesse moyenne dans une section S.

Connaissant cette vitesse moyenne sur le point M, le débit-masse

$$q = \iint_S \rho V_n d\sigma = \bar{\rho}_m S \iint_S \frac{1}{S} V_n d\sigma = \bar{\rho}_m U \cdot S \quad (3.39)$$

$$\iint_S \rho g Z V_n d\sigma = g Z_m q \quad (3.40)$$

$$\iint_S p V_n d\sigma = p_m U \cdot S \quad (3.41)$$

$$\iint_S \rho \frac{V^2}{2} V_n d\sigma = \alpha \frac{V^2}{2} q \quad (3.42)$$

Avec  $\bar{\rho}_m$  : la masse volumique moyenne dans S,  $Z_m$  : la hauteur moyenne du point M,  $p_m$  : la pression moyenne dans la section S et  $\alpha$  : le coefficient de répartition des vitesses.

Et en insérant  $\bar{\rho}_m$  dans la relation (3.42) ; nous avons :

$$\alpha = \frac{\iint_S \rho \frac{V^2}{2} V_n d\sigma}{\frac{U^2}{2} \cdot \bar{\rho}_m \cdot U \cdot S} \quad (3.43)$$

Et finalement :

$$\alpha = \frac{1}{S} \iint_S \left( \frac{\rho}{\bar{\rho}_m} \right) \left( \frac{V^2}{U^2} \right) \left( \frac{V_n}{U} \right) d\sigma \quad (3.44)$$

Dans un conduit et lors d'un écoulement, il y a toujours une variation plus ou moins importante, selon la pression et quelques facteurs géométriques, de la température qui entraîne par la même occasion une perte de charge.

En égalisant la variation d'énergie totale à la somme des travaux extérieurs et de la chaleur échangée avec le milieu extérieur, nous pouvons écrire d'après **A. FORTIER**,

$$\iiint_D \frac{\partial \left[ \rho E + \rho \frac{V^2}{2} + \rho U \right]}{\partial t} d\omega + \iint_S \left( p + \rho U + \rho E + \rho \frac{V^2}{2} \right) V_n d\sigma = W - |W'| + Q \quad (3.45)$$

En appliquant cette relation à notre cas, c'est-à-dire pour un écoulement permanent ;

$$\iiint_D \frac{\partial \left[ \rho E + \rho \frac{V^2}{2} + \rho U \right]}{\partial t} d\omega = 0$$

et de plus  $V_n = 0$ , on a alors ;

$$\iint_S \rho \left[ \frac{V^2}{2} + gZ + H \right] V_n d\sigma - \iint_S \rho \left[ \frac{V^2}{2} + gZ + H \right] V_n d\sigma = Q + W - |W'| \quad (3.46)$$

Avec ;  $H$  : L'enthalpie ( $H = C_p T$ )

$Q$  : La chaleur échangée à travers la surface  $S$

-  $|W'|$  : Le travail des forces de frottement sur la surface  $S$  seulement.

Ainsi

$$\iint_S \rho H V_n d\sigma = C_p \iint_S \rho T V_n d\sigma \quad (3.47)$$

Et si nous posons

$$qT_m = \iint_S \rho T V_n d\sigma \quad (3.48)$$

Avec  $T_m$  : la température moyenne dans la section  $S$ .

Alors

$$\iint_S \rho H V_n d\sigma = \iint_S C_p T d\sigma = q C_p T_m \quad (3.49)$$

### 3.4.2. Détermination pratique d'une perte de charge

Comme  $W_f$  qui correspond au travail des forces de frottement tendant à ralentir le mouvement de fluide est forcément négatif, alors il est évacué par les parois de la conduite sous forme de chaleur. Par conséquent, entre l'entrée et la sortie de la conduite règne une différence d'énergie totale qui est obligatoirement négative, idem pour les expressions totales entre deux points extrêmes :

$$P_{t_s} - P_{t_e} = \left[ P_s - P_e + \rho \frac{U_s^2 - U_e^2}{2} + \rho g (Z_s - Z_e) \right] \quad (3.50)$$

ou

$$H_s - H_e = \left[ \frac{P_s - P_e}{\omega} + \frac{U_s^2 - U_e^2}{2g} + (Z_s - Z_e) \right] \quad (3.51)$$

avec  $P_t$  : pression totale qui peut s'exprimer sous ( $p + \rho V^2/2 + \rho g Z$ )

$P$  : pression statique ( e : entrée, s : sortie )

$H$  : charge hydraulique ( $H = Pt/\omega$ )

$\omega$  : poids spécifique =  $\rho g$

Donc la perte de charge s'exprime en  $H_e - H_s = \Delta H$  est un terme positif qui montre une diminution de la charge dans le sens de l'écoulement.

### 3.4.2.1. Pertes de charge régulières ou linéaires

Les pertes de charge régulières correspondent à une dissipation d'énergie sous forme de chaleur lorsque le régime est établi, pour un écoulement de fluide dans une conduite. Ceci se vérifie d'autant plus lorsque le profil de vitesse dans la veine du fluide est inchangé tout au long de la conduite.

Compte tenu des deux équations( 3.50 ) et ( 3.51 ), on peut encore écrire :  $\Delta H$  en fonction de la pression totale. Alors  $\Delta H = \Delta Pt/\omega$  représente bien une chute de pression totale. On peut montrer, en faisant une analyse dimensionnelle et en introduisant la longueur de la conduite avec d'autres caractéristiques, que la chute de la pression totale peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{\Delta Pt}{\Delta L} = \frac{\lambda(R_e, \epsilon_r)}{D} \rho \frac{U^2}{2} \quad (3.52)$$

Avec :  $\Delta P_t/\Delta L$  : perte de charge linéaire ( Pa/m )

$\lambda$ : coefficient de perte de charge

$R_e$  : nombre de **Reynolds**

$\rho$  : masse volumique du fluide ( kg / m<sup>3</sup> )

$\epsilon_r$  : rugosité relative de la conduite

$U$  : Vitesse moyenne du débit ( m/s )

Le coefficient de perte de charge est donné directement sous forme de corrélations qui est déduite par la résolution des équations de **Navier – Stokes**. La rugosité relative  $\epsilon_r$  représente le rapport entre la rugosité absolue  $\epsilon$  de la conduite et son diamètre D. La vitesse  $U$  est le rapport entre le débit volumique et la section de passage.

Dans certains cas, on préfère utiliser non pas le coefficient de perte de charge mais le coefficient de frottement. En fait, ce dernier relie la contrainte tangentielle de frottement

à la paroi  $\tau_0$  de la conduite et la pression dynamique :

$$\tau_0 = C_f (R_s, \varepsilon_r) \frac{\rho U^2}{2} \quad (3.53)$$

On peut cependant exprimer la contrainte de frottement en fonction de la perte de charge puisqu'ils font partie d'un même problème, on a alors :

$$\tau_0 = \frac{D}{4} \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (3.54)$$

Et finalement on a :

$$\lambda = 4 \cdot C_f \quad (3.55)$$

D'où

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = 2 C_f (R_s, \varepsilon_r) \rho \frac{U^2}{D} \quad (3.56)$$

### 3.4.2.2. Pertes de charge singulières

Par opposition aux pertes de charge linéaires, les singulières sont liées directement aux formes géométriques de la conduite. Elles se manifestent lors des traversées telles que : les coudes, les culottes de dérivation, les étranglements ou élargissement. Ceci modifie donc le profil de vitesse en grandeur et / ou en direction, ce qui entraîne une modification de la pression dynamique en provoquant une dissipation d'énergie supplémentaire. Certains livres technologiques en rapport direct avec l'aédraulique et pour une conduite cylindrique donnent la relation entre les pertes de charge et la pression dynamique ci-après :

$$P_s = \beta (l/d) P_d = \beta (l/d) V^2 / 16 \quad (3.57)$$

Ou  $l$  : longueur du conduit ( m )

$d$  : diamètre du conduit ( m )

$\beta$  : coefficient de friction ( lié au nombre de Reynolds )

$V$  : vitesse du fluide ( m/s )

Et d'une façon pratique, on se sert des tableaux de perte de charge par frottement tels que celui établi par **Rietschel** et **Brabee**. Il en est de même pour le calcul des pertes de charge particulière. On peut alors écrire  $P_s = K P_d$ , où  $K$  : coefficient de singularité présenté sous forme d'abaques.

### 3.4.3 Influence du régime sur la perte de charge

Selon que le régime soit laminaire ou turbulent, la perte de charge varie significativement.

Si nous ne nous intéressons qu'au régime laminaire, les équations de **Navier-Stokes** montrent l'existence d'un profil de vitesse parabolique et une équation mettant en exergue la proportionnalité entre le débit volumique et la perte de charge telle que:

$$q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\mu L} \quad (\text{Formule de Poiseuille}) \quad (3.58)$$

Cette formule peut encore s'écrire en fonction de la vitesse U et le diamètre D de la conduite, ce qui donne :

$$q = US = U \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^4}{8\mu} \left(\frac{\Delta p}{L}\right) \quad (3.59)$$

D'où :

$$\frac{\Delta p}{L} = U \frac{32\mu}{D^2} \quad (3.60)$$

Et en écrivant en fonction du nombre de **Reynolds** :

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{64 \mu U^2}{Re \cdot 2D} \quad (3.61)$$

En comparant avec l'équation ( 3.49 ), on montre que :

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3.62)$$

### **3.5. Choix du type de ventilateur [ 31 ], [ 37 ]**

Les caractéristiques des deux types de ventilateurs que nous avons étalé dans la première partie et notre cahier de charges définissent l'orientation de notre choix sur le type de ventilateurs à utiliser. Les caractéristiques peuvent être fournies par les constructeurs et sont présentées par la figure ci contre. Pour un ventilateur centrifuge, la hauteur manométrique ( pression) part d'une certaine valeur jusqu'au maximum pour un débit d'air croissant. A partir de cette valeur maximum, elle diminue alors que le débit augmente toujours. Pour un ventilateur axial, la caractéristique est théoriquement semblable sauf qu'à faible débit, il y a une zone d'instabilité où la roue emprisonne un certain volume d'air, ce qui imprime à ce dernier un mouvement de giration.

En tout cas, pour les deux types de ventilateurs, la zone d'utilisation normale se situe en aval du maximum. Remarquons que ces caractéristiques sont les résultats des tests pratiques sur les ventilateurs associés à une longueur droite effective 'Le' du tube afin de permettre l'établissement du régime. Dans le cas pratique, cette longueur n'est pas toujours respectée à cause des coudes qui peuvent être placées à une distance inférieure

à ' $Le$ ' ou à des piquages. Alors, il faut introduire une perte de charge singulière supplémentaire déterminée par la relation :

$$\Delta p = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{U_0^2}{2} (3.63)$$

avec  $\zeta$  : coefficient de perte dû à la connexion ventilateur/réseau. Il est spécifique pour chaque assemblage et dépend de ' $Le$ '. Mais si ' $Le$ ' n'est pas connue, les relations empiriques ci-dessus permettent de la calculer :

Si  $U_0 \leq 13$  m/s ,

$$L_e = \frac{U_0 \cdot A_0^{1/2}}{350} (3.64)$$

Si  $U_0 > 13$  m/s ,

$$L_e = \frac{U_0 \cdot A_0^{1/2}}{4500} (3.65)$$

Avec  $A_0$  : Section de sortie

En se référant à ces caractéristiques, nous pouvons conclure qu'un ventilateur axial imprime un mouvement hélicoïdal à l'air, ce qui induit une distance constante entre l'axe de la roue et la veine fluide. Par contre pour un ventilateur centrifuge, plus l'air le traverse, plus ce dernier s'éloigne, ce qui entraîne une augmentation de vitesse. Ceci augmente encore plus la pression dynamique puisqu'elle est liée à cette vitesse. Ce type de ventilateur peut engendrer une grande différence de pression totale entre l'amont et l'aval car la pression statique produite par les pales s'ajoute à la pression dynamique. C'est pour cette raison que nous choisissons un ventilateur centrifuge pour notre application afin de minimiser la puissance nécessaire au moteur d'entraînement. Encore nous utilisons un ventilateur centrifuge à deux étages de compressions.

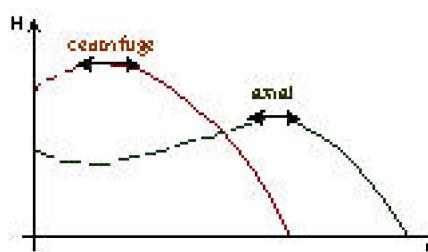


Figure 3.8 Caractéristiques des ventilateurs centrifuges et axiaux

### 3.6. Description des organes d'un ventilateur centrifuge

Il comporte différents éléments qui sont :

Le distributeur ( uniquement pour les ventilateurs à plusieurs étages ) qui règle l'orientation des filets fluides à leur entrée dans la roue.

La roue : qui supporte le disque, les flasques de recouvrement et les aubages.

Le diffuseur : qui assure à la fois de :

de transformer une partie de l'énergie cinétique en énergie potentielle c'est à dire la pression dynamique en pression statique.

D'orienter l'air à la sortie de la roue dans la volute ou le distributeur de l'étage en aval.

La volute : qui se charge de transformer le mouvement de rotation de l'air en mouvement de translation.

Le divergent : qui transforme également une fraction de l'énergie cinétique de l'air en énergie potentielle afin de réduire les pertes de charge.

### **3.7. Ventilateur centrifuge réel et rendement**

---

Si nous prenons le cas réel, les équations  $H = f(q)$  et  $W = f(q)$  sont modifiées car elles nient pas compte des frottements, ni des charges, ni des fuites entre aspiration et refoulement. L'allure de la courbe représentant ( $\beta > \pi/2$ ) est donnée par la figure ( 3.9 )

Cette courbe est obtenue après avoir tenu compte :

Des pertes de charge régulière qui varie sensiblement avec le carré du débit

Des pertes de charge singulières

Alors ces pertes d'énergies nous conduisent à définir le rendement total  $\eta$  du ventilateur. Ce rendement se définit alors par le rapport de la puissance utile  $P_u$  renfermée dans le fluide en mouvement sur la puissance absorbée  $P_a$  par le ventilateur. On a alors l'expression :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} (3.66)$$

Pour des fluides incompressibles et ayant des poids spécifiques constants ( ceci est valable pour un fluide se déplaçant à une vitesse inférieure à 100 m/s et d'une pression inférieure à 600daPa ), on a pratiquement :

$$P_u = Q \cdot H_t (3.67)$$

avec :  $Q$  : débit de l'air (  $m^3/s$  ),

$H_t$  : Hauteur manométrique totale ( Pa )

D'où

$$\eta = \frac{Q \cdot H_t}{P_a} (3.68)$$

donc finalement :

$$P_a = \frac{Q \cdot H_t}{\eta} \quad (3.69)$$

Mais pratiquement on a l'habitude d'utiliser la relation :

$$P_a = \frac{Q \cdot H_t}{100\eta} \quad (3.70)$$

Avec :  $P_a$  en kW

$Q$  : en  $m^3/s$

$H_t$  en daPa

$\eta$  le rendement total.

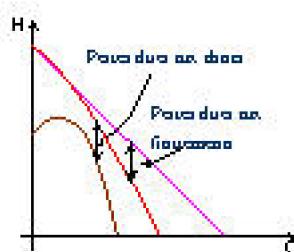


Figure 3.9. Allure de la courbe hauteur manométrique tenant compte des pertes énergétiques

Ainsi la figure ci-dessous présente globalement l'allure des courbes de fonctionnement d'un ventilateur centrifuge réel

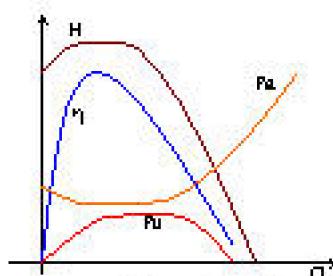


Figure 3.10. Allure des caractéristiques réelles d'un ventilateur centrifuge

### 3.8. Réglage des ventilateurs

Pour régler la pression produite par un ventilateur, on peut agir sur trois points de ses caractéristiques : L'angle de prégriration  $\alpha_1$ ,

L'angle des sorties des aubages  $\beta_1$ ,

La vitesse de rotation N ( figure 3.11 )

Cette figure montre que plus la vitesse est grande, plus la hauteur manométrique atteint une valeur maximale conséquente.

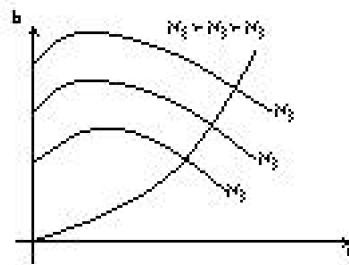


Figure 3.11. Allure de la hauteur manométrique  $h$  en fonction du débit  $q$

### 3.9. Classification des réseaux aérauliques

Selon les caractéristiques requises pour une installation aéraulique c'est à dire de la puissance totale  $P_t$  nécessaire, on classe trois types de ventilateurs adéquats :

Ventilateur basse pression si  $P_t < 100\text{daPa}$ ,

Ventilateur moyenne pression si  $100\text{daPa} < P_t < 500\text{daPa}$ ,

Ventilateur à haute pression si  $P_t > 500\text{daPa}$ .

### 3.10. Calcul du réseau

Pour avoir une bonne dépression et ainsi d'assurer une bonne prise des porte-échantillons, il nous faut connaître la pression totale nécessaire. En fait, la pression totale nécessaire dans un réseau permet de dimensionner la consommation électrique ( donc de la puissance ) à prévoir pour un moteur entraînant le ventilateur.

#### 3.10.1. Dimensionnement de la pression totale du ventilateur à installer

Le but de notre dimensionnement consiste à prévoir la puissance minimale du ventilateur à utiliser. Pour cela considérons le circuit aéraulique entier. En appliquant la relation de **Bernoulli** à l'entrée et à la sortie du réseau, nous avons

$$\left( p_i + \rho \frac{V_i^2}{2} + \rho g Z_i \right) - \left( p_s + \rho \frac{V_s^2}{2} + \rho g Z_s \right) = \Delta p_m \quad (3.71)$$

Mais en considérant le cas réel c'est-à-dire avec les pertes de charges, alors (3.71) devient :

$$\left( p_i + \rho \frac{V_i^2}{2} + \rho g Z_i \right) - \left( p_s + \rho \frac{V_s^2}{2} + \rho g Z_s \right) = \Delta p_m - \Delta p_f \quad (3.72)$$

Ainsi

$$\Delta p_m = \Delta p_f + (p_i - p_s) + \rho \left( \frac{V_i^2 - V_s^2}{2} \right) + \rho g (z_i - z_s) = \Delta p_f + \Delta p_d + \Delta p_s + \rho g \Delta z_m \quad (3.73)$$

Or

$$\Delta p_f = \Delta p_s + \Delta p_R (3.74)$$

Avec

Perte de charge linéaire :

$$\Delta p_s$$

Perte de charge singulière :

$$\Delta p_R$$

D'après les relations ( 3.56 ) et ( 3.60 ) établies dans la première partie, nous pouvons encore écrire :

$$\Delta p_R = \left( \lambda \frac{L}{D} + \sum_i \delta_i \right) \rho \frac{V^2}{2} (3.75)$$

Avec :

L : longueur totale du réseau,

D : diamètre du tuyau,

$\lambda$  : Coefficient de perte de charge calculé à partir du diagramme de **Moody** ou , de la formule de **Colebrook**

$$[\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left( \frac{2,51 + \epsilon_r}{R_e \sqrt{\lambda}} \right) = -2 \log_{10} \left( \frac{2,51}{R_e \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,7 d} \right)] (3.76)$$

(  $R_e$  : Nombre de **Reynold.**, k : indice de rugosité du tube ( mm), d : diamètre hydraulique du tube ( mm ) )

Alors finalement ;

$$\Delta p_{\text{tot}} = \Delta p_f + \Delta p_s + \Delta p_d + \rho g \Delta z = \lambda \frac{L}{D} \rho \frac{V^2}{2} + \sum_i \delta_i \rho \frac{V^2}{2} + \Delta p_s + \Delta p_d + \rho g \Delta z (3.77)$$

Telle est la relation permettant d'avoir la pression totale du réseau lorsque le porte-échantillon n'est pas encore collé sur la ventouse.

Maintenant appliquons cette relation, pour un régime établi c'est à dire lorsque le porte-échantillon est collé sur la ventouse. Dans ce qui suit, nous ne tenons pas compte des états intermédiaires qui n'est pas l'objet de nos travaux :

Alors à l'intérieur du réseau qui est bouché à l'entrée l'air ne circule pas, donc  $V \rightarrow 0$ . Puisque les pertes de charge dépendent de cette vitesse alors nous en tirons également que :  $\Delta p_f \rightarrow 0$  ainsi que  $\Delta p_d \rightarrow 0$ .

Ceci implique que la relation (3.77) devient :

$$\Delta p_{\infty} = \Delta p_{\infty} + \rho g \Delta z_{\infty} \quad (3.78)^*$$

### 3.10.2. Dimensionnement des caractéristiques du moteur de ventilateur

La puissance absorbée par le ventilateur se décompose distinctement en deux : - Puissance mécanique fournie au fluide  $P_u$  qui traduit celle qui est communiquée à l'air lors de sa traversée du ventilateur et dont la relation est donnée par la formule (3.13)

- Puissance consommée par le ventilateur. C'est la puissance minimum nécessaire qui doit être mesurée sur l'arbre du ventilateur pour le bon fonctionnement de celui-ci. Puisque le rendement  $\eta$  est une combinaison d'un rendement mécanique du ventilateur et du rendement de transmission alors on peut encore écrire la relation (3.66) par :

$$P_e = \frac{P_u}{R_v R_t} \quad (3.79)$$

Avec :  $R_v$  : rendement mécanique du ventilateur

$R_t$  : rendement de transmission.



En effet lors d'une traversée de fluide à travers un ventilateur, les pertes sont inévitables à cause des différents agents de frottements des organes de rotation. Aussi les énergies consommées par un moteur ne sont pas toutes transmises au ventilateur. Les tableaux ci-dessous donnent quelques rendements admis pour les ventilateurs sur le marché.

Tableau 3.1 Rendements mécaniques de quelques ventilateurs

Rendements  
mécaniques

Rendement(  
Re)

V ventilateur

V ventilateur

centrifuge

à

aubes

recourbées

vers

l'arrière

(

6

à

16

unités

)

V ventilateur

centrifuge

à

aubes

recourbées

vers

l'avant

(

38

à

42

unités

)

V ventilateur

hélicoïdale

sans

diffuseur

mais

avec

redresseur

V ventilateur

hélicoïdale

avec

diffuseur

et

redresseur

V ventilateur

## **Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE SPECTROMETRIE X**

---

de  
paroi

**Tableau 3.2 Quelques valeurs des pertes de transmission des moteur d'entraînement.**

<b>Pertes</b>	
d'entraînement	
transmission	
<b>Moteur</b>	
%	
entraînement	
direct	
<b>Entraînement</b>	
%	
accouplement	
Transmission	
moteur	
courroies	
7,5	
kW :	
10	
%	
<b>Transmission</b>	
%	
courroies	
P	
moteur	
<	
11	
kW :	
8	
%	
<b>Transmission</b>	
%	
courroies	
P	
moteur	
<	
100kW :	
2,5	
%	

Pour notre application, choisissons alors les conditions les plus favorables pour satisfaire les situations de fonctionnement de l'installation.

Ventilateur centrifuge à aubes recourbées vers l'arrière

---

Mode d'entraînement direct.

Tenant compte de toutes ces formules et des précautions, nous utilisons un ventilateur débitant le  $2,3 \text{ m}^3/\text{min}$  et entraîné par un moteur de 380 Watt tournant à une vitesse de 1900 tr/min. Ces caractéristiques ont été volontairement gonflées pour les raisons suivantes :

Plus la dépression est grande dans le réseau, plus on a une bonne prise du porte-échantillon ce qui entraîne une certitude faible quand au relâchement de celui-ci au cours du déplacement.

Plus le moteur est puissance, plus il ne se forcera pas pour fonctionner. Il développera alors une puissance acceptable ce qui engendre un réchauffement faible. Donc une durée de vie du moteur élevée.

Remarquons, en effet que lors de l'aspiration, la pression à l'intérieur du tuyau est beaucoup plus basse que la pression atmosphérique, donc le tuyau est soumis à deux forces :

- Celle qui agit de l'intérieur et dont la ligne de force se dirige vers le milieu même de celui-ci,
- Et celle qui est due à l'effet de l'atmosphère.

La force engendrée par ces deux pressions tend le tuyau à se pétrir mais pour parer à cette éventualité, les caractéristiques du ventilateur mentionnées ci-dessus sont choisies de telle manière que le tuyau ne subit aucune déformation de sa part.

Les inconvénients de ce dispositif sont :

Le bruit que le moteur produit lors qu'il fonctionne mais nous avons enfermé le ventilateur dans un coffrage en bois pour amortir la propagation sonore.

Le moteur a tendance à se chauffer d'où la surdimensionnement de celui-ci. Dans ce cas donc où on est contraint d'utiliser un moteur directement dimensionné par rapport au réseau sans une large marge de puissance, alors il faut prévoir un système de ventilation. La meilleure méthode est de relier un petit ventilateur sur le rotor du même moteur.

### 3.11 Conclusion

---

La construction mécanique et le système d'aspiration doivent être parfaitement synchronisés. Les composants de la partie d'aspiration ne sont pas en reste. Pour ce dernier, il faut une pompe à vide que nous réalisons avec un ventilateur car il nous faut soulever une masse qui n'est pas plus lourde que 10 g en tout. Cette opération très délicate doit être dépourvue au maximum de risque d'échec. Le dimensionnement du réseau aédraulique entier a nécessité une précaution particulière pour éliminer autant que possible le risque d'échecs.

**Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE  
SPECTROMETRIE X**

---

# CHAPITRE IV

## 4. Rayons X

### 4.1 Généralités sur les rayons X [ 2 ], [ 16 ]

---

En 1895, **Röntgen** remarqua que les faisceaux de négatons paraissent déterminer des actions imprévues autour de l'ampoule dans laquelle ils sont produits. Il apercevait qu'un écran en platinocyanure de baryum s'illuminait même quand l'ampoule était clôturée dans une boîte en carton. Ce rayonnement indétectable à l'œil nu et qui traversait des corps opaques est appelé : Rayonnement X. Un an plus tard, **Jean Perrin** montra que ce phénomène n'apparaît que lors d'une incidence rapide des négatons sur des obstacles solide. Bien sûr au début, la nature de ce rayonnement suscitait des controverses au sein de la communauté scientifique. Certains supposaient que les rayons X étaient similaires à des rayons cathodiques secondaires dont les propriétés telle que la propagation en ligne droite ou l'apparition d'une luminescence étaient énoncées. Mais cette hypothèse était vite abandonnée après des expériences mettant en exergue les faits que ce rayonnement n'était dévié ni par les champs électriques ni, et encore moins par le champ magnétique.

En 1912 lors de ces travaux, **Von Laue** réussit à observer des phénomènes de

difractons et en a conclu que le rayonnement X est de nature électromagnétique et qu'il se propage à la vitesse de la lumière. Il tira de ces travaux également que les rayons X sont des photons possédant des énergies plus grandes en comparaison avec celles de la lumière. Dans la répartition des longueurs d'onde, les rayons X occupent une place entre les longueurs d'onde des rayons  $\gamma$  et ultraviolets. En réalité elles sont comprises entre 0,001 nm et 100 nm et se subdivisent en deux domaines : des rayons X durs et mous (  $0,001 \text{ nm} < \lambda < 0,2 \text{ nm}$  ) d'une part et des rayons X intermédiaires (  $0,2 \text{ nm} < \lambda < 100 \text{ nm}$  ) d'autre part.

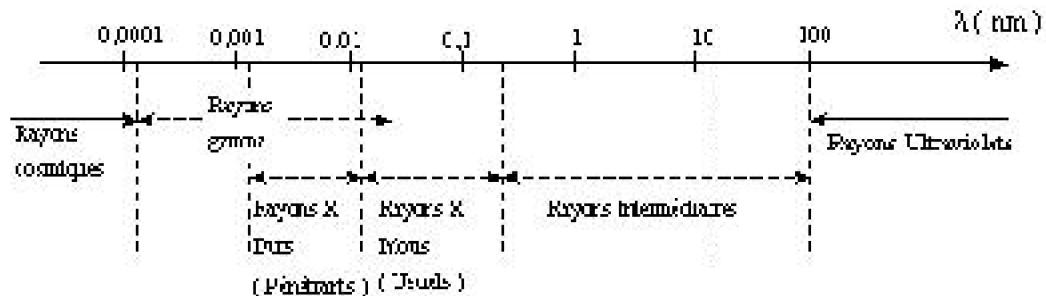


Figure 4.1 Répartition des rayons X

Ainsi la frontière séparant les rayons X avec les rayons  $\gamma$ , de même avec les rayons ultraviolets présentent une nuance assez floue.

## 4.2. Production des rayons X

---

Généralement, il y a deux façons de produire des rayons X : les tubes à rayons X et les sources radioactives. Il y a deux types de tubes : à gaz ( tube de **Crookes** ) et à vide poussé ( tube de **Coolidge** ). Notre chaîne utilise un tube dont le principe est basé sur le modèle de **Coolidge** et voyons donc ce qu'il en est.

### 4.2.1. Les tubes à vide poussé

Connu sous le nom de tubes à vide à cathode chaude ou tubes de **Coolidge** . Les négatons sont fournis par une cathode thermoémissive <sup>(\*)</sup> et sont accélérés grâce à un champ électrique dû à la haute tension entre la cathode et l'anode ( qui joue aussi le rôle de l'anticathode ). L'énergie cinétique des négatons se transforme, pour la plus part en chaleur. et de ce fait l'anticathode doit être en mesure de supporter une élévation de température importante. C'est pour cette raison que l'anticathode, qui est une pastille de tungstène( Pour les tubes de Coolidge ) ou molybdène, est refroidie soit par circulation d'eau, soit par une ventilation naturelle ou forcée. L'intensité du rayonnement X est accrue en augmentant soit la tension, soit le courant du filament de chauffage tandis que la longueur d'onde ( donc le pouvoir de pénétration ) varie avec la tension anode-cathode. Pour les tubes de **Coolidge** , ces deux réglages sont séparément manipulables, contrairement aux tubes de **Crookes**, ce qui les rend plus fiables.

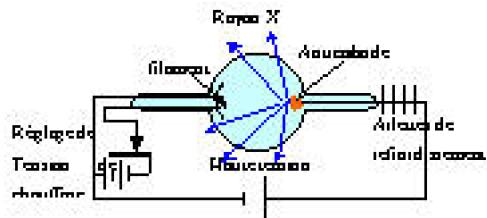


Figure 4.2 Tube de Coolidge

### 4.3. Les réflecteurs

Faisant partie des composantes d'une chaîne de détection, les réflecteurs jouent des rôles très importants. Il y en a deux sortes : réflecteur de séparation et réflecteur porte-échantillon

(\*) Certains corps tels que le tungstène pur, tungstène thorié,... sont aptes à émettre des négatons en leurs fournissant assez d'énergie. En fait, l'énergie d'agitation thermique de chaque négaton de la bande de conduction croît proportionnellement à la température du corps de telle sorte que les négatons peuvent même en être extraits. Dans le cas du tube de Coolidge, cette énergie est obtenue en portant le corps métallique à une certaine énergie.

Ils sont tous les deux fondés sur un même principe optique. Ce sont des corps massifs réfléchissants en quartz (suprasil).

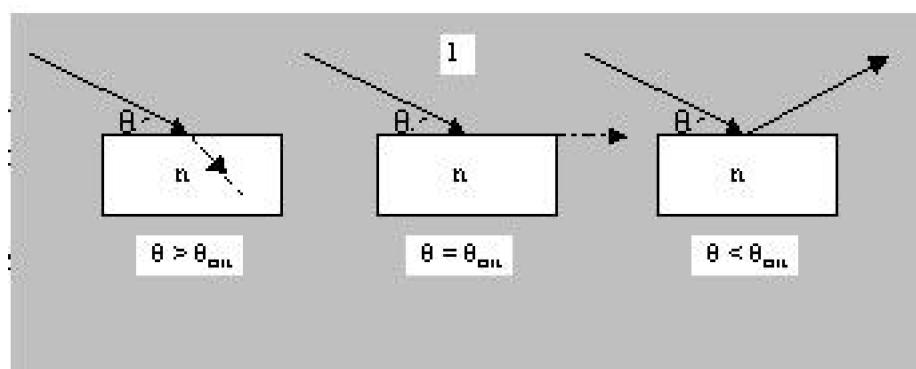


Figure 4.3 Effet du réflecteur de séparation

Le réflecteur porte-échantillon sert à déposer l'échantillon à analyser tandis que celui de séparation joue une autre utilité. Son rôle est de filtrer les rayonnements de freinage diffus dus au passage des rayons X à travers l'air, pour ne faire passer que le rayonnement primaire utile. Il assure donc le rôle de filtre par le biais du principe de réfraction-réflexion (figure 4.3). Ayant un indice de réfraction  $n = 1 + \epsilon$  avec  $\epsilon$  : fonction de la longueur d'onde de la raie incidente selon la formule suivante :

$$\epsilon(\lambda) = 2,7 \cdot 10^{11} (Z \rho / A) \lambda^2 \quad (4.1)$$

Avec: Z : Numéro atomique de composant du réflecteur.

A : Masse atomique du composant de réflecteur,

$\rho$  : Densité du réflecteur de séparation,

$\lambda$  : Longueur d'onde de raie X incidente.

En appliquant la loi de Descartes pour le phénomène de réflexion :  $\cos \theta = n \cos \theta'$ , nous en tirons l'angle critique de réflexion totale :

$$\theta_{\text{crit}} = [5,4 \cdot 10^{11} (Z\rho / A)]^{1/2} \lambda (4.2)$$

Puisque  $\lambda$  a une étroite relation avec l'énergie [ $\lambda = (h c / E)$ ] avec  $h$  : constante de Planck,

et  $c$  : la célérité de la lumière dans le vide. On peut alors écrire :

$$E_{\text{crit}} = [5,4 \cdot 10^{11} (Z\rho / A)]^{1/2} (h c / E) (4.3)$$

Ainsi pour un angle critique fixé à partir d'une énergie  $E_{\text{crit}}$ , seuls les faisceaux incidents ayant des énergies  $E'$  inférieures à celle-ci subissent une réflexion totale. En effet si :

$E' = E_{\text{crit}}$ : Les rayons X subissent une réflexion rasante,

$E' > E_{\text{crit}}$ : les rayons X seront complètement réfractés,

$E' < E_{\text{crit}}$ : Les rayons X seront totalement réfléchis.

#### 4.4. Interaction des rayons X avec la matière

---

Lors d'un passage de rayon X à travers une matière, celle-ci l'absorbe de façon plus ou moins importante. Cette absorption dépend non seulement de la longueur d'onde des rayons X mais aussi des masses atomiques des éléments constituant la matière. Généralement, elle ne se limite pas seulement à une absorption plus ou moins partielle de l'énergie incidente mais fait aussi apparaître des phénomènes de diffusion. Il y a alors trois cas possibles :

Des rayons X incidents peuvent tout simplement changer de direction en subissant :

- Soit une légère perte d'énergie ( Diffusion **Compton** )
- Soit pas de perte du tout d'énergie ( Diffusion **Rayleigh** )

Des rayons X incidents peuvent avoir assez d'énergie pour expulser des négatrons sur les couches électroniques ( essentiellement sur les couches K, L<sub>I</sub>, L<sub>II</sub>, L<sub>III</sub> ) et après la suite, disparaître complètement lors de cette absorption. C'est l'effet photoélectrique. C'est la raison principale ( plus de 95% ) justifiant la valeur du coefficient d'atténuation massive ( $\mu_m$ ) d'un corps traversé par des rayons X . Pratiquement la valeur de  $\mu_m$  est égale à celle du coefficient d'atténuation massique dû à cet effet, surtout pour des éléments dont les numéros atomiques sont supérieurs à 10.

Aucune perturbation n'est à déceler ni au niveau de la trajectoire ni à celui de l'énergie. Des rayons X interagissent avec la matière et obéissent à la loi de **Beer-lambert** . Avec  $I_x = I_0 \exp(-\mu_l x) (4.4)$

Où  $\mu_l = \mu_m \cdot \rho$  : coefficient d'absorption linéaire

$\mu_m$  : Coefficient d'absorption massique

$\rho$  : densité de la matière

Par conséquent, après éjection d'un négaton d'une couche électronique donnée, le trou sera comblé par un autre, appartenant à une couche supérieure qui sera accompagné d'une émission de raie X. On l'appelle : Raie X caractéristique car elle n'est pas fonction de l'énergie incidente mais propre à chaque élément chimique considéré.

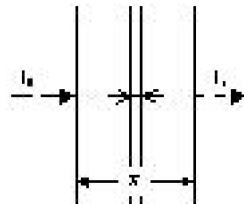


Figure 4.4 Passage d'un Rayon X à travers un obstacle

## 4.5. Rendement de la fluorescence

Une matière traversée par des rayons X présente une certaine réaction. Elle n'est pas seulement fonction des numéros atomiques ( $Z$ ) des constituants de la matière mais aussi de l'énergie des faisceaux incidents. La détermination des raies X caractéristiques est régie par une loi probabiliste. En effet, elle est sujette à un certain nombre de facteurs.

L'intensité des raies X caractéristiques dépend essentiellement de produit de trois facteurs :

- La probabilité afin que le nombre  $n$  des photons incidents puisse extraire un négaton d'une couche précise. Elle régit l'absorption des faisceaux par une matière.
- La probabilité, afin que la transition d'un négaton d'une couche supérieure vers le trou laissé par celui qui est expulsé, puisse se faire. En première approximation, les intensités relatives des raies caractéristiques d'un groupe en dépendent.
- La probabilité pour que le nombre  $n_f$  de photons produits puisse sortir de l'atome sans être affecté par l'effet **Auger**. Elle définit le rendement de la fluorescence ( $\omega$ ) qui est donnée par le rapport  $\omega = (n_f / n)$ .

Remarques

La quantité ( $n - n_f$ ) définit le nombre de photons réellement absorbé par l'atome. Ainsi le rendement de la fluorescence, pour une énergie donnée, varie aussi bien d'une couche électronique à une autre qu'en fonction du nombre  $Z$  de l'atome considéré. Si l'on ne prend que la couche K, le rendement  $\omega_K$  est inférieur à 0,1 pour les éléments dont les numéros atomiques  $Z$  sont en dessous de 18 comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau 4.1 Rendement de fluorescence

Éléments

K

Ca

Si

Al

Mg

Fe

Cr

Na

Cl

Br

P

S

O

N

H

C

Li

B

Si

Ge

As

Se

Te

Sn

Bi

Ru

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

W

Ta

Re

Os

Ir

Pt

Ag

Au

Pd

*Figure 4.5. Schéma d'étude de l'excitation primaire*

Pour déterminer l'intensité produite et la concentration d'un élément i contenu dans une portion de volume  $dv$  situé à une profondeur  $x$  de l'échantillon, la base du calcul vient de la définition même de la section efficace totale  $\sigma_i$ :

$$\sigma_i = [(P_i / n_i) / I_o] (4.5)$$

Où  $P_i / n_i$  : L'énergie fournie par atome de l'élément i,

$I_o$  : Energie par unité de volume du faisceau X incident,

$N_i$  : Nombre total d'atome i.

Or la puissance parvenue au détecteur s'écrit :

$$P_i = (P_{D,i} / A_D) 4 \pi R^2 = I_i 4 \pi R^2 (4.6)$$

Où  $P_{D,i}$  : Energie totale de l'élément i reçue par le détecteur,

$A_D$  : Surface du détecteur

Ainsi la relation (4.6) peut encore s'écrire sous la forme :

$$I_i = I_o \sigma_i n_i / 4\pi R^2 (4.7)$$

Et pour un atome i, la section efficace s'écrit :

$$\sigma_i = [(\mu_k)_o \omega_k f_k]_i (4.8)$$

Où  $(\mu_k)_o$  : Coefficient d'absorption photo électrique de l'élément vis-à-vis du rayon X incident

$\omega_k$  : rendement de fluorescence pour la raie considérée,

$f_k$  : Fraction de la raie considérée,

R : la distance de l'échantillon au détecteur.

Et dans une unité de volume  $dv = dx A_o / \sin\psi$ , le nombre d'atome  $n_i = N_i dx A_o / \sin\psi$ .

Avec  $N_i$  ; le nombre d'atome i par unité de volume.

Ainsi dans le cas où il n'y aurait aucune absorption, l'intensité émise par  $n_i$  atome contenu dans  $dv$  est :

$$dI_i = I_o [(\mu_i)_o \omega_i f_i] N_i dx \frac{A_o}{4\pi R^2 \sin\psi} (4.9)$$

l'équation 3 est incomplète car en réalité avant d'arriver sur  $dv$ , l'intensité  $I_o$  du faisceau mono énergétique incidente est déjà atténue et de même pour celui de la raie produite. Et de plus en considérant l'efficacité  $D_i$  du détecteur vis-à-vis de la raie caractéristique de l'élément i, on a :

$$dI_i = I_o \exp\left(-\frac{\mu_{i,0} x}{\sin\psi}\right) [(\mu_i)_o \omega_i f_i] \left(\frac{N_i dx A_o}{\sin\psi}\right) \exp\left(-\frac{\mu_{i,0} x}{\sin\psi}\right) \frac{D_i}{4\pi R^2} (4.10)$$

Où :  $\mu_{s,0}$  : Coefficient d'absorption massique de l'échantillon vis-à-vis de l'énergie incidente.

$\mu_{s,i}$  : Coefficient d'absorption massique de l'échantillon vis-à-vis de l'énergie émise.

Après intégration de  $dl_i$  suivant  $x$  ( $0 < x < T$ ), finalement l'intensité détectée s'écrit  $I_i$  :

$$I = I_0 A \cdot N_i [(\mu_{s,i}) \omega_i f_i] \left( \frac{D}{4\pi R} \right) \left\{ \frac{1 - \exp \left[ - \left( \mu_{s,i} + \mu_{s,0} \left( \frac{\sin \psi}{\sin \Phi} \right) \right) \frac{T}{\sin \psi} \right]}{(\mu_{s,i} + \mu_{s,0} \left( \frac{\sin \psi}{\sin \Phi} \right))} \right\} \quad (4.11)$$

Sachant  $I_i$ , on peut en découler la concentration massique ( $C_i$ ) de  $i$  par unité de masse de l'échantillon. Soit la relation liant  $C_i$  et  $N_i$  :

$$N_i = \frac{C_i \rho_s N_A}{(M_A)_i} \quad (4.12)$$

Avec :  $\rho_s$  : La densité de l'échantillon,

$N_A$  : Nombre d'Avogadro,

$M_A$  : Masse atomique

En insérant (6) dans (5), et en exprimant en fonction du coefficient d'absorption massique, on tire :

$$C_i = \frac{I_i \cdot 4\pi R \cdot \left( \mu_{s,i} + \mu_{s,0} \left( \frac{\sin \psi}{\sin \Phi} \right) \right)}{P_i D_i \sum_i \left[ \left( \frac{\mu_s}{\rho} \right)_i \omega_i f_i \right] \left\langle 1 - \exp \left\{ - \left[ \left( \mu_{s,i} + \mu_{s,0} \left( \frac{\sin \psi}{\sin \Phi} \right) \right) \frac{1}{\rho_i} \right] \left( \frac{\rho_i T}{\sin \psi} \right) \right\rangle \right\rangle} \quad (4.13)$$

Où :  $P_0$  : Nombre de coups du faisceau incident susceptible d'exciter  $i$ ,

$\rho_s T$  : Masse par unité de surface.

Remarques

Pour un corps de très grande épaisseur ( $T \rightarrow \infty$ ), l'équation (4.13) peut être réduite à :

$$I_{i_0} = \frac{C_i P_0 D_i \sum_i \left[ \left( \frac{\mu_s}{\rho} \right)_i \omega_i f_i \right]_i}{4\pi R^2 \left[ \left( \mu_{s,i_0} + \mu_{s,0} \left( \frac{\sin \psi}{\sin \Phi} \right) \right) / \rho_i \right]} \quad (4.14)$$

Pour une épaisseur infiniment mince ( $T \rightarrow 0$ )

En appliquant un développement limité au voisinage de 0 sur l'exponentielle ( $e^{-x} = 1 - x + (x^2/2!) - (x^3/3!) + (x^4/4!) - \dots$ ) et en se limitant à l'ordre 2, on a :

$$I_{i,r} = \frac{C_i P_i D_i \sum_z \left[ \left( \frac{\mu_z}{\rho} \right)_i \omega_z f_z \right]_r \left( \frac{\rho_i T}{\sin \psi} \right)}{4\pi R^2} \quad (4.15)$$

La disparition de  $\Phi$  indique que seule la distance de l'échantillon au détecteur influe sur la valeur de l'intensité mais non la position de l'un par rapport à l'autre dans l'espace.

Pour un échantillon pur et infiniment mince :

$$C_i = 1$$

Et en posant

$$\rho_i = \frac{4\pi R^2}{P_i D_i \left[ \left( \frac{\mu_z}{\rho} \right)_i \omega_z f_z \right]_r} \quad (4.16)$$

Alors

$$I_{pur,i} = \frac{1}{\rho_i \left[ \left( \mu_{i,o} + \mu_{i,f} \left( \frac{\sin \psi}{\sin \Phi} \right) \right) / \rho_i \right]} \quad (4.17)$$

#### 4.6.2. Excitation secondaire

Un corps quelconque est souvent constitué de multiples éléments ayant chacun leur propre énergie d'excitation. En plus d'être excité par  $I_o$ , il se trouve parfois qu'un autre élément  $j$  puisse encore l'être par  $I_j$ , d'où l'excitation secondaire. Ce cas est fréquent pour un corps épais composé de différents éléments. Mais pour pouvoir minimiser cet effet, le corps irradié devrait être mince, composé uniquement des éléments en trace. D'après les travaux de Sherman et en respectant les conditions suivantes : échantillon très mince, le faisceau  $I_o$  arrivant sur  $i$  et  $j$  est

parallèle. Alors on a l'expression de la correction  $\Delta I_{j,i}$  :

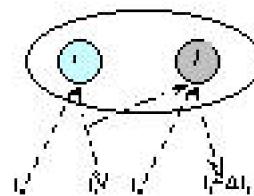
$$\Delta I_{j,i} = \left\{ P_o C_i \left[ \left( \frac{\mu_z}{\rho} \right)_i \omega_z f_z \right]_r C_j \left[ \left( \frac{\mu_z}{\rho} \right)_j \omega_z f_z \right]_r \frac{D_j}{4\pi R^2} \frac{\left( \mu_{i,o} + \mu_{i,f} \frac{\sin \psi}{\sin \Phi} \right)}{\rho_i} \right. \\ \times \left. \left[ \left( \frac{\sin \psi}{\mu_{i,o} / \rho_i} \right) \ln \left[ \left( \frac{\mu_{i,o}}{\mu_{i,f}} / \sin \psi \right) + 1 \right] + \left( \frac{\sin \Phi}{\mu_{i,f} / \rho_i} \right) \ln \left[ \left( \frac{\mu_{i,f}}{\mu_{i,o}} / \sin \Phi \right) + 1 \right] \right] \right\} \quad (4.18)$$

Ainsi la fraction  $(\Delta I/I)_{j,i}$  ; notée encore  $(\Delta I_{j,i} / I_j)$  s'écrit :

$$(4.19) \quad \frac{I_j^*}{I_j} = \frac{\mu_{e,i} \left[ \left( \frac{\rho_{e,i}}{\rho_e} \right)^{\mu_{e,i}} + I_{e,i}^{-1} \left( \frac{\rho_{e,i}}{\rho_e} \right)^{-1} \right]}{\left[ \left( \frac{\rho_{e,i}}{\rho_e} \right)^{\mu_{e,i}} \right]} \left[ \frac{\text{ad } \mu_{e,i} \ln \left( \frac{\rho_{e,i} / \rho_e}{\rho_{e,i}^{\mu_{e,i}}} + 1 \right)}{\rho_{e,i} / \rho_e} + \frac{\text{ad } \mu_{e,i}}{\rho_{e,i} / \rho_e} \right] \ln \left( \frac{\rho_{e,i} / \rho_e}{\rho_{e,i}^{\mu_{e,i}}} + 1 \right)$$

$$C_j = \rho_j \left( \frac{I_j^*}{1 + (\Delta I / I)_{j,e}} \right) \left( \frac{\mu_{e,i} + \mu_{e,j} \frac{\sin \psi}{\sin \Phi}}{\rho_e} \right) \quad (4.20)$$

Où  $I_j^*$  est l'intensité de  $j$  mesurés par le détecteur ( après l'effet d'interaction ).



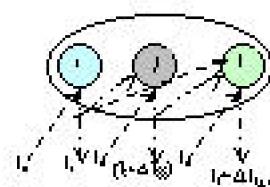
#### 4.6.3. Excitation tertiaire

Soit un corps composé de trois éléments  $i, j, k$  mélangés d'une façon à avoir un milieu isotrope. Il peut se passer que  $i$  puisse être non seulement directement excité par  $I_i$  et  $I_j$ , mais aussi être soumis à un troisième processus d'excitation dû à l'effet secondaire. C'est l'effet dit : excitation tertiaire. Les travaux de **Sherman**, **Shiawa** et **Fujino** ont montré que la correction apportée à une excitation tertiaire ( pour un échantillon mince ) n'excède pas de quelques pourcents. Leurs travaux sur le triplet  $N_i - F_e - C_r$  ont clairement démontré que :

$$(\Delta I / I)_{Cr-K, Fe-K, Ni-K} = (\Delta I / I)_{Cr-K, Fe-K} \cdot (\Delta I / I)_{Fe-K, Ni-K} \quad (4.21)$$

D'ailleurs, une approximation acceptable permet d'écrire la fraction suivante :

$$(\Delta I / I)_{i,j,k} \approx (\Delta I / I)_{i,j} \cdot (\Delta I / I)_{j,k} \quad (4.22)$$



## 4.7. Détection des rayons X [ 3 ], [ 4 ], [ 7 ], [ 23 ]

Puisque les rayons X ne sont pas détectables par nos cinq sens, des moyens techniques ont été élaborés pour assurer cette fonction d'où la chaîne de spectrométrie X. Elle permet de classer et d'assurer la traduction visuelle et des rayons X selon leurs énergies ( analyse qualitative ) ou leurs intensités ( analyse quantitative ).

Elle comporte essentiellement :

- Un générateur de rayon X
- Un circuit de refroidissement,
- Un détecteur,
- Un préamplificateur,
- Un M ,C ,A,
- Un micro-ordinateur.

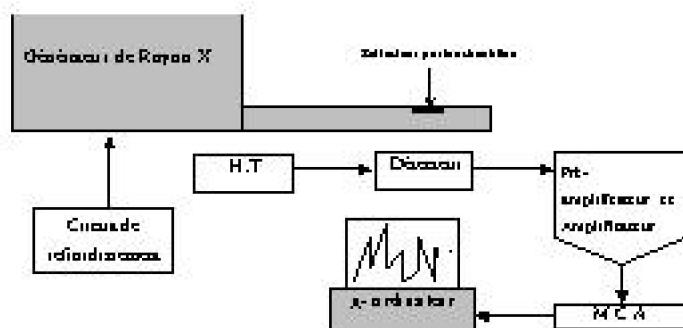


Figure 4.8 Représentation globale d'une chaîne de spectrométrie X.

### 4.7.1. Le générateur de rayon X

C'est un organe comprenant un système électromagnétique qui permet de produire un rayon X avec une énergie précise. Il est conçu selon le principe du tube de **Coolidge**.

### 4.7.2. Le circuit de refroidissement

A cause de l'élévation de température dans le tube à rayon X, le circuit de refroidissement est primordial et sert à stabiliser la température du tube à une valeur basse et stable. Ce circuit de refroidissement est à circulation d'eau. Mais ce dernier a une efficacité plus grande car il ne tient pas compte de la température de l'air extérieur. En effet, une pompe fait circuler constamment de l'eau refroidie à travers l'ailette du tube. Ce refroidissement est basé sur le même principe que le système de froid standard. L'évaporateur est collé à l'extérieur du bac à eau afin d'abaisser la température de l'eau réchauffée par l'ailette de refroidissement du tube à rayon X.

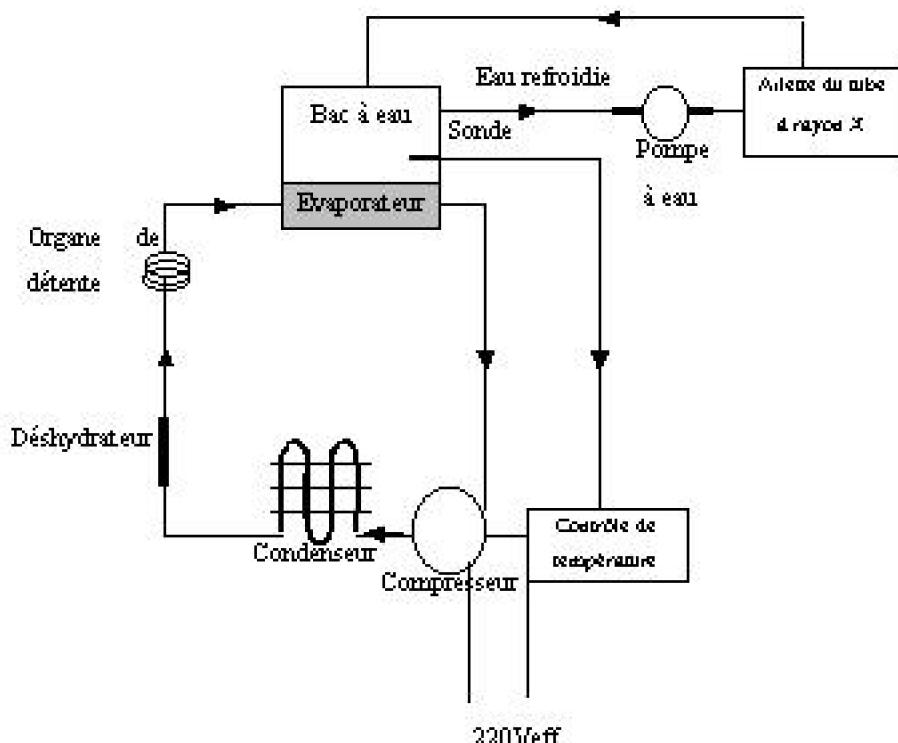


Figure 4.9. Description générale du système de refroidissement

#### 4.7.3. DéTECTEURS À SEMI-CONDUCTEURS

Ils sont beaucoup plus sensibles et performants que ceux à gaz. Ces avantages résident sur le fait que la création du couple négaton-trou lors de l'absorption des rayonnements dans le volume actif, au sein d'un semi-conducteur, nécessite une énergie moindre. Par conséquent, ils sont nettement de meilleure résolution par rapport aux détecteurs à gaz. En interagissant avec les éléments du détecteur, la radiation cède la majorité ou une partie de son énergie pour produire des charges électriques. La somme de toutes ces charges est la première information venant du détecteur. Selon la capacité du détecteur et la valeur des énergies incidentes, ces charges produisent des signaux électriques. Actuellement il existe plusieurs types, selon le tableau 4.2

Tableau 4.2 Types de détecteurs à semi-conducteur

<b>Types</b>	<b>Principales réalisations</b>
radiations	détectés
Spectroscopie	X.
Spectroscopie	X.
Spectroscopie	X.

##### 4.7.3.1. Energie de création couple négaton-trou

L'énergie de création du couple négaton-trou d'un détecteur varie selon la nature chimique de ses éléments constitutifs. Plus cette énergie est faible, plus le détecteur est sensible. Mais ce n'est pas pour autant qu'il soit efficace pour toutes sortes de radiations.

**Tableau 4.3 Energie de création de couple négaton-trou de quelques détecteurs**

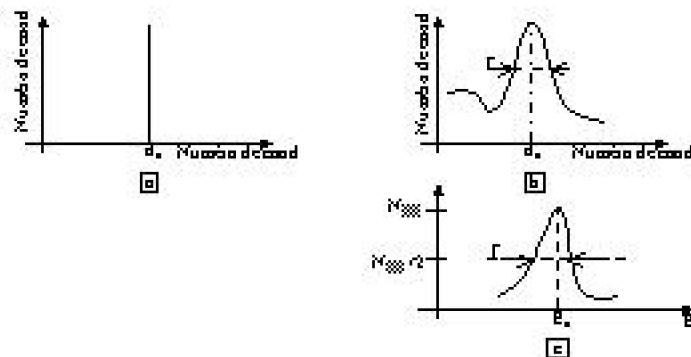
Énergie de détecteur de couple négaton-trou ( $E_{nt}$ )	206 Scintillateurs ergs/iques Gaz Scintillateurs Soltides ev 40 ev 300 ev
---	--

#### 4.7.3.2. Résolution d'un détecteur ( R% )

Un des paramètres majeurs pour déterminer la qualité d'un détecteur est sa résolution qui est définie comme la largeur à mi-hauteur d'un pic. Théoriquement, pour un rayonnement monoénergétique incident reçu par le détecteur, le nombre de radiation collecté devrait être confiné dans un seul canal correspondant comme le montre la figure 4. 10 a). Mais en réalité, il n'en est point ainsi. En effet compte tenu de la nature statistique du processus d'ionisation ou d'excitation et de l'interaction des radiations avec la nature du détecteur lui-même, la forme observée du pic est élargie pour satisfaire la distribution de Gauss. Le bruit électronique de l'amplificateur et le reste des organes de traitement des signaux contribuent, d'une façon moins perceptible, à cette déformation ( figure 4.10 b). Cependant les facteurs déterminants pour la résolution sont :

- Le type du détecteur
- La taille du détecteur
- La qualité du détecteur

Certains détecteurs particuliers ont une résolution dépendante de leur tension de polarisation. Ainsi , la détermination de leur tension de polarisation leur permet une utilisation optimum afin d'obtenir une bonne résolution.



*Figure 4.10 Effet de la recombinaison de charge sur le pic*

Théoriquement, la résolution d'un détecteur s'exprime par :  $R (\%) = (\Gamma / E_0)$ , avec  $\Gamma$  ; la largeur à mi-hauteur du pic. En considérant le figure 4.11 c) et en tenant compte de la forme Gaussienne du pic ;  $\Gamma = 2,35 \sigma$ .  $\sigma$  étant l'écart type et qui est proportionnel au nombre de porteur de charge (N) qui est lui-même lié à l'énergie  $E_{nt}$  par la relation  $N = (E_0 / E_{nt})$ .

En effet, les porteurs de charges sont créés lors de l'interaction des énergies incidentes avec les composants du détecteur ou de l'ionisation de ces derniers. Pratiquement, N est grand ce qui nous permet de déduire que la création des porteurs de charges suit la loi de **Poisson**. De plus en considérant la réponse linéaire du détecteur vis-à-vis des énergies incidentes, nous pouvons finalement écrire :

$$R (\%) = [2,35 / (N)^{1/2}] \quad (4.23)$$

Où  $(N)^{1/2}$  indique une fluctuation, ce qui laisse interpréter que R (%) représente les fluctuations de réponse du détecteur autour d'un évènement.

#### **4.7.3.5. Polarisation du détecteur**

Ayant une valeur pratiquement élevée et très stable, une haute tension polarise le détecteur, ce qui rend possible la collecte des charges. Sa valeur est fonction de la nature et de la géométrie du détecteur. Elle peut être également positive ou négative selon le détecteur. Le circuit électrique du détecteur est souvent conçu selon le principe du convertisseur DC / DC pour sa précision. Du fait de la dépendance de la résolution à la valeur de la tension de polarisation, les blocs alimentation de haute tension ont des tensions de sorties variables :

0 – 3000 V / 10 mA pour les scintillateurs

0 – 5000 V / 30 µA pour les semi-conducteurs.

#### **4.7.4. Préamplificateur**

Son rôle est de cueillir et d'intégrer les signaux venant du détecteur. Pour ce faire :

- Il convertit les signaux en des impulsions dont les hauteurs sont proportionnelles à chaque valeur de la charge produite par le détecteur.

- Il filtre également les bruits de fond d'origine électronique omniprésents à la sortie du détecteur.

- Il sert à récupérer le plus de signal possible venant du détecteur.

Actuellement, il existe trois types de préamplificateurs : en tension, en charge et en courant, mais les deux premiers sont les plus utilisés.

Le préamplificateur a généralement deux blocs de circuits distincts : un circuit intégrateur suivi d'un autre qui assure à la fois une amplification et une adaptation d'impédance (figure 4.1 ).

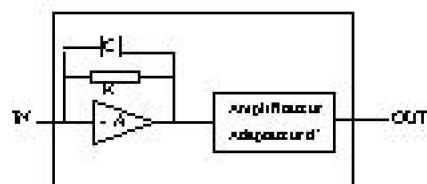


Figure 4.11 Schéma simplifié d'un préamplificateur

Figure 4.11 Schéma simplifié d'un préamplificateur

#### 4.7.5. Amplificateur

Il assure une proportionnalité constante entre chaque impulsion venant du préamplificateur et sa sortie. Il élimine l'empilement des signaux qui subviennent lors d'une détection de rayonnement surtout à haute activité. Il maintient également l'amplitude du signal à sa sortie dans la gamme de 0 à 10 V pour que le reste du système de traitement ( M.C.A ) puisse fonctionner correctement. De cette façon, chaque énergie comprise entre  $E$  et  $E+\Delta E$  sera proportionnellement traduite en une impulsion d'amplitude de  $V$  à  $V+\Delta V$ .

#### 4.7.6. Analyseur multi-canal ( M.C.A )

C'est un regroupement de discriminateur différentielle dont l'intervalle de chaque fenêtre est très fin. Ainsi son rôle est de classer à des adresses précises dans une mémoire chaque impulsion venant de l'amplificateur, après que celles-ci aient été converties par un C.A.D. (Convertisseur Analogique-Digital). Par conséquent, un numéro de canal correspond à une énergie fixe reçue par tout le système en amont selon la figure ci-dessous.

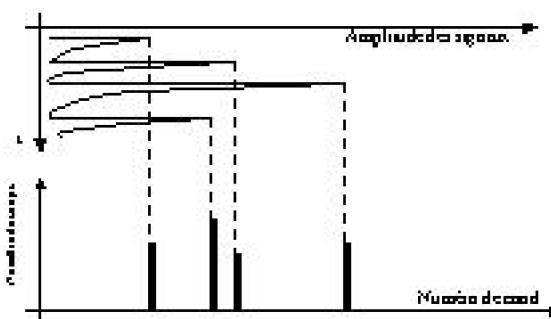


Figure 4.12 Correspondance amplitude-Numéro de canal

#### 4.7.7. Le micro-ordinateur

Il stocke les données du spectre dans sa mémoire et permet le traitement de ceux-ci afin d'en tirer conclusion lors des analyses qualitatives ou quantitatives. Grâce à ce système, on peut visualiser à l'écran le spectre obtenu et d'effectuer les dépouillements nécessaires au moyen des divers logiciels d'analyses.

### 4.8. Principe de la méthode d'analyse TXRF [ 10 ], [ 11 ], [ 23 ]

---

Pour vérifier l'efficacité et la fiabilité du système *KEN-001*, il nous faut effectuer des essais et des analyses réelles. Nous disposons d'une chaîne de spectrométrie X qui peut exploiter la méthode de la fluorescence X à réflexion totale ( TXRF : Total reflection X-Ray Fluorescence ). En effet, la méthode de la fluorescence X permet de détecter des éléments de très faible concentration dans un échantillon. C'est une technique très pointue qui consiste à affiner l'efficacité d'une chaîne. Comme la limite de détection ( LD )<sub>j</sub> s'écrit :

$$(LD)_j = 3C_j \frac{\sqrt{(N_b)_j}}{N_j} \quad (4.24)$$

Avec :  $C_j$  : La concentration de l'élément j,

$(N_b)_j$  : Bruit de fond relatif à j,

$N_j$  : L'aire nette de l'élément j.

Nous voyons donc que la limite de détection est une fonction linéaire de  $(N_b)_j$ . La méthode TXRF consiste à minimiser les bruits de fond d'origines diverses. Ils proviennent des interactions du rayon X primaire avec les réflecteurs, de l'échantillon à analyser, du rayonnement de freinage et de la fenêtre du détecteur. Ainsi, on obtient une limite de détection qui tend vers une valeur très faible.

#### 4.8.1. Types d'analyses

Il faut considérer deux types d'analyses : analyse qualitative et analyse quantitative.

##### 4.8.1.1. Analyse qualitative

Elle permet de faire l'inventaire de tous les éléments présents dans un échantillon lors d'une analyse. Nous avons vu dans la première partie que chaque élément excité par un rayon X primaire émet des raies X caractéristiques ( à condition que le rayon X primaire puisse avoir une énergie nécessaire et suffisante pour y parvenir ). Celles-ci sont collectées par la chaîne et visualisées sur l'écran d'un micro-ordinateur . Le classement et la reconnaissance se font par logiciel et après avoir établi préalablement une droite d'étalonnage. Ce type d'analyse ne donne qu'une estimation visuelle de la quantité de

l'élément en question, donc sans précision sur la quantité.

#### 4.8.1.2. Analyse quantitative

C'est une analyse qui nous permet d'évaluer la quantité ( ou la concentration ) d'un élément dans un échantillon excité. L'échantillon analysé, donc déposé sur le réflecteur porte-échantillon est d'une quantité très faible pour minimiser encore le bruit de fond. Ainsi en partant de la relation ( 4.10 ) mais en regroupant les termes relatifs à chaque caractères phyco-chimique et après intégration, nous pouvons écrire :

$$I_j = G_o K_j (\rho_j d) \frac{1 - e^{-a_j \rho d}}{a_j \rho d} \quad (4.25)$$

Avec  $G_o$  : facteur de géométrie,

$K_j$  : efficacité relative d'excitation- détection,

$a_j$  : coefficient d'absorption massique de l'échantillon  $j$ ,

$\rho_j d$  : masse surfacique de l'élément  $j \equiv$  concentration,

$[ (1 - e^{-a_j \rho d}) / a_j \rho d ]$  : facteur de transmission.

Pour notre cas, la quantité d'échantillon déposée sur le porte-échantillon se repartie uniformément, donc la relation ( 4.25 ) peut encore s'écrire sous la forme :

$$I_j = G_o K_j (\rho d) \quad (4.26)$$

Ce qui montre que l'intensité produite par un élément  $j$  est une fonction linéaire de la concentration. Pour ne pas à considérer le facteur de géométrie  $G_o$  ( qui est constant pour toute analyse ), nous utilisons une méthode comparative. Nous introduisons alors une autre solution dont la concentration  $C_s$  est connue : *solution standard*.

Ainsi son intensité peut s'écrire :

$$I_s = G_o K_s (\rho d) \quad (4.27)$$

En faisant le rapport  $I_j / I_s$ , on a :

$$\frac{I_j}{I_s} = \frac{K_j}{K_s C_s} C_j \quad (4.28)$$

Le terme

$$\frac{K_j}{K_s C_s}$$

est constant et se détermine expérimentalement par l'étalonnage de la chaîne de spectrométrie. Donc  $I_j / I_s$  est encore une fonction linéaire de  $C_j$ .

#### 4.8.2. Préparation des réflecteurs porte-échantillons

Puisque les réflecteurs sont d'usages fréquents, alors leurs préparations exigent des précautions particulières. La moindre impureté est détectée par la chaîne de spectrométrie X dont la sensibilité peut aller jusqu'à quelques p.p.b. Les étapes de préparation des réflecteurs sont donc :

- Lavage avec de l'acétone,
- Rinçage avec de l'eau bidistillée,
- Lavage avec de l'eau bidistillée,
- Test de confirmation de la propreté du réflecteur avec la chaîne d'analyse.

#### 4.8.3. Préparation de l'échantillon

Pour justifier nos hypothèses sur le choix des matériaux du plateau qui était surtout d'éviter la contamination des échantillons nous devons effectuer des analyses. Seuls les résultats peuvent confirmer et justifier nos choix, en faisant des comparaisons entre les échantillons analysés d'une part en utilisant **KEN-001** et d'autre part sans lui. Pour cela nous analysons de l'eau douce, comme échantillon.

Nous voulons un échantillon préparé de 5 ml. Comme l'analyse par TXRF est une analyse comparative, alors nous utilisons du Cobalt comme standard interne. Dans 5 ml de solution préparée, il nous faut 5 ppm de Cobalt prélevé à partir d'une solution mère à 1000 ppm. Alors, il nous faut prélever 25 µl de solution mère et le verser dans 4975µl de l'échantillon pour avoir le volume total voulu.

C'est alors que l'on prélève 10µl de la solution préparée à l'aide d'un micro-pipette que l'on déposé au centre des réflecteurs ( cette faible quantité nous permet d'avoir une densité superficielle de l'ordre de  $4 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^2$ , ce qui rend négligeable la correction d'absorption). Ensuite, on sèche les réflecteurs dans un dessicateur à l'aide d'une pompe à vide. De cette façon, on évite également la contamination. Après avoir été séchés ainsi, les échantillons sont prêts pour analyses.

#### 4.8.4. Préparation de la chaîne de spectrométrie X

Pour nos analyses, le réglage de la chaîne de spectrométrie X utilisée par le département de la fluorescence X de MADAGASCAR – I.N.S.T.N. a été fixé avec les valeurs suivantes, ainsi que les caractéristiques de chaque organe de la chaîne.



Générateur de rayon X ( SIEMENS KRISTALLOFLEX 710H) Courant du tube : 30 mA



*Tube à rayon X à anode en molybdène (SIEMENS type KFF, Model 4K ) Tension du tube : 40 kV*



*Détecteur Ultra LEGe : Model SL30180 refroidi par un Cryostat 7500, model SL 30  
Préamplificateur CANBERRA, Model 2008*



*M.C.A. ( Amplificateur et Intégrateur incorporé), CANBERRA, Model 1510.  
Micro-ordinateur IBM 486 dans lequel sont installés les logiciels d'analyses (S100 et AXIL*

#### 4.8.5. Résultats

Après avoir effectué l'étalonnage de la chaîne et les séries d'analyses pendant chacune une durée de 300s, nous avons obtenu les résultats suivants :

SERIE N°01

**Tableau 4.4 Résultats d'analyses 01**

# Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE SPECTROMETRIE X

## Réas

KEN-001

Concentration

(

p.p.b)

120,06

±

90,78

200,66

±

133,92

50,56

±

6,69

20,01

±

4,66

34,96

±

3,76

20,94

±

6,53

32,54

±

4,86

20,61

±

3,88

365,67

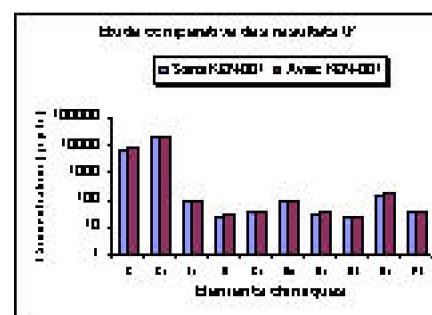
±

8,67

20,06

±

11,05

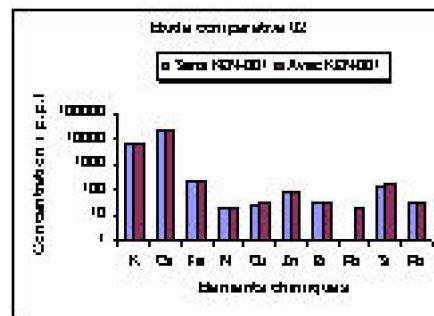


*Figure 4.13 Histogramme 01*

SERIE N°02

Tableau 4.5 Résultats d'analyses 02

Analys
KEN-001
Concentration
(
p.p.b)
<b>6986,52</b>
±
99564
<b>20047,87</b>
±
<b>143,58</b>
<b>226,59</b>
±
<b>6,05</b>
<b>10,98</b>
±
<b>4,24</b>
<b>28,90</b>
±
<b>3,59</b>
<b>20,92</b>
±
<b>4,35</b>
<b>30,60</b>
±
<b>4,05</b>
<b>20,50</b>
±D
5,82
<b>\$56,09</b>
±
<b>7,28</b>
<b>30,66</b>
±
<b>8,64</b>



SERIE N°03

Tableau 4.6 Résultats d'analyses 0

**Atlas**

KEN-001

Concentration

(

p.p.b)

K256,98

±

129,60

03722,66

±

120,45

84,00

±

5,66

20,25

±

4,28

20,29

±

3,89

20,63

±

4,65

20,59

±

5,48

20,90

±D

6,43

556,96

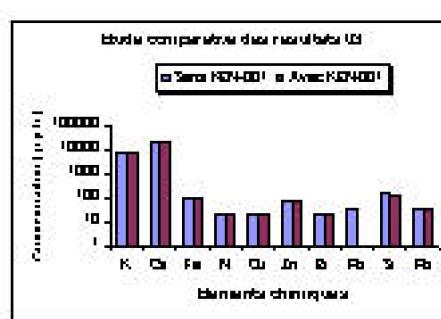
±

0,54

20,49

±

9,49



**Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE  
SPECTROMETRIE X**

---

*Figure 4.15 Histogramme 03*

SERIE N°04

**Tableau 4.7 Résultats d'analyses 04**

<b>Atomes</b>
KEN-001
Concentration
(
p.p.b)
<b>K392,60</b>
±
<b>100,23</b>
<b>20032,80</b>
±
<b>138,08</b>
<b>88,15</b>
±
<b>5,56</b>
<b>Mg,98</b>
±
<b>3,68</b>
<b>Zn,65</b>
±
<b>3,24</b>
<b>Zn,90</b>
±
<b>4,00</b>
<b>B3,09</b>
±
<b>3,66</b>
<b>Rb</b>
LD
<b>\$20,55</b>
±
<b>6,90</b>
<b>Bb,20</b>
±
<b>8,24</b>

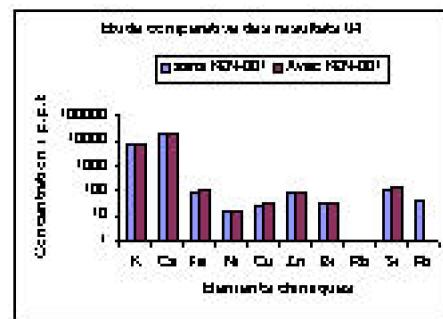


Figure 4.16 Histogramme 04

SERIE N° 05

Tableau 4.8 Résultats d'analyses 05

# Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE SPECTROMETRIE X

## Résultats

KEN-001

Concentration

(

p.p.b)

1462,50

±

100,86

20642,57

±

189,72

86,56

±

5,68

20,78

±

4,33

20,81

±

5,98

24,58

±

4,09

23,96

±

3,53

20,96

±

8,06

30,65

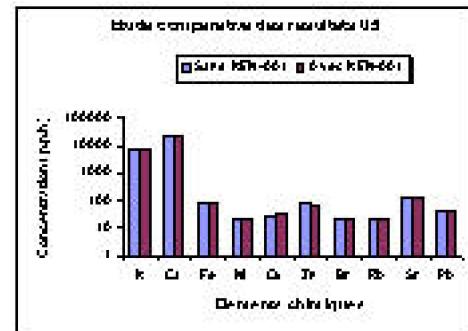
±

0,05

24,50

±

12,50



*Figure 4.17 Histogramme 05*

#### 4.8.6. Interprétations

D'après les résultats que nous avons obtenus, nous pouvons constater que les valeurs sont très proches les unes des autres. Néanmoins, nous pouvons constater de faibles écarts entre des valeurs d'une même série. Ces valeurs peuvent être supérieures ou inférieures à celles qui sont obtenues par la méthode habituelle. Dans certains cas également le Rb n'a pas de valeur, mais ceci vient simplement du fait qu'il est en trace donc sa concentration est inférieure à la limite de détection de la chaîne. Lors des analyses statistiques nous avons les pourcentages des écarts des résultats présentés ci-dessous :

**Tableau 4.9 Pourcentage des écarts des résultats**

Pourcentage
dématiques
erreurs
(
%
)
Série
n°01
0,5
0,8
5,5
5,0
6,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
Rb
Ba
Ba
Ba

Pour les éléments dont les concentrations sont élevées, les erreurs sont très faibles et sont tous inférieurs à 1%. Mais lorsque les concentrations sont très faibles, les valeurs sont remarquablement différentes mais n'excèdent pas le 8,6%. Si nous ne regardons que les valeurs obtenues sans l'emploi de **KEN-001**, nous remarquons de même que celles-ci diffèrent de quelques peu. Ceci apparaît également pour les valeurs dans une même série. Ce qui nous prouvent que les écarts, assez faible, pour les deux méthodes ne sont pas dus à l'emploi de **KEN-001** mais des autres facteurs tels que :

Lors des transports des échantillons vers la chaîne,

Lors de l'analyse même, pendant le temps de collecte car à cet instant, la partie où il y a l'échantillon n'est pas couvert,

Ou autres facteurs,...

Ceci renforce encore une fois le fait que ces différences ne sont pas les effets de KEN-001 car autrement les valeurs pour un même éléments dans des séries différentes devraient être identiques.

D'où, on peut dire que l'emploi de KEN-001 n'introduit pas de contamination.

#### 4.9. Conclusion

Les rayons X ont beaucoup d'applications mais cela n'implique pas pour autant qu'ils soient inoffensifs surtout à très fortes intensités. Avec une énergie et intensité précises et modérées, ils trouvent leurs utilisés dans le contrôle de qualité des produits alimentaires, dans la médecine, dans les industries métallurgiques, etc..... La détection et le traitement spectral d'un rayon X relèvent une difficulté pour l'analyse d'un échantillon car en réalité il faut que chaque organe de détection ait une réponse linéaire. La figure 1.14 résume globalement les étapes franchies depuis l'éjection d'un négaton au sein d'un atome jusqu'à la visualisation de spectre des rayons X.

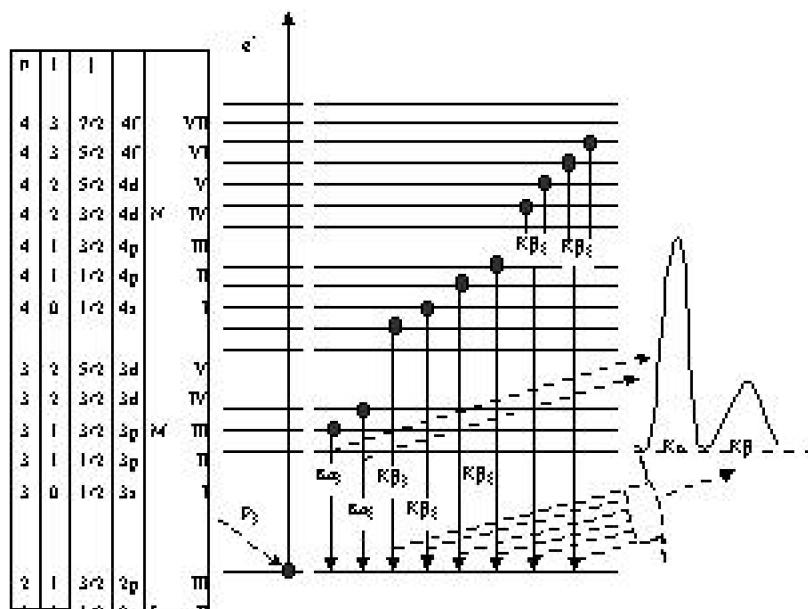


Figure 4.18 Etapes de production de raie X caractéristique

Figure 4.18 Etapes de production de raie X caractéristique

# CHAPITRE V

## 5. KEN-001

### 5.1. Présentation de la logique du KEN-001[ 1 ], [ 8 ], [ 13 ], [ 37 ]

---

Cette étude s'appuie essentiellement sur la capacité de **KEN-001** à fonctionner le plus longtemps possible sous ses conditions optimales d'utilisation. Elle fait l'objet alors d'une optimisation de la fiabilité du système pour prévoir les stocks des composants et les fréquences d'entretien. La prévision de sa fiabilité repose sur de nombreuses hypothèses ( choix des composants, choix des matériaux de fabrication, etc...) et se base sur l'optimisation de fiabilité pour entre autres minimiser les risques de défaillance. Aucun système n'a une durée de vie illimitée, mais sa longévité repose souvent sur l'emploi des composants onéreux. Mais, la recherche de la fiabilité de **KEN-001** ( comme tout autre système ) doit également tenir compte du moindre coût de réalisation. La représentation logique du système **KEN-001** est un ensemble d'état de son fonctionnement ou non du système et les relations liant les différents états. La conception et la réalisation d'un système exigent une étude de sa fiabilité et sa disponibilité. La représentation de la logique ne tient compte ni de la méthode de calcul de la fiabilité, ni de sa disponibilité. Pour cela, considérons **KEN-001** qui est formé de n éléments en dépendance l'un de

l'autre et remplissant chacun une fonction précise, alors on a les deux cas suivants :

L'élément est en marche dans le système et présente deux états : état de marche, état de panne.

L'élément est normalement à l'arrêt dans le système et nécessite un démarrage assisté par un élément principal ( Stand-by )

Afin de tenir compte de tous les cas possibles pour la bonne marche ou non de ce système, introduisons les actions extérieures ( erreurs humaines, erreurs accidentelles, ... ) comme états des éléments du système. Ceci nous conduit à l'inventaire suivant, pour le système :

- en marche
- à l'arrêt en bon état,
- en réparation,
- à l'arrêt en panne.

Comme chaque élément possède deux états alors le système admet  $2^n$  états. Représentons les trois points essentiels pour la représentation de la logique d'un système : le diagramme de fidélité, l'arbre des défauts, les coupes minimales.

### 5.1.1. Le diagramme de fidélité.

C'est un graphe sans circuit qui représente les états de bon fonctionnement du KEN-001. Il admet une entrée et une sortie dont les blocs représentent les éléments du système et les relations entre les différents éléments. Les blocs ou les fonctions indésirables qui provoquent une défaillance sont placés en série et ceux dont la défaillance ne provoque aucune défaillance du système sont mis en parallèle. Dans le cas de KEN-001, nous ne disposons que de quatre éléments majeurs ; la manche ( E1 ), le plateau ( E2 ), le circuit électronique ( E3 ), le circuit aéraulique ( E4 ). Alors nous avons :

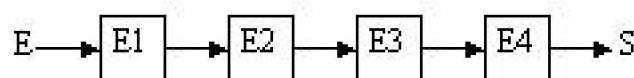


Figure 5.1. L'arbre de fidélité de KEN-001

Ce système fonctionne si et seulement s'il existe un *chemin de succès* entre l'entrée et la sortie du diagramme.

### 5.1.2. L'arbre des défauts

Connu aussi sous les noms d'arbre de défaillance, arbre des causes, ou arbre des fautes, c'est une représentation des états de défaillance d'un système. Cette représentation est très utile pour la simplification d'un système car elle montre graphiquement les combinaisons d'événements qui conduisent à la réalisation des événements indésirables. Ce processus conduit à une déduction qui permet de conclure des événements de base, indépendants entre eux et probabilisables. Ces événements de base peuvent être des pannes, des erreurs humaines et d'autres conditions extérieures. Dans notre cas, l'arbre

des défauts est donc :

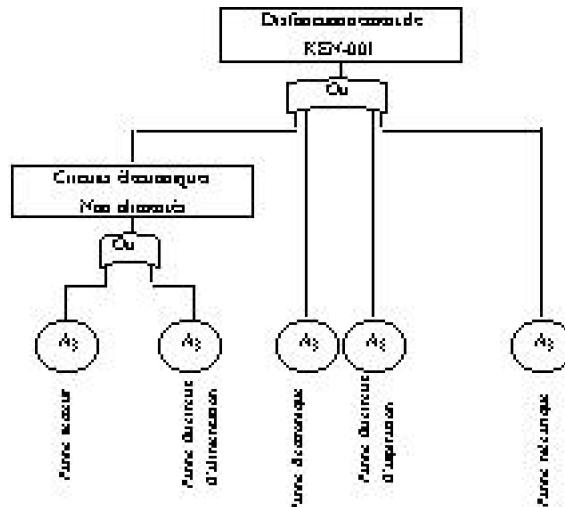


Figure 5.2. L'arbre de défaillance du KEN-001

L'établissement de ce processus permet de minimiser les conditions de non-fonctionnement du système et ainsi d'éliminer au maximum les causes des événements de bases. On définit trois types de panne mis en évidence sur la courbe en Baignoire.



Figure 5.3. Courbe en Baignoire

Où les pannes infantiles sont dues aux déverminage

les pannes d'usures sont définies par la limitation de vie prévue par les essais et l'endurance,

les pannes aléatoires sont l'objet principal des travaux de fiabilité.

### 5.1.3. Minimisation des risques de défaillances

Pour que KEN-001 réponde aux critères de fiabilité, nous avons pris des précautions pour sa conception et sa réalisation entre autres :

pour l'électronique :

- L'exploitation des moteurs (leurs circuits de pilotage)

- Le choix des composants et le surdimensionnement de ceux-ci pour éviter les surchauffes (les transistors de puissance des moteurs, les transistors ballast de l'alimentation, etc...) donc durée de vie élargie.

Pour la mécanique :

- L'utilisation des roulements pour le système de plateau,
- La lubrification du vis d'Archimède,
- Le dimensionnement des ressorts de compressions de faibles raideurs pour ne pas forcer le moteur de la manche,
- L'insertion de bloc de cuivre pour la butée de la vis d'Archimède avec le guide manche,
- etc...

Pour l'aspiration :

- L'utilisation de ventilateur surdimensionné,
- L'utilisation du moteur d'entraînement de forte puissance par rapport au système.

## **5.2. Cohérence de KEN-001**

---

A chaque système, un des points à vérifier est la cohérence afin de s'assurer de sa fiabilité. En se référant au diagramme de fiabilité, à l'arbre des défauts, et au cahier de charge de KEN-001, nous pouvons conclure alors qu'il possède les caractéristiques suivantes :

- La bonne marche de tous les éléments entraîne la bonne marche du système,
- La panne de tous les éléments entraîne la panne du système,
- Lorsque **KEN-001** est en marche, aucune intervention de maintenance n'induit sa panne,
- Lorsque **KEN-001** est en panne, aucune défaillance ne rétablit son fonctionnement.

Ces quatre points caractéristiques de KEN-001 nous permettent d'affirmer et de conclure que c'est bien un système cohérent.

## **5.3. Coûts de fabrication de KEN-001**

---

Ci-dessous le devis matériel de l'appareil sans tenir compte de la valorisation de temps de réalisation de l'ensemble et de la mise au point.

**Tableau 5.1. Coûts de fabrication de KEN-001**

~~Nomination~~  
total  
(  
fmg  
)  
~~15000eur~~  
et  
moteur  
~~20000~~  
d'aspiration  
~~15000~~  
des  
circuits  
électroniques  
~~60000~~  
~~10000~~  
232  
~~15000~~  
~~10000eur~~  
7  
segments  
~~10000~~  
électromécanique  
(  
12V  
/  
220V-10A  
)  
~~100000~~  
2064  
~~105.000~~  
(  
TTL  
+  
CMOS  
)  
~~10000~~  
555  
~~10000~~  
339  
~~10000~~  
317  
~~10000~~  
~~252005~~  
~~202005~~

**50.000**  
122  
**50.0027**  
**54000**ormateur  
220V/15V  
**50000**  
blindé  
**52000**  
de  
fil  
**50000**nce  
1/4W  
**50000**écapacité  
non-polarisée  
**50000**écapacité  
(  
Alimentation,  
autres  
)  
**52.000**es  
**50000**re (matériaux  
et  
réalisations  
)  
**309A000**  
fmg

## **CONCLUSION GENERALE**

Les hypothèses et les critères de KEN-001 que nous avons établis et qui constituent le cahier de charge sont vérifiés et justifiés par les différentes étapes de sa fabrication. Ainsi KEN-001 peut supporter 7 réflecteurs porte-échantillons et les placer avec efficacité sur le porte réflecteur. De même, le dépôt des réflecteurs sur le plateau ne contamine en aucune manière les échantillons qui y sont déposés. Non seulement, nous n'avons modifié, de quelques manières qu'ils soient, les géométries de la chaîne mais de plus l'efficacité de KEN-001 est d'une réussite. De ces faits, le système échangeur d'échantillon autonome apporte une amélioration technique, puisqu'il fait partie intégrante de la chaîne d'analyse dans le département de la fluorescence X de Madagascar-I.N.S.T.N. Contrairement aux instruments importés, son coût est très réduit pour son utilité et sa précision et peut donc à son tour être exporté ( si besoin est ). En effet, d'après nos recherches, KEN-001 est le seul instrument à effectuer ce genre d'opération. Il possède

alors son originalité, à la fois du point de vue de conception mais également de fonctionnalité.

Ces travaux confirment de plus que les techniciens nationaux peuvent à la fois concevoir et fabriquer des instruments de précision. Ceci allége les chercheurs dans l'accomplissement de leurs tâches dans leurs recherches.

Bref, KEN-001 associe la précision et la neutralité ( du point du vu de la contamination ), et s'intègre donc parmi les instruments utiles dans le domaine de la fluorescence X du nucléaire. Des travaux similaires peuvent également être conçus et réalisés dans d'autres domaines de la recherche qui exigent des instruments de précision.

**Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE  
SPECTROMETRIE X**

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A. Pagès, M. Gondran, ***Fiabilité des systèmes***, EYROLLES, 1980
- AIEA, CNESTEN, INSTN, ***Cours régional post-universitaire de radioprotection de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique, Volume 1***, RABAT 1998.
- A.I.E. A. ***Selected topics in Nuclear Electronics***, Vienna, 1986
- A.I.E.A. ***Nuclear Electronics, Laboratory Manual***, Vienna, 1989
- A.I.E.A. ***Protection of Nuclear instruments and other Laboratory Equipment***, Part I, Vienna, 1994.
- A.I.E.A. ***Protection of Nuclear instruments and other Laboratory Equipment***, Part II, Vienna 1994.
- A.I.E.A. ***X-RAY GENERATOR***, SIEMENS Modem Kristalloflex 710H. 1994
- André MONTAGNE, ***Cours de traçage des métaux en feuilles***, EYROLLES, 1977.
- Bruce L. Olney, ***8-bit cross assemblers. User's manual***. 1989.
- B. Holynska, B. Ostachowocz, D. Wegrzynek, ***Simple method of determination of copper, mercury, and lead in potable water preliminary pre-concentration by total reflection X-ray fluorescence spectrometry***, Spectrochimica, Acta A, Part B, 1996.
- C.J. Sparks, Jr, ***Quantitative X-Ray fluorescent analysis using fundamental parameters***, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37830.

Christian CAZAUBON, *Les microcontrôleurs HC11 et leur programmations*,  
MASSON, 1994.

CLYDE F. COOMBS, Jr . *Basic Electronics Instrument Handbook*, ed.The Kingsport  
Press

Christian TAVERNIER, *Microcontrôleur 68HC11*, Versions UVROM et EEPROM,  
DUNOD, 1997.

Claude BARLIER, Lionel GIRARDIN, MEMOTECH, *Matériaux et usinage*,  
CASTEILLA, 1993.

Edmond R. *Cours théorique de fluorescence X*, INSTN, 2000

Gérard RAMBOLAMANANA, *Cours d'électronique Nucléaire*, INSTN, 2000

H. Podvin, D. Meyer, *Guide des circuits intégrés*, BARIET, 1986.

**HC11, REFERENCE MANUAL**, MOTOROLA .INC, 1989

**HC11, PROGRAMMING REFERENCE GUIDE**, MOTOROLA .INC, 1995.

I. ARTOBOLEVSKI, *les mécanismes de la technique moderne*, MIR MOSCOU,  
Tome 3, 1984.

Ian R. Sinclair, *Sensors and Transducers*, Second edition, Redwood Books, 1991

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MESUREMENTS,  
*Radiation quantities and Units*, Report 33, ICRU, Bethesda, MD ( 1980 ).

Jean Chatelain, *MACHINES ELECTRIQUES*, Ed. GEORGI.

J. Nowak, D. Sacquepey, R. Quatremer, J. P. Trotignon , *Construction TSA*,  
NATHAN, 1989

*Liner integrated circuits*, Texas instruments Incorporated, 1979.

Michael F. ASHBY, David R.H. JONES, *Matériaux, 2. microstructure et mise en  
oeuvre* EYROLLES, 1980

M. DOUCHEZ, *Etude des transferts en mécanique des fluides monophasiques*,  
MASSON & CIE, Tome I, 1965

Marcel GUILLOU, *commande et asservissement hydrauliques et  
électrohydrauliques*, TEC & DOC, LAVOISIER, 1992.

**MC68HC11F1, TECHNICAL DATA**, MOTOROLA .INC, 1995.

Philippe André, *La liaison RS232*, Collection ETSF

R. Bidard, J. Bonnin, *Energetique et turbomachines*, EYROLLES, 1979.

R. Beuchat, *Microcontrolleur, Famille 68HC11*, LAMI-EPFL, LMP-EIG, 1994.

R. COMOLET , *Mécanique expérimentale des fluides*, MASSON, 1976

Tovondahiniriko FANJIRINDRATOVO, *Etude et conception d'un système  
d'acquisition numérique de données de comptage global de la radioactivité  
ambiante et de position par GPS*, MADAGASCAR-INSTN, 2000.

Data book : RS232, [www.maxim-ic.com](http://www.maxim-ic.com)

[www.evasion.imag.fr](http://www.evasion.imag.fr)

Ventilateur centrifuge, [www.thermexcel.com](http://www.thermexcel.com)

---

Etude autour de 68HC11, [www.neveu.pierre.free.fr](http://www.neveu.pierre.free.fr)

**Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE  
SPECTROMETRIE X**

---

# **ANNEXE**

## **ANNEXE 01**

Programme de pilotage du « système échangeur d'échantillon autonome pour la chaîne de spectrométrie X »

```
eeprom equ $FE00
regbs equ $1000
portg equ regbs+2
ddrg equ regbs+3
portb equ regbs+4
portc equ regbs+6
ddrc equ regbs+7
porte equ regbs+$A
org eeprom
ldaa #$FF
sta a ddrg
```

## Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE SPECTROMETRIE X

---

```
ldaa #$0F
staa ddrc
ldaa #$C0
staa portb
tsapa ldaa porte
anda #$10
cmpa $00
bne tsapa
aloha clr portb
clr portg
asa ldaa porte
anda #$01
cmpa #$01
beq asa
hodina ldab #$FE
verina stab portc
ldaa portc
anda #$F0
cmpa #$F0
beq tsisy
pshx
Idx #2000
ihany dex
bne ihany
pulx
ldaa portc
cmpa #$E7
beq touch1
cmpa #$D7
beq touch5
cmpa #$EB
beq touch07
cmpa #$DB
beq touch6
```

---

```
bra hodina
tsisy sec
rolb
cmpb #$F7
bhs verina
bra hodina
touch1 lidaa #$F1
jsr atao
asa1 lidaa porte
cmpa #$06
bne asa1
jsr action1
jsr asa10
jmp EJECT
touch2 lidaa #$F2
jsr atao
asa2 lidaa porte
cmpa #$86
bne asa2
jsr action1
jsr asa10
jmp EJECT
touch3 lidaa #$F3
jsr atao
asa3 lidaa porte
cmpa #$46
bne asa3
jsr action1
jsr asa10
jmp EJECT
touch4 lidaa #$F4
jsr atao
asa4 lidaa porte
cmpa #$C6
```

**Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE  
SPECTROMETRIE X**

---

```
bne asa4
jsr action1
jsr asa10
jmp EJECT
touch07 bra touch7
touch5 ldaa #$F5
jsr atao
asa5 ldaa porte
cmpa #$26
bne asa5
jsr action1
jsr asa10
jmp EJECT
touch6 ldaa #$F6
jsr atao
asa6 ldaa porte
cmpa #$A6
bne asa6
jsr action1
cmpa #$26
bne asa5
jsr action1
jsr asa10
jmp EJECT
touch6 ldaa #$F6
jsr atao
asa6 ldaa porte
cmpa #$A6
bne asa6
jsr action1
jsr asa10
jmp EJECT
touch7 ldaa #$F7
jsr atao
```

---

```
asa7 ldaa porte
cmpa #$66
bne asa7
jsr action1
jsr asa10
jmp EJECT
atao staa portg
tab
jsr goplat
rts
action1 ldaa #$80
staa portb
asa8 ldaa porte
anda #$08
cmpa #$08
bne asa8
ldaa #$10
staa portb
jsr tempo5
ldaa #$D0
staa portb
asa9 ldaa porte
anda #$10
cmpa #$00
bne asa9
jsr goplat1
rts
goplat ldaa #$20
staa portb
rts
goplat1 ldaa #$30
staa portb
rts
tempo5 pshx
```

## Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE SPECTROMETRIE X

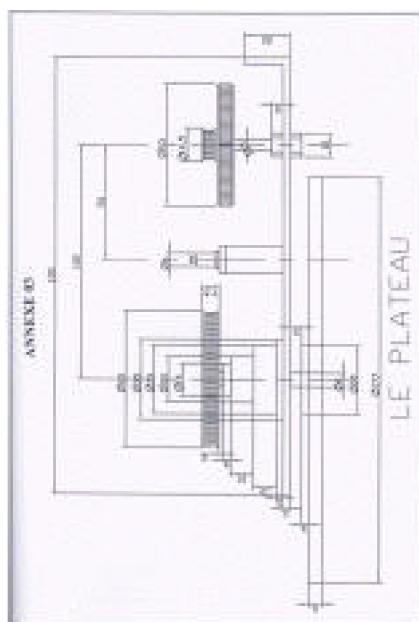
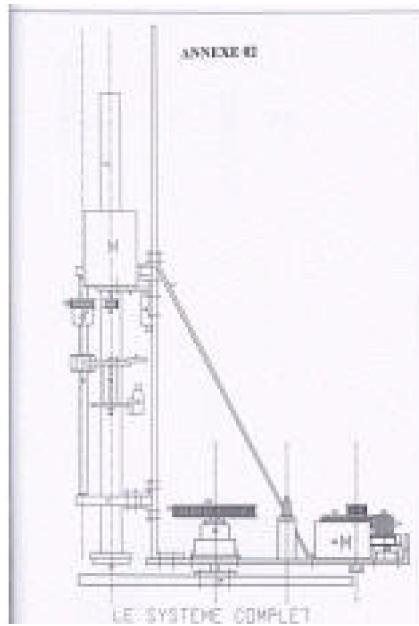
---

```
Idx #500
ihany1 jsr tempo2
dex
bne ihany1
pulx
rts
tempo2 pshx
Idx #2000
ihany2 dex
bne ihany2
pulx
rts
asa10 ldaa porte
anda #$E0
cmpa #$E0
bne asa10
jsr action2
rts
action2 ldaa #$90
staa portb
asa11 ldaa porte
anda #$08
cmpa #$08
bne asa11
clr portb
jsr tempo5
ldaa #$C0
staa portb
asa12 ldaa porte
anda #$10
cmpa #$00
bne asa12
clr portb
rts
```

---

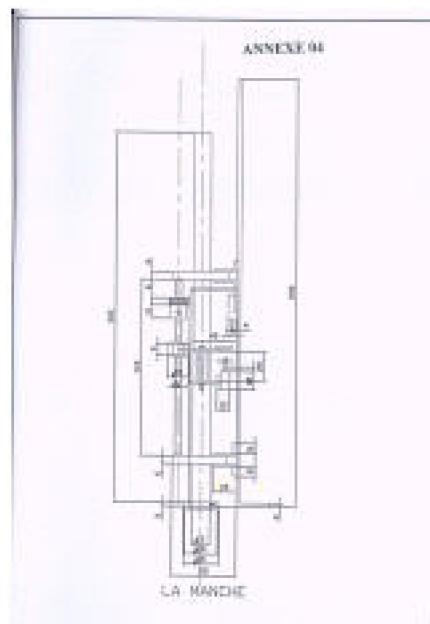
```
EJECT lidaa #$FE
staa portc
fanina lidaa portc
cmpa #$DE
bne fanina
jsr action1
jsr goplat1
toky cmpb #$F1
beq toe1
cmpb #$F2
beq toe2
cmpb #$F3
beq toe3
cmpb #$F4
beq toe4
cmpb #$F5
beq toe5
cmpb #$F6
beq toe6
cmpb #$F7
beq toe7
bra toky
toe1 lidaa porte
cmpa #$06
bne toe1
jsr action2
jmp aloha
toe2 lidaa porte
cmpa #$86
bne toe2
jsr action2
jmp aloha
toe3 lidaa porte
cmpa #$46
```

```
bne toe3
jsr action2
jmp aloha
toe4 ldaa porte
cmpa #$C6
bne toe4
jsr action2
jmp aloha
toe5 ldaa porte
cmpa #$26
bne toe5
jsr action2
jmp aloha
toe6 ldaa porte
cmpa #$A6
bne toe6
jsr action2
jmp aloha
toe7 ldaa porte
cmpa #$66
bne toe7
jsr action2
jmp aloha
org $FFFE
fdb eeprom
end
```



## **Sur un SYSTEME ECHANGEUR D'ECHANTILLON AUTONOME POUR LA CHAINE DE SPECTROMETRIE X**

---



Nom : KALL

Prénom : Briant

Adresse : Enseignant à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antsiranana . BP O Antsiranana 201

Titre : Système échangeur d'échantillon pour la chaîne de spectrométrie X.

## **RESUME**

---

De nos jours, la science évolue et les techniques utilisées deviennent de plus en plus

pointues. En même temps les instruments sont de plus en plus performants. Cette règle s'applique également dans le domaine de la science nucléaire. L'objet de ces travaux va dans ce sens et touche la branche de la spectrométrie X et qui se ramène à la conception et la réalisation d'un système échangeur d'échantillon automatique pour la chaîne de spectrométrie X. Baptisé KEN-001, c'est un instrument échangeur d'échantillon commandé à distance. En effet, des réflecteurs porte-échantillons sont placés d'avance dans des compartiments sur son plateau et par une commande, KEN-001 place un à un les réflecteurs dans le porte réflecteurs en vu d'une analyse. Une fois l'analyse terminée, il se charge de reprendre et de replacer le réflecteur dans son compartiment d'origine. De cette façon, on gagne en temps et donc en nombre d'analyse à effectuer dans un intervalle de temps donné. Cet instrument de précision contribue à l'amélioration de l'analyse et à l'évolution de la technique de la fluorescence X.

Mots clés : Automatisme, ventilateur, dépression, rayon X.

## ABSTRACT

---

Nowadays, the science evolves and the used techniques become more pointed. At the same time, instruments are more powerful. This rule also applies in the domain of the nuclear science. The object of these works goes in this sense and touch the branch of the X-Ray spectrometry and that brings back himself to the conception and the realization of an automatic sample changer system for the chain of X-Ray Spectrometry. Baptized **KEN-001**, it is an instrument of sample changer ordered from certain distance. Indeed, the sample carriers are placed of advance in compartments on its tray and by a control, **KEN-001** put one by one those reflectors in the carries reflective for analysis. Once the analysis is finished, the system is in charge of taking and replacing the reflector in its compartment of origin. Of this way, one wins in time and therefore in number of analysis to do in an interval of time given. This instrument of precision contributes to the improvement of the analysis and the evolution of the technique of the X-Ray fluorescence

Keys Words : Automatism, fan, depression, X-ray

Rapporteur et directeur de thèse: Pr RAMBOLAMANANA Gérard