CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

CENTRE DE PARIS

Mémoire présenté en vue d'obtenir

IE DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

Spécialité :

INSTRUMENTATION – MESURE Option : contrôle industriel

Par Olivier CHOQUET

PILOTAGE D'UN SELECTEUR MECANIQUE DE NEUTRONS ET

GESTION DES SECURITES

Soutenu en décembre 2003

JURY

 Président :
 M.
 F. LEPOUTRE
 Professeur au CNAM

 Membres :
 M.
 Y. SURREL
 Professeur au CNAM

 Mme.
 A. RAZET
 Professeur au CNAM

 M.
 A. RAZET
 Professeur au CNAM

 M.
 A. MENELLE
 Ingénieur au CEA

 Mme
 A. BRULET
 Ingénieur au CNRS

RESUME

Le Laboratoire Léon Brillouin a pour activité principale l'utilisation et la promotion de la spectrométrie neutronique dans tous les domaines possibles de la recherche fondamentale et appliquée (physique, biologie, matériaux, physico-chimie, études structurales). En effet, grâce à leurs faibles longueurs d'ondes, les neutrons permettent une analyse de la matière à une échelle atomique, c'est à dire de quelques Angstrom (10⁻¹⁰m).

Chaque spectromètre est doté d'un système de sélection de longueur d'onde, déterminant l'énergie des neutrons envoyés sur l'échantillon. Ce système appelé « sélecteur mécanique », composé des disques fendus, tourne jusqu'à 6000 tr/min 220 jours par an et est donc très sollicité. Il est donc apparu indispensable de mettre en place une surveillance permanente afin d'éviter les arrêts et détériorations mécaniques sur chacun des sélecteurs.

Dans un premier temps, je dresse le bilan des problèmes existants de types mécaniques (balourd, montage de roulements, accouplement), et électriques. De nombreuses pannes étant dues au moteur d'entraînement on le remplacera par un moteur et une régulation d'une technologie différente.

Ensuite, j'aborde les méthodes et les moyens de surveillance du sélecteur mécanique et opte pour une surveillance vibratoire plus adaptée à la détection précoce des défauts. J'expose les deux types de stratégies de surveillance appropriées (permanente et périodique), ainsi que la mise en œuvre de celles-ci.

Enfin, le sélecteur fonctionnant en toute sécurité, je complète ce projet par la réalisation d'un logiciel permettant le pilotage et la surveillance par ordinateur.

Mots clef : Surveillance vibratoire, diagnostic vibratoire, spectre, analyse enveloppe, roulement, balourd, accéléromètre.

SUMMARY

The Laboratory Leon Brillouin has as a principal activity the use and the promotion of neutron spectrometry in all the possible fields of research fundamental and applied (physical, biology, materials, physicochemistry, studies about structural). Indeed, thanks to their low wavelengths, the neutrons allow an analysis of the matter an atomic scale, i.e. of a few Angström (10-10m).

Each spectrometer is equipped with a system of selection wavelength, making it possible to measure the various structural or dynamic characteristics. This system called "mechanical selector", composed of the split discs, turns up to 6000 tr/min 220 days per year. It thus appeared essential to set up a permanent monitoring in order to avoid the mechanical stops and deteriorations on each selector.

Initially, I draw up a list of the existing mechanical types problems (unbalance, assembly of bearings, coupling), and electric; indeed of many breakdowns are due to the engine of drive which one will replace (with the regulation) by an engine a of a different technology.

Then, I approach the methods and the means of monitoring of the mechanical selector and chooses a vibratory monitoring more adapted to the early detection of the defects. I expose the two types of suitable strategies of monitoring (permanent and periodic), and the setting in.

Lastly, the selector functioning in full safety, I supplements this project by the realization of a software allowing piloting and the monitoring by computer.

Key words :Monitoring vibratory, vibratory diagnosis, spectrum, analyze envelope, bearing, unbalance, accelerometer.

CHAPI	TRE 1- PRESENTATION	8
1.1.	LE LABORATOIRE LEON BRILLOUIN (LLB)	8
1.2.	INTRODUCTION : LA SPECTROMETRIE NEUTRONIQUE	8
1.3.	Les spectrometres du LLB.	10
1.4.	LA SELECTION DES NEUTRONS : LES MONOCHROMATEURS	11
1.5.	LE SELECTEUR MECANIQUE ACTUEL	13
1.6.	SUJET DU MEMOIRE	15
1.7.	ORGANISATION	16
CHAPI	FRE 2- BILAN DU SYSTEME ACTUEL ET CAHIER DES CHARGES	17
2.1.	INTRODUCTION	17
2.2.	LES PROBLEMES D'ACCOUPLEMENT	17
2.3.	LES PROBLEMES DE ROULEMENTS	18
2.4.	BILAN MECANIQUE	23
2.5.	LE CAHIER DES CHARGES	23
CHAPI	TRE 3- MISE EN ŒUVRE DE LA REGULATION	26
3.1.	INTRODUCTION	26
3.2.	CARACTERISTIQUES DE LA REGULATION	26
3.3.	PARAMETRES DE COMMAND E MANUELLE	28
3.4.	PARAMETRES DE COMMAND E A DISTANCE	36
3.5.	Etude de stabilite	36
СНАРГ	FRE 4- PRESENTATION DE LA SURVEILLANCE VIBRATOIRE	39
4.1.	INTRODUCTION	40
4.2.	GENERALITES	42
4.3.	LES ANALYSEURS DE SPECTRES	45
4.4.	CHOIX DU DESCRIPTEUR	47

4.5.	LA SURVEILLANCE
4.6.	LE DIAGNOSTIC
4.7.	EXEMPLES DE SURVEILLA NCE ET DE DIAGNOSTIC
CHAPI	FRE 5- LES CHAINES DE MESUR ES
5.1.	LE SYSTEME D'ACQUISITION
5.2.	MESURES DE VIBRATIONS
5.3.	ETUDE DU COUT
5.4.	LE MATERIEL POUR LES AUTRES SECURITES
СНАРГ	FDE 6 MISE EN ŒUVDE DE LA SUDVEILLANCE 72
	I KE U- WIISE EN ŒU V KE DE LA SUK VEILLANCE
6.1.	STRATEGIE DE SURVEILLANCE PERMANENTE (SECURITE)
6.1. 6.2.	STRATEGIE DE SURVEILLANCE PERMANENTE (SECURITE) 72 STRATEGIE DE SURVEILLANCE PERIODIQUE (DETECTION PRECOCE) 74
6.1. 6.2. 6.3.	STRATEGIE DE SURVEILLANCE PERMANENTE (SECURITE) 72 STRATEGIE DE SURVEILLANCE PERIODIQUE (DETECTION PRECOCE) 74 DIAGNOSTIC 77
6.1.6.2.6.3.6.4.	TKE 0- MISE EN GEUV KE DE LA SUKVEILLANCE 72 STRATEGIE DE SURVEILLANCE PERIODIQUE (SECURITE) 72 STRATEGIE DE SURVEILLANCE PERIODIQUE (DETECTION PRECOCE) 74 DIAGNOSTIC 77 MISE EN ŒUVRE. 77
6.1. 6.2. 6.3. 6.4. 6.5.	TRE 01 MISE EN GEUVRE DE LA SURVEILLANCE 72 STRATEGIE DE SURVEILLANCE PERIODIQUE (DETECTION PRECOCE) 72 STRATEGIE DE SURVEILLANCE PERIODIQUE (DETECTION PRECOCE) 74 DIAGNOSTIC 77 MISE EN ŒUVRE. 77 « SIGNATURES INITIALES » 78
 6.1. 6.2. 6.3. 6.4. 6.5. 6.6. 	TRE 0- MISE EN GEUV RE DE LA SURVEILLANCE 72 STRATEGIE DE SURVEILLANCE PERIODIQUE (DETECTION PRECOCE) 72 DIAGNOSTIC 74 DIAGNOSTIC 77 MISE EN ŒUVRE 77 « SIGNATURES INITIALES » 78 CONSTITUTION DU DOSSI ER «SURVEILLANCE» 81
 6.1. 6.2. 6.3. 6.4. 6.5. 6.6. 6.7. 	TRE 0 ⁻¹ WHSE EN GEOVRE DE LA SORVEILLANCE

longueur d'onde et d'un détecteur 11 Figure 2- Réflexion de Bragg sur un réseau périodique d'atomes. 11 Figure 3 - Montage permettant le choix entre différents cristaux. 11 Figure 4 - Schéma d'un monochromateur à disques et photo d'un montage permettant ce fonctionnement. 12
Figure 2- Réflexion de Bragg sur un réseau périodique d'atomes. 11 Figure 3 - Montage permettant le choix entre différents cristaux. 11 Figure 4 - Schéma d'un monochromateur à disques et photo d'un montage permettant ce fonctionnement. 12
 Figure 3 - Montage permettant le choix entre différents cristaux. 11 Figure 4 - Schéma d'un monochromateur à disques et photo d'un montage permettant ce fonctionnement. 12
Figure 4 – Schéma d'un monochromateur à disques et photo d'un montage permettant ce fonctionnement
fonctionnement
Figure 5 – Schema de principe d'un sélecteur mécanique de vitesse réalisé dans un cylindre muni de
rainures hélicoïdales
Figure 6 Le sélecteur actuel
Figure 7 – Figure illustrant la composition d'un joint Ferro fluide
Figure & Emplacement des points de mesure selon la norme ISO 1081620
Figure 9 - Vitesse vibratoire dans la bande fréquentielle [10-1000 Hz] entre 2000 tr/min et 4700
tr/min sur le palier 1. A gauche, relevé effectué avant équilibrage et à droite après équilibrage.
La zone hachurée reste à éviter pour éviter des dégradations prématurées
Figure 10 - La régulation de vitesse et son moteur
Figure 11 - Liste des défauts possibles et interprétations grace à la combinaison de 4 voyants 27
Figure 12 - Schéma descriptif du fonctionnement d'une expérience "temps de vol"28
Figure 13 - diagramme des vitesses
Figure 14 - Courbe de répartition des longueurs d'ondes diffus és par un échantillons de béryllium.
Le canal numéro 166,5 doit correspondre à une longueur d'onde de 3,95 ?
Figure 15 – Comptages mesurés par temps de vol pour une vitesse de sélecteur mécanique de
3345tr/min
Figure 16 - Courbe : $? = f(v)$. Courbe théorique en bleu et expérimentale en rouge
Figure 17 - Etude comparative de stabilité à 900 tr/min
Figure 18 - Etude comparative de stabilité à 3000 tr/min
Figure 19 - Etude comparative de stabilité à 5000 tr/min
Figure 20 - déroulement d'une analyse vibratoire
Figure 21 - représentation d'un signal harmonique avec une pulsation et une amplitude x
Figure 22 - Représentation d'un signal périodique non harmonique (en traits pleins). Les courbes en
pointillés correspondent aux deux signaux harmoniques dont la somme donne le signal en trait
plem
Figure 23 - exemples d'un signal transitoire et d'un signal aléatoire
Figure 24 – (a)Representation d'un signal periodique et son spectre de raies (serie de Fourier)
constitue par les coefficients C_k . (b) Pour un signal non periodique le spectre est continu (transform f_k de Esserier)
(transformee de Fourier)
Figure 25 - schema de principe d'un analyseur FF1
Figure 20 - (a) un signal queiconque et son spectre X(I). En (b) le meme signal mais à temps discret
a intervale re qui engenare donc des repriques du spectre aux frequences ±inre (in entier
Figure 27 On choisire le grandour déplacement pour détactor les phénomènes basse fréquence et le
grandeur accélération nour les phénomènes haute fréquence. Les valeurs indiquées sur la
courbe représentent un ordre de grandeur des plages de fréquences
Figure 28 - Vocabulaire communément employé
Figure 29 - Exemple d'utilisation d'un niveau global
Figure 20 - Evolution du facteur de crête en fonction du type de signal
Figure 31 - Evolution du facteur de crête en fonction de l'évolution d'un défaut de roulement 53
Figure 33 - Exemple de spectre à résolution constante. Le spectre est représenté sur une bande de
i igaio do manipio de opectio a reportation constante. Le obectie est represente sur une nantie de
fréquence de 500Hz grâce à 400 points, donc avec une résolution de 1,25Hz

Figure 35 - Mise en évidence d'un défaut de balourd. La signature vibratoire initiale est en bleu et	t
en rouge on constate une augmentation de l'amplitude de la fréquence fondamentale	
correspondant à un défaut de balourd.	. 60
Figure 36 - Mise en évidence d'un défaut de roulement [1]	. 62
Figure 37 - Le rack du groupe électronique du L.L.B.	. 63
Figure 38 - Les cartes insérées dans le rack	. 64
Figure 39 - Collecteur de données Bruel & Kjaer	. 64
Figure 40- Modes de fixation utilisables selon les plages de fréquences [3]	. 66
Figure 41 - Embases en laiton à coller sur les paliers	. 66
Figure 42 - Vue d'ensemble de l'instrumentation nécessaire à la surveillance vibratoire du sélecteu	ır
mécanique.	. 67
Figure 43 - Capte ur et instrument de mesure de la température des paliers	. 69
Figure 44 - Mesure du vide à l'aide d'une jauge PIRANI	. 70
Figure 45 -photo du module "Vibrocontrol" (Bruel & Kjaer)	. 72
Figure 46 - Position des accéléromètres dédiés à la surveillance permanente sur les paliers du	
sélecteur	.73
Figure 47 – Mise en évidence de l'effet de masque du à la grande énergie des résonances basses	
fréquences	. 74
Figure 48 - Evolutions relatives de la valeur efficace et du Kurtosis	. 75
Figure 49 - Exemple d'itinéraire pour les relevés périodiques (sur la gauche) et la représentation	
schématique de l'emplacement des points de mesure (à droite)	. 78
Figure 50 - Signature vibratoire initiale relevée sur le palier "Ouest" dans l'axe vertical avec une vitesse de rotation de 3010 tr/min	. 79
Figure 51 - Spectre PBC 6% sur le palier Est dans l'axe vertical à une vitesse de rotation de 3010	
tr/min. La première fréquence caractéristique se situe à la fréquence de rotation soit 50Hz	. 80
Figure 52 - Décalage du spectre pour le recentrer sur le spectre de référence.	. 80
Figure 53 - Exemple d'itinéraire de surveillance	. 82
Figure 54 - Exemple de rapport technique du logiciel d'analyse	. 83
Figure 55 - Modèle de présentation du classeur de suivi	. 84
Figure 56 - Représentation des onglets contenus dans le classeur de suivi.	. 84
Figure 57 - Face avant et diagramme du module de communication IEEE avec le rack	. 85
Figure 58 - Face avant du programme de pilotage	. 86
Figure 59 - Différence entre représentation spectrales linéaire et logarithmique (en amplitude)	. 90
Figure 60 - Echelle linéaire et échelle logarithmique pour l'amplitude.	. 91
Figure 61 - Fonction de transfert d'un filtre théorique de fréquence centrale fc et de largeur f2-f1	. 92
Figure 62 - Fonction de transfert d'un filtre réel. Conventionnellement les fréquences de coupure f	f1
et f2 sont prises à -3 dB	. 92
Figure 63 - Lame taillée dans un cristal de quartz	. 99
Figure 64 - Transducteur - modèle mécanique	101
Figure 65 – Diagramme de Bode d'un accéléromètre1	102
Figure 66 - Influence du mode de fixation d'un accéléromètre sur le module de la réponse. Extrait	t
de la norme ISO 53481	103

Je tiens à remercier la direction du laboratoire Léon Brillouin qui m'a accordé sa confiance et du temps pour la réalisation de ce mémoire.

Je remercie particulièrement Annie BRULET pour son soutien et son aide durant les quatre années de formation et Alain MENELLE, mon responsable de stage. Ils ont su à la fois diriger et conseiller mon travail tout en me laissant une grande liberté dans mes investigations et les choix de réalisation.

Merci à mes collègues de travail pour leurs précieux conseils et leur patience.

Merci à Monsieur François LEPOUTRE, qui m'a accordé une grande confiance pour la réalisation de ce mémoire.

Merci enfin aux membres du jury pour l'évaluation de ce travail.

CHAPITRE 1-Présentation

1.1. Le laboratoire Léon Brillouin (LLB)

Le LLB est un laboratoire mixte CEA¹ - CNRS², situé au centre d'études nucléaires de Saclay. Il fait partie de l'ensemble des grands équipements de la recherche scientifique et mène des activités qui vont de la recherche fondamentale jusqu'aux développements technologiques. Le LLB utilise les faisceaux de neutrons produits par le réacteur de recherche ORPHEE³, pour réaliser des expériences de spectrométrie neutronique dans des domaines aussi divers que la physique, la biologie ou la physico-chimie.

C'est également un laboratoire de service. Pour le premier semestre 2001, 463 propositions d'expériences (correspondant à 4838 jours d'expérience) ont été faites. Un comité de sélection évalue les différentes demandes d'expériences et leur attribue le temps de faisceau nécessaire (en moyenne une semaine).

1.2. Introduction : la spectrométrie neutronique

Compte tenu de ses caractéristiques (charge globalement nulle, masse, spin), le neutron possède des propriétés uniques (interaction nucléaire différente avec deux isotopes, pouvoir de pénétration, interaction magnétique) qui font du rayonnement neutronique un rayonnement sonde très particulier.

Les faisceaux de neutrons étant peu absorbés par la matière, contrairement aux autres rayonnements (X, lumière), l'échantillon pourra facilement être placé à l'intérieur d'un four ou d'un cryostat et/ou dans une cellule à haute pression. Ce montage permettra d'étudier son comportement sous l'effet de la température ou de la pression dans de larges domaines. L'énergie d'un neutron est directement liée à sa vitesse. On utilise souvent pour décrire un neutron sa longueur d'onde associée ou son vecteur d'onde. Les relations correspondantes sont les suivantes:

¹Commissariat à l'Energie Atomique

²Centre National de la Recherche Scientifique

³Outil pour la Recherche en PHysique de l'Etat condensE

 \vec{k}

Vecteur d'onde

Longueur d'onde

Energie

$$I = \frac{2p}{\left|\vec{k}\right|} = \frac{2p}{k} \tag{1}$$

Moment
$$p = \hbar \vec{k}$$
 avec $\hbar = \frac{\hbar}{2p}$ (2)

Vitesse
$$v = \frac{\hbar \vec{k}}{m}$$
 (3)

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{\frac{1}{2}\hbar^2k^2}{m}$$
(4)

Les unités utilisées pour ces quantités dépendent cruellement des traditions liées au type d'étude réalisée. Les longueurs d'onde sont souvent exprimées en Å et les vecteurs d'onde Å⁻¹, même si les unités officielles devraient être le nm et le nm⁻¹.

$$I = \frac{h}{mv}$$
 ou $I_{(A)} = \frac{3.95}{v_{(km/s)}}$ et $I = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$ ou $I_{(A)} = \frac{0.287}{\sqrt{E_{(eV)}}}$ (5)

? (A) l'expression de la longueur d'onde en Angström

avec : h la constante de Planck

m la masse du neutron m=1,67.10²⁴ g

E l'énergie du neutron en eV

Mais c'est surtout pour les énergies que règne le plus grand désordre. C'est pourquoi il est bon d'avoir un rappel des conversions entre les unités que l'on rencontre pour les neutrons.

$$E(meV) = \frac{1}{2}mv^2 = 5,2267v^2 \qquad v(km/s)$$
(6)

$$E(meV) = \frac{\frac{1}{2}\hbar^2 k^2}{m} = 2,072k^2 \qquad k(\text{\AA}^{-1})$$
(7)

$$E(meV) = \frac{\hbar^2 \mathbf{l}}{2m\mathbf{l}^2} = \frac{81,799}{\mathbf{l}^2} \qquad ?(\text{\AA})$$
(8)

$$1 \text{meV} = 1,6021773.10^{22} \text{ J} = 0,24185.10^{12} \text{ Hz} = 8,06554 \text{ cm}^{-1} = 11,6045 \text{ K}$$
. (9)

Les neutrons incidents, fournis par le réacteur, ont une longueur d'onde associée comprise entre 0,05 et 2 nm (0,5 Å et 20 Å⁴). Ces distances sont comparables aux distances inter-atomiques. Dans le cas de systèmes ordonnés, la théorie indique que les phénomènes de diffraction sont prédominants. De l'étude de la diffusion et de la diffraction des neutrons par la matière, le chercheur va déduire les propriétés structurales et dynamiques de celle-ci. Pour mesurer cette diffusion, des spectromètres sont installés à la sortie des faisceaux de neutrons.

1.3. Les spectromètres du LLB

La mise en œuvre d'une expérience de diffusion neutronique comporte plusieurs étapes et met en jeu plusieurs dispositifs expérimentaux. La plaquette de présentation du LLB donne une présentation détaillée de chaque étape.

En résumé :

- Le réacteur produit un flux de neutrons le plus intense possible.
- Les sources chaudes, thermiques et froides amènent l'énergie des neutrons produits dans la gamme de celle des phénomènes à étudier.
- Les guides de neutrons transportent avec le moins de perte possible les neutrons jusqu'à l'expérience. Les monochromateurs sélectionnent l'énergie des neutrons envoyés sur l'échantillon.
- Les détecteurs mesurent la proportion des neutrons, ayant interagi avec l'échantillon, qui ont été déviés de la direction initiale (analyse angulaire) et/ou dont l'énergie finale a varié (analyse en énergie).

Il y a actuellement plus de vingt cinq spectromètres à neutrons installés au LLB. Les spectromètres sont classés par famille. Les familles diffèrent notamment par la technique utilisée (diffusion élastique, diffusion inélastique, réflectométrie, diffusion aux petits angles). Tous les spectromètres sont différents mais ils comportent tous, un mécanisme de mise en forme des faisceaux de neutrons pour les adapter aux diverses techniques de mesure. Dans la majorité des cas il s'agira de sélectionner les neutrons en définissant leur énergie, donc leur vitesse ou leur longueur d'onde. Deux techniques permettent la sélection des énergies: la réflexion de Bragg sur des monocristaux et la sélection mécanique de la vitesse des neutrons.

 $^{^{4}1\}text{\AA}=10^{-10}\text{m}$.

La Figure 1 donne une représentation très simplifiée d'un spectromètre.



Figure 1 - Représentation simplifiée d'un spectromètre comportant un système de sélection de longueur d'onde et d'un détecteur

Les neutrons fournis par le réacteur sont sélectionnés en longueur d'onde par un monochromateur et après interaction avec l'échantillon ils sont diffusés et analysés à une distance L selon un angle ?.

1.4. La sélection des neutrons : les monochromateurs

1.4.1 Les monocristaux :

Les monocristaux fonctionnent sur le principe de la diffraction d'une onde par un système périodique.



Figure 2- Réflexion de Bragg sur un réseau périodique d'atomes.



Figure 3 - Montage permettant le choix entre différents cristaux.

Si d est la périodicité du milieu, dans le plan d'incidence, seuls les neutrons ayant une longueur d'onde (?) vérifiant la relation de Bragg seront réfléchis.

(10)

Les cristaux les plus couramment utilisés sont le cuivre, le germanium, certains alliages, surtout le graphite pyrolytique.

1.4.2 Les systèmes mécaniques :

Le principe : on interpose sur le faisceau un matériau absorbant, possédant une fenêtre non absorbante. A l'instant t on laisse passer le faisceau. On interpose un deuxième système de même nature un peu plus loin et on l'ouvre à l'instant t+ ?t (Figure 4 – Schéma d'un monochromateur à disques et photo d'un montage permettant ce fonctionnement.). Seuls les neutrons ayant la bonne vitesse pour parcourir le trajet entre les deux systèmes pendant le temps ?t franchiront la deuxième barrière. Sachant que h vitesse d'un neutron de 4 Å est d'environ 1000 m/s, on obtient de très bonnes performances avec des mécaniques raisonnables.



Figure 4 - Schéma d'un monochromateur à disques et photo d'un montage permettant ce fonctionnement.

Chaque disque est en matériau absorbant et comporte une fente transparente. Ils sont distants de L et tournent à la même vitesse angulaire ? . Si les fentes font entre elles un angle constant f , seuls les neutrons ayant une vitesse $v \sim ? .L/f$ sont transmis.

La précision du faisceau sélectionné dépendra de la taille de la fenêtre et de la vitesse de rotation du système absorbant. On peut ainsi obtenir des faisceaux monochromatiques pulsés (choppers) ou continus (sélecteurs de vitesse).

Les sélecteurs mécaniques possèdent des «sillons » hélicoïdaux d'un angle a sur un cylindre absorbant (de longueur L) tournant autour de son axe à la vitesse angulaire ?, et chaque sillon ne transmettra que les neutrons ayant une vitesse $v \sim ?.L/a$.



Figure 5 – Schéma de principe d'un sélecteur mécanique de vitesse réalisé dans un cylindre muni de rainures hélicoïdales.

Le sélecteur mécanique est bien adapté à la production de faisceaux de grande longueur d'onde ($?_0 > 0,6$ nm). Il permet aussi, lorsqu'une bonne résolution en énergie n'est pas nécessaire, d'augmenter le flux disponible en fabriquant un faisceau « peu » monochromatique (??/? = 10 à 20 %).

1.5. Le sélecteur mécanique actuel

Le système actuel est basé sur le principe du cylindre hélicoïdal précédent, mais pour une simplicité de réalisation il est constitué de disques comportant des fentes. Les disques sont recouverts d'une peinture à base de Gadolinium permettant l'absorption des neutrons. Ils sont fixés sur un arbre, décalés et orientés les uns par rapport aux autres pour obtenir un chemin hélicoïdal.



Figure 6- Le sélecteur actuel

Les caractéristiques du sélecteur mécanique sont regroupées dans le Tableau 1.

Nombre de disques	17
Diamètre des disques	D =370 mm
Longueur du rotor	L =800 mm
Angle de l'hélice	a =25°
Vitesse de rotation maximale	N _{max} =6000 tr/min
Résolution ?=??/?	?= 15%
Transmission	$s_{tr} = 75\%$
Hauteur de faisceau utile	h = 40 mm

Tableau 1 - caractéristiques du sélecteur mécanique

Avec les caractéristiques du sélecteur nous pouvons connaître la plage de longueur d'onde sélectionnable. On a vu précédemment que les neutrons sélectionnés présentent une vitesse v \sim ?.L/ a et que leur longueur d'onde associée est

$$I_{(A)} = \frac{3.95}{v_{(km/s)}} = \frac{3950}{v_{(m/s)}}$$
(11)

On peut alors exprimer ? en fonction de la vitesse de rotation du sélecteur :

$$I_{(A)} = \frac{3950 \cdot a}{L \cdot w} = \frac{3950 \cdot a \times 60}{2p \cdot L \cdot N}$$

$$I_{(A)} = \frac{20573}{N} \quad . \tag{12}$$

donc avec N en tr/min

Le sélecteur mécanique permettra de disposer d'un faisceau de neutrons ayant une plage de longueur d'onde comprise entre $?_{min}$ 3 Å pour une vitesse de rotation de $v_{max}=6000$ tr/min et $?_{max}$ 20 Å, correspondant à la plus grande longueur d'onde des neutrons utilisables fournis par le réacteur. Il sera donc inutile de réguler la vitesse en dessous de 1000 tr/min.

Dans le chapitre 3, concernant la mise en œuvre de la régulation, nous effectuerons un étalonnage du sélecteur mécanique et vérifierons la relation (12) ainsi que la résolution donnée par le constructeur ?=??/?=15%.

1.6. Sujet du mémoire

Actuellement le sélecteur mécanique de vitesse fonctionne avec un moteur à courant continu piloté par une régulation analogique. Le fonctionnement intensif du moteur (24h/24h pendant 200j/an) provoque régulièrement des pannes électriques à cause de l'usure importante des charbons et des pannes mécaniques telles que l'endommagement des roulements dû à un balourd excessif. De plus, les régulations actuellement en place ont environ 20 ans et leur maintenance est problématique, car certains composants n'existent plus sur le marché.

Le sujet consiste à mettre au point une baie électronique comportant la régulation de vitesse d'un nouveau type de moteur mais aussi tout un système de gestion de sécurité grâce à différents capteurs : température, vide, vitesse, vibrations. Cette baie devra pouvoir communiquer avec les autres dispositifs électroniques, notamment l'ordinateur d'acquisition de données du spectromètre, par une liaison IEEE.

Le cahier des charges de ce système doit être établi en concertation avec plusieurs responsables de spectromètres afin de couvrir tous les besoins et de réaliser un système entièrement configurable selon l'expérience. En particulier il devra pouvoir piloter des systèmes ayant des caractéristiques mécaniques différentes : sélecteur ou chopper. Chaque sélecteur ou chopper, sera équipé de capte urs de vitesse, vibrations, vide et température...

Pour la gestion vibratoire, il faudra mettre en place un système pouvant se déplacer d'un spectromètre à un autre pour effectuer des relevés ponctuels, ainsi que le programme permettant d'interpréter les relevés.

Une fois la baie réalisée, celle -ci pourra être reproduite en plusieurs exemplaires pour d'autres expériences, et le système de contrôle vibratoire pourra être installé sur d'autres sites où la mécanique est très sollicitée et où la maintenance préventive est particulièrement indispensable.

1.7. Organisation

La suite de ce mémoire se décompose comme suit :

Le chapitre 2 présente les problèmes liés à la mécanique du système de sélection de neutrons. Plusieurs modifications mécaniques sont nécessaires telles que le changement des roulements, l'équilibrage de l'arbre du sélecteur et peut être une modification de l'accouplement. Ces améliorations permettront de réduire l'usure précoce des roulements due à un balourd trop important. L'accouplement sera obligatoirement modifié avec le nouveau moteur.

Le chapitre 3 présente la mise en œuvre de la régulation de vitesse du nouveau moteur. Il est nécessaire de mettre en place les systèmes de commande en local ou à distance. Pour cela nous devons étalonner ces commandes pour connaître par exemple la tension à appliquer sur le régulateur pour que le moteur tourne à la vitesse désirée.

C'est ensuite une étude et une présentation de la gestion vibratoire qui sont exposées. D'abord une explication des différents outils à utiliser en fonction des différents défauts possibles est donnée dans les chapitres 4 et 5, puis le choix d'une stratégie de surveillance et la mise en œuvre de celle ci en partant du choix du capteur pour aller jusqu'à la définition d'un système d'acquisition (chapitre 6). Le paramétrage des mesures (emplacements des capteurs, fixations, utilisations etc.) est également traité.

Le chapitre 6 traite aussi du pilotage informatique de la baie. Un exemple de programme est présenté pour montrer que l'on peut assurer un contrôle total de la vitesse de rotation du moteur d'entraînement, la gestion des sécurités et un suivi du niveau vibratoire de l'installation.

CHAPITRE 2-Bilan du système actuel et cahier des charges

2.1. Introduction

Avant de réaliser la baie de pilotage du moteur il est nécessaire de reprendre tous les problèmes autour des sélecteurs mécaniques actuels. Ceux-ci existent au laboratoire depuis une vingtaine d'années et furent réalisés par des chercheurs et techniciens Hongrois. Les systèmes disponibles sur le marché aujourd'hui sont trop onéreux (environs 150 k€) pour notre laboratoire. En revanche, il est possible d'obtenir un meilleur rendement d'utilisation des systèmes actuels en limitant les arrêts dus aux pannes.

Actuellement le sélecteur mécanique de vitesse fonctionne avec un moteur à courant continu piloté par une régulation analogique. Le fonctionnement intensif du moteur (24h/24h pendant 200j/an) provoque régulièrement des pannes à cause de l'usure importante des charbons (du moteur ainsi que du module tachymétrique). Nous avons envisagé d'utiliser un moteur sans balais, ce qui conduit aussi à modifier la mécanique d'accouplement entre le moteur et le sélecteur. Les autres causes de pannes les plus importantes sont la régulation et la mécanique de rotation (les roulements).

2.2. Les problèmes d'accouplement

Le problème de l'accouplement réside dans le fait que le sélecteur doit fonctionner sous vide (vide primaire). On utilise donc un accouplement magnétique pour garantir l'étanchéité. Or cet accouplement présente un défaut majeur : en cas d'accélération trop brutale du moteur, il y a désaccouplement !

Il est possible que ce problème ne se produise plus avec la nouvelle régulation car celle -ci gérera sûrement une rampe d'accélération que l'on pourra paramétrer. Mais puisque le changement de moteur impose de revoir la mécanique d'accouplement, il est raisonnable de changer aussi le principe d'accouplement. Il faut envisager de passer à un accouplement mécanique plutôt que magnétique.

2.2.1 Solution possible

Pour mettre en place un accouplement mécanique, il existe aujourd'hui des systèmes de joints liquides permettant une étanchéité totale. Ces joints sont en fait des joints «FERRO FLUIDE » : un liquide chargé de particules ferreuses est maintenu en place grâce à un champ magnétique permanent.



Figure 7 – Figure illustrant la composition d'un joint Ferro fluide

2.3. Les problèmes de roulements

L'une des pannes les plus graves concerne les roulements. L'arbre du sélecteur mécanique est très lourd (plus de 50kg + les disques) et présente inévitablement un infime défaut de centrage ou de balourd qui s'amplifie avec la vitesse de rotation et engendre donc des vibrations importantes (*ce défaut vient du fait que les techniques de laboratoire utilisées il y a 20 ans ne permettaient sûrement pas de réaliser un arbre d'environ un mètre de long avec une précision du centième de millimètre*). Ce sont ces vibrations qui finissent par détériorer les roulements.

2.3.1 Défauts de centrage

Un premier constat est possible en vérifiant l'excentricité des disques par rapport à l'axe de rotation. Pour cela on a placé un comparateur muni d'une pige sur la tranche de chaque disque, et on a relevé l'amplitude du défaut :

- > On constate une excentricité sur chaque disque de 0.25 mm (maximum ; ± 0.01)
- > On relève aussi des défauts de planéité sur les disques allant jusqu'à 0.4mm (± 0.01)
- Le dépôt de peinture n'est sûrement pas homogène non plus

Tous ces défauts, même les moindres, engendrent un balourd qui est la source des vibrations.

2.3.2 Montage des roulements

Un deuxième constat montre que les roulements sont mal montés. Nous avons remarqué qu'ils n'étaient pas aussi contraints qu'ils devaient l'être.

Lors du démontage des roulements nous constatons que, du coté du palier fixe, la bague interne du roulement a tourné sur sa portée et a entraîné la détérioration de celle-ci. Le remontage de nouveaux roulements ne peut se faire sans une remise en état de l'arbre et des entretoises.

Nous avons donc fait appel à la société SKF pour effectuer l'usinage et le chromage de l'arbre puis sa rectification. Des modifications ont aussi été apportées pour assurer une bonne fixation axiale des roulements et leur montage avec rigueur.

2.3.3 Equilibrage

Au vu des problèmes d'excentricités nous avons aussi demandé à la société SKF de réaliser l'équilibrage de notre système.

Les mesures et critères d'appréciations de l'équilibrage, se réfèrent à la norme ISO 10816 «Vibrations mécaniques – évaluation des vibrations des machines par mesurages, sur les parties non tournantes ». Cette norme concerne les directives pour le diagnostic de fonctionnement et les essais à partir de mesures des vibrations sur une large bande de fréquence. La mesure à effectuer est la mesure de la valeur moyenne quadratique (valeur

efficace) de la vitesse de vibration (v): $v_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} v^{2}(t) dt}$ avec T la période du

d'observation. Les mesures peuvent être effectuées dans les 3 directions orthogonales classiques (axiale, radia le horizontale et radiale verticale comme le montre la Figure 8)



Figure 8- Emplacement des points de mesure selon la norme ISO 10816

Le Tableau 2- «Limites de périmètre des zones types » reproduit les critères d'évaluations qui dépendent des différentes classes de machines. Notre machine se trouve être de classe I. La sévérité vibratoire est le plus souvent définie par la valeur efficace de la vitesse vibratoire mesurée dans la bande fréquentielle [10-1000 Hz].

- CLASSE I : Parties individuelles de moteurs et de machines, liées intégralement à la machine complète en état de fonctionnement normal (les moteurs de production électrique jusqu'à 15 kW sont des exemples typiques de machines de cette catégorie).
- CLASSE II : Machines de taille moyenne (du type moteurs électriques de capacité 15 à 75 kW) sans assises spéciales, moteurs ou machines connectés rigidement (jusqu'à 300 kW) sur assises spéciales.
- CLASSE III : Grosses machines motrices et autres grosses machines avec masses en rotation montées sur des assises lourdes et rigides qui sont relativement raides dans le sens du mesurage des vibrations.

CLASSE IV : Grosses machines motrices et autres grosses machines avec masses en rotation montées sur des assises qui sont relativement souples dans le sens du mesurage des vibrations (par exemple turbo-alternateurs et turbines à gaz avec capacité supérieure à 10 MW).

Vitesse	efficace	(mm/s)	CLASSE	CLASSE	CLASSE	CLASSE
10 - 1000 Hz		Ι	Π	III	IV	
	0.28					
	0.45		А			
	0.71			А		
	1.12		В		А	
	1.8			В		А
	2.8		С		В	
	4.5			С		В
	7.1		D		С	
	11.2			D		С
	18				D	
	28					D
	45					

Tableau 2- « Limites de périmètre des zones types » selon la norme ISO 10816

- Zone A : Les vibrations des machines nouvellement mises en service se situent normalement dans cette zone.
- Zone B : Les machines dont les vibrations se situent dans cette zone sont normalement considérées comme acceptables pour un service de longue durée sans restriction.
- **Zone C** : Les machines dont les vibrations se situent dans cette zone sont normalement considérées comme ne convenant pas pour un service de longue durée en continu. En général, la machine peut fonctionner dans ces conditions pendant une durée limitée jusqu'à ce que l'occasion se présente pour prendre les mesures correctrices qui s'imposent.
- **Zone D** : Les valeurs de vibrations qui entrent dans cette zone sont considérées comme suffisamment importantes pour endommager la machine.

Nous avons donc étudié l'évolution des vitesses de vibrations en fonction de la vitesse de rotation de sélecteur mécanique et nous avons effectué des relevés sur la plage de vitesse [2000 – 4700 tr/min] (représentant la plage d'utilisation la plus fréquente).

La Figure 9 représente le relevé d'amplitudes de la vitesse de vibrations du palier 1. Il montre une forte résonance entre 2500 tr/min et 2800 tr/min. La vitesse efficace maximum relevée atteint 6,59 mm/s sur le palier 1 et 6,7 mm/s sur le palier 2 (l'allure de la courbe est identique à celle du palier 1); le sélecteur mécanique étant classé parmi les machines de classe I, le Tableau 2 nous indique qu'un fonctionnement dans cette zone peut endommager la machine (Zone D). En revanche, après cette résonance les niveaux se situent dans la zone C pour les vitesses supérieures à 2700 tr/min.



Figure 9 - Vitesse vibratoire dans la bande fréquentielle [10-1000 Hz] entre 2000 tr/min et 4700 tr/min sur le palier 1. A gauche, relevé effectué avant équilibrage et à droite après équilibrage. La zone hachurée reste à éviter pour éviter des dégradations prématurées.

Le personnel spécialisé de la société SKF a donc tenté de diminuer ce balourd en plaçant des masses d'équilibrages sur les flasques situés aux extrémités de l'arbre. Un premier équilibrage nous a permis de diminuer ces fortes amplitudes autour de 2600 tr/min, en les abaissant à 4,34 mm/s sur le palier «1 » et 2,89 mm/s sur le palier «2 » mais a eu l'effet inverse pour ce qui concerne le reste de la plage de vitesses.

Après deux jours de tests nous avons du opter pour une configuration permettant un fonctionnement avec un niveau vibratoire correct dans la plus grande plage de vitesses possible. Nous obtenons un équilibrage acceptable (Figure 9, courbe de droite) pour les vitesses supérieures à 2700 tr/min et nous choisissons d'imposer une zone à éviter : entre 1900 et 2700 tr/min où les niveaux vibratoires sont très dégradants (soit entre 8 et 9.4 Å). Le Tableau 3 résume les trois types d'équilibrages relevés.

	2540 tr/min	2640 tr/min	2700 à 4700 tr/min	2700 à 4700 tr/min
	PALIER 1	PALIER 2	PALIER 1	PALIER 2
EQUILIBRAGE D'ORIGINE	6.59	6.72	3.19	4.28
1er EQUILIBRAGE	4.34	2.89	7	8.13
EQUILIBRAGE	11	16	3.5	1.9
FINAL				

Tableau 3 - Evolution des amplitudes de la vitesse de vibration en fonction de la vitesse de rotation du sélecteur

L'équilibrage final, retenu, engendre une valeur efficace de vitesse vibratoire se situant dans la zone C mais conduit tout de même une diminution notable sur le palier «2 ».

Nous concluons qu'il est impossible d'obtenir un équilibrage acceptable sur toute la plage de vitesse, et qu'il serait nécessaire pour cela d'effectuer des modifications mécaniques sur l'arbre du sélecteur.

2.4. Bilan mécanique

Un bon nombre de problèmes liés à la mécanique ont pu être résolus, partiellement parfois comme l'équilibrage qui n'a pas été considérablement amélioré. Une étude mécanique complète serait nécessaire pour modifier le système dans son ensemble afin d'obtenir un système mieux équilibré et avec une meilleure étanchéité. Mais la fonction de «sélection des neutrons » est bien remplie par le système actuel et ne justifie pas une nouvelle réalisation dont le budget dépasserait largement celui accordé actuellement.

2.5. Le cahier des charges

Le système de pilotage du sélecteur mécanique actuellement en place depuis une vingtaine d'années, doit être entièrement réétudié du fait du choix d'un nouveau type de moteur et du souhait d'une surveillance vibratoire des roulements. Ce moteur devra être d'une technologie sans balais pour éviter les problèmes d'usure dus au fonctionnement intensif et sera piloté par une régulation, l'ensemble permettant un fonctionnement dans une plage de vitesse allant de 1000 tr/min à 6000 tr/min. La nouvelle baie devra regrouper tous les systèmes de mesures, et reporter les valeurs ou les états de fonctionnement en face avant. Le paragraphe suivant dresse la liste des fonctions nécessaires.

Les éléments à piloter :

- la vitesse du moteur
- l'arrêt du système en cas de défaut (s)

Les éléments à lire :

- la vitesse du moteur, éventuellement celle du sélecteur
- le courant dans le moteur
- les températures des paliers
- la valeur du vide dans l'enceinte
- l'état des défauts

Les acquisitions de données :

- lecture de la vitesse
- lecture du niveau vibratoire

Rappel des principales fonctions

Cette baie devra comporter tous les éléments nécessaires à la régulation de vitesse du moteur mais aussi la gestion des sécurités, l'analyse vibratoire et le dialogue avec un ordinateur.

a) La régulation

Elle sera choisie en fonction du moteur et devra comporter une interface de communication pour être commandée par un ordinateur.

b) La surveillance vibratoire

L'analyse vibratoire est un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre d'une politique de maintenance prévisionnelle.

Les objectifs d'une telle démarche sont de :

- réduire le nombre d'arrêts sur casse ;

- fiabiliser le système;
- augmenter son taux de disponibilité ;

Il est donc nécessaire de faire une étude de faisabilité du suivi de notre machine par l'analyse vibratoire. Il restera alors à décider d'une technique et de sa mise en œuvre parmi le large éventail de solutions possibles.

c) La commande

La commande pourra s'effectuer à deux endroits possibles :

En local:

C'est-à-dire sur la face avant de la baie. On doit pouvoir régler la vitesse de rotation du moteur et décider du type de surveillance (totale ou partielle).

A distance :

Grâce à une interface IEEE, il doit être possible de dialoguer avec la baie et connaître :

- La vitesse du sélecteur (lecture ou écriture)
- Le niveau de vibration actuel
- L'état des sécurités

d) Les sécurités

Pour gérer les sécurités, un ensemble de relais et fusibles devra être mis en place dans la baie. Toutes ces sécurités permettront une signalisation en face avant et à distance grâce à l'interface IEEE. L'utilisateur pourra inhiber certaines sécurités grâce à des commutateurs situés en face arrière de la baie et reportés en face avant par un voyant d'état.

La face avant contiendra toutes les informations utiles telles que la vitesse, les températures des paliers, l'état des sécurités, le mode de pilotage etc...

2.5.2 Conclusions

L'étude de cette baie de pilotage nous conduira vers des spécifications beaucoup plus précises telles que les incertitudes limites à respecter, les technologies à utiliser pour la commande et la lecture de la vitesse (Convertisseur Analogique ? Numérique), les sécurités à mettre en place. Les chapitres suivants mettent en évidence les contraintes à respecter concernant l'instrumentation et les mesures.

CHAPITRE 3-Mise en œuvre de la régulation

3.1. Introduction

Le choix de cette régulation a été conduit par le choix du moteur ; les responsables scientifique et technique du spectromètre «PAXY » ont déjà effectué ce choix au cours de l'année 2001. Le moteur, de technologie «BRUSHLESS » (sans balais), peut tourner jusqu'à 6000 tr/min et est piloté par une régulation de vitesse adaptée. Tous deux fonctionnent depuis plus d'un an sur le spectromètre. Dans un souci d'uniformisation des spectromètres du laboratoire nécessitant un sélecteur mécanique, nous utiliserons donc les mêmes moteur et régulation.

Nous ne détaillerons pas ici les technologies utilisées dans le fonctionnement de cette régulation, mais citerons quelques caractéristiques utiles pour la mise en œuvre et la compréhension du fonctionnement.

3.2. Caractéristiques de la régulation

Le module de régulation appelé « variateur SMT-CD1a » comporte sa propre alimentation qui génère les tensions nécessaires au fonctionnement de l'appareil.

Le module est constitué de deux cartes au format 6U double Europe : une carte de puissance avec transistor IGBT⁵ et une carte de commande avec processeur de traitement numérique DSP⁶.

Le variateur contrôle directement la couple et la vitesse du moteur à partir des informations délivrées par un capteur résolveur transmetteur.



Figure 10 - La régulation de vitesse et son moteur

⁵Le transistor bipolaire à grille isolée **IGBT** (Insulated Gate Bipolar Transistor)

⁶processeur de signal numérique (Digital Signal Processor)

La consigne de vitesse du moteur est reçue sous forme analogique ± 10 V. Les principaux défauts sont visualisés sur la face avant de l'appareil grâce à une combinaison de 4 voyants, illustrée sur la Figure 11 ou connus par l'intermédiaire de la liaison série.

SECURITE	CODE D'AFFICHAGE	LED
Surcharge courant nominal variateur - clignotement : avertissement Idyn (seuil I ² t atteint) - permanent : verrouillage du variateur (défaut I ² t)	l ² t	• •
Rupture liaison résolveur	Resolver	• • •
Défaut étage de puissance : - surtension alimentation puissance - protection interne interrupteur - court-circuit entre phases - température variateur excessive pour calibres 4A à 60 A	Power stage	•••
Défaut convertisseur résolveur	R.D.C	00
Température variateur excessive pour calibres 70A et 100A	°C Ampli	• • •
Tension alimentation puissance insuffisante	Undervolt	• •
Température moteur excessive	°C Motor	• •
Défaut mémoire paramètres variateur	EEPROM	• •
Procédure automatique variateur : - clignotement : procédure en cours - permanent : erreur d'exécution	Busy	••

O : Led éteinte

• : Led allumée

Figure 11 - Liste des défauts possibles et interprétations grace à la combinaison de 4 voyants

Ces défauts ne seront pas reportés sur la face avant de la baie mais un voyant indiquera seulement si la régulation est opérationnelle ou non. Le variateur possède une sortie logique permettant de connaître l'état du variateur (fermé si variateur ok). Lors de l'affichage de l'un des défauts cités précédemment ce contact s'ouvre et nous permet ainsi de sécuriser le fonctionnement. Nous utiliserons ce contact dans notre surveillance pour signaler un défaut sur le variateur.

3.3. Paramètres de commande manuelle

La commande manuelle est effectuée à l'aide d'un potentiomètre situé en face de la baie comme défini au 2.5, ce potentiomètre permet d'entrer une consigne analogique de ±10V dans le variateur. Il est donc nécessaire d'étalonner la valeur affichée sur le potentiomètre en fonction de la longueur d'onde des neutrons sélectionnés. Pour cela nous effectuons plusieurs mesures de la longueur d'onde à différentes vitesses (?=f(v)), qui nous permettront de déterminer la relation de « ? =f(?) ». L'opérateur pourra ainsi afficher la valeur potentiomètre ? pour sélectionner une longueur d'onde désirée.

3.3.1 Mesure de longueur d'onde

Pour effectuer les mesures de longueurs d'ondes (vitesse des neutrons) on utilise une technique appelée «temps de vol » qui consiste à mesurer le temps t nécessaire pour parcourir une distance L. Le montage expérimental est constitué d'un disque absorbant sauf au niveau d'une fente. La rotation de celui ci permet d'envoyer des « paquets » de neutrons vers un compteur qui grâce à des cartes de synchronisation et de comptage (Europsd et Euroscaler), créées au laboratoire, permet de déterminer la vitesse des neutrons et donc leur longueur d'onde. Le montage expérimental permettant cette mesure est représenté sur la Figure 12 :



Figure 12 - Schéma descriptif du fonctionnement d'une expérience "temps de vol".

a) Le signal optique

Le déclenchement de la mesure du temps que met un neutron à parcourir la distance L est assuré par une impulsion électrique produite en même temps que le départ de la bouffée de neutrons. Cette impulsion est obtenue en faisant passer un faisceau lumineux à travers un trou situé sur le même rayon que la fenêtre mobile. On déclenche ainsi l'horloge avec le départ de la bouffée de neutrons ; souvent, on ajoute un retard « R » (microsecondes) à ce déclenchement. Ce temps de retard est un paramètre réglable dont la valeur nous permettra de modifier la valeur centrale de l'intervalle d'analyse et doit être déterminée avant de commencer l'expérience.

b) Codeur de temps de vol et analyseur multi-canaux

Ce sont respectivement, le chronomètre et le système de stockage de l'information. Le principe de fonctionnement est le suivant :

- le temps t=0 correspond aux dé parts simultanés du paquet de neutrons et du signal optique.
- Au temps t=R le signal optique déclenche l'horloge du codeur de temps de vol.
- Lorsqu'un neutron du paquet arrive dans le compteur au temps t, il est détecté sous la forme d'une impulsion électrique et est compté.
- Cette impulsion codée passe dans l'analyseur multi-canaux. C'est un ensemble de n mémoires, ou canaux, dans lesquels sont rangées les impulsions arrivées pendant des intervalles de temps successifs ?.

Autrement dit, si n est l'entier tel que $(n \cdot 1/2)$? $< t_0 < (n+1/2)$?, le neutron considéré provoquera l'incrémentation d'une unité du contenu de la mémoire numéro n.

Afin de pouvoir déduire du spectre en temps de vol obtenu, le spectre en énergie des neutrons, il est nécessaire qu'il n'y ait aucune ambiguïté sur l'instant de départ des neutrons : au cycle de mesure déclenché par l'arrivée d'une impulsion optique doit correspondre le comptage des neutrons d'un seul paquet. Si le temps d'analyse est plus long que l'intervalle séparant deux signaux optiques, on enregistre deux paquets durant un même cycle et donc on a un taux de comptage diminué de moitié dans chaque canal. Si au contraire le taux de répétition des paquets est trop grand, les neutrons les plus lents d'un paquet sont rattrapés par les neutrons les plus rapides du paquet suivant et le spectre ainsi obtenu n'a plus aucune signification.

c) Paramètres et formules

Le Tableau 4 rassemble les paramètres nécessaires pour des mesures en «temps de vol». Une mesure «temps de vol» nous fournit un fichier de données comportant le nombre de neutrons comptés «C » dans chaque canal « n ». Les canaux « n » étant fonctions des longueurs d'ondes nous obtiendrons une courbe représentant C=f(?).

Intitulé	Unité	description
С		Nombre de neutrons
? n		Nombre de canaux
n		numéro de canal
l _c	μs	largeur de canal
R	μs	retard
L	m	Distance chopper-compteur
v _n	m/s	vitesse des neutrons
?	?	Longueur d'onde des neutrons
N _c	tr/min	Vitesse de rotation du chopper
Ns	tr/min	Vitesse de rotation du sélecteur

Tableau 4 – liste des paramétres d'une mesure « temps de vol »

La vitesse des neutrons peut être exprimée par $v_n = \frac{L}{(n + 0.5)l_c + R}$ (13)

Avec la relation (11) $I_{(A)} = \frac{3.95}{v_{(km/s)}} = \frac{3950}{v_{(m/s)}}$ on peut exprimer $I = f(n) = 3950 \times 10^{-6} \frac{(n+0.5)l_c + R}{L}$

Pour simplifier l'écriture on utilisera :
$$I = \frac{(n+0,5)l_c + R}{253L}$$
 (14)

Le retard «R » représente en fait la somme de deux retards :

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{\text{elec}} + \mathbf{R}_{\text{décallage}} \,. \tag{15}$$

- R_{electronique} représente l'intervalle de temps entre le passage des neutrons dans la fenêtre du chopper et le déclenchement du chronomètre. Il peut être positif ou négatif si la cellule photoélectrique permettant le déclenchement du chronomètre est placée avant ou après la fenêtre.
- R_{décallage} : permet de centrer une analyse.

d) Diagramme des vitesses



Figure 13 - diagramme des vitesses

La Figure 13 illustre les paramètres cités précédemment et représente le diagramme des vitesses. Au temps t=0 un paquet de neutrons frappe le chopper. Compte tenu des dispersions, ils arrivent dans le compteur à des temps différents. Au temps t= $T_{chopper}$ part le paquet suivant ; si $T_{chopper}$ est trop petit les neutrons rapides rattrapent les neutrons lents du paquet suivant. Il est clair que nous devons donc choisir une période $T_{chopper}$ suffisamment grande.

La durée d'analyse peut permettre d'analyser tout le paquet de neutrons (en rouge) mais peut aussi être choisie pour analyser uniquement une fraction des neutrons (en violet) et avoir ainsi une plus grande résolution. Dans tous les cas il sera alors nécessaire de régler le retard R et déterminer une vitesse de rotation convenable du chopper.

La vitesse maximum de rotation de chopper ne devra donc pas dépasser

$$Nc_{\max} \le \frac{60 \times 10^6}{\Delta n \times l_c + R} \tag{16}$$

Nous allons d'abord déterminer la valeur du retard électronique.

e) Le retard vrai

Pour connaître le vrai retard induit par l'électronique nous utilisons un échantillon de béryllium dont la diffusion des longueurs d'ondes est parfaitement connue, en particulier la coupure à 3,95?, comme l'illustre la Figure 14.

Nous fixons ?? = 24 ? (pour couvrir toutes les longueurs d'ondes) ?n = 253 canaux (on choisit 253 pour simplifier les équations) $l_c = 30 \ \mu s \pm 1.10^4$ R = 1300 pour permettre une analyse suffisante compte tenu du ? n.l_c L = 6,138 m ±2.10⁻³



Figure 14 - Courbe de répartition des longueurs d'ondes diffusés par un échantillons de béryllium. Le canal numéro 166,5 doit correspondre à une longueur d'onde de 3,95 ? .

 $R_{\text{vrai}} = ?. ?n.L - (n+0,5).l_c = 3,95x253x6,138 - (166,5+0,5)x30$ (17) $R_{\text{vrai}} = 1124 \ \mu s$

Or nous avions fixé R=1300 μ s d'où R_{elect} = R_{vrai} - R_{décallage} = 1124-1300 = -176 μ s L'incertitude sur R est obtenue en appliquant la loi de composition des variances :

On a une incertitude sur la mesure de L de ±2 cm donc $\boldsymbol{s}_{L}^{2} = \left(\frac{2.10^{-2}}{\sqrt{3}}\right)^{2} m^{2}$ (18)

et une incertitude sur le numéro du canal donc $\mathbf{s}_n^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 \mathbf{m}^2$ (19)

d'où
$$\mathbf{s}_{R}^{2} = \left(\frac{\partial R}{\partial L}\right)^{2} \mathbf{s}_{L}^{2} + \left(\frac{\partial R}{\partial n}\right)^{2} \mathbf{s}_{n}^{2} = (253 \times \mathbf{I})^{2} \left(\frac{2.10^{-3}}{\sqrt{3}}\right)^{2} + (l_{c})^{2} \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{2}$$
 (20)

$$s_{R}^{2} = 133 + 300$$

 $s_{R} = 21ms$ donc $R_{elect} = -176 \ \mu s \ (\pm 21)$

Nous savons donc que le déclenchement du chronomètre s'effectue avec une avance de 176 μ s à ±21 μ s.

f) Conditions expérimentales pour les mesures de longueurs d'ondes

Tous les paramètres utiles à une mesure de longueur d'onde avec un système de « temps de vol » sont désormais connus. Nous allons effectuer plusieurs mesures avec les paramètres suivants :

Nous fixons ?? = 24 ? (pour couvrir toutes les longueurs d'ondes) ?n = 256 canaux $l_c = 150 \ \mu s \pm 1.10^{-4} \ \mu s$ $R = 200 \ \mu s$ $Nc = 1500 \ tr/min (pour être largement en dessous de Nc_{max})$ $On mesure L = 6,26 m <math>\pm 2.10^2$ L'incertitude sur la valeur de ? est déduite de l'expression :

$$I = \frac{(n+0,5)l_c + R}{253L}$$
(21)

et est due au fait que l'on se situe au centre d'un canal. Avec une largeur de canal de 150 μs , l'incertitude sur la longueur d'onde est donc de 0,17 ? .

g) Résultats de mesures

Nous avons effectué plusieurs mesures de longueur d'onde en fonction de la vitesse de rotation du sélecteur. La Figure 15, représente la courbe obtenue pour une vitesse de rotation du sélecteur de 3345 tr/min. On connaît ainsi la répartition des vitesses des neutrons transmis :



Figure 15 – Comptages mesurés par temps de vol pour une vitesse de sélecteur mécanique de 3345tr/min.

Il est possible de trouver les paramètres de cette courbe en effectuant un ajustement entre la courbe expérimentale et l'équation d'une Gaussienne. Cet ajustement est effectué par un logiciel qui nous permet de trouver le centre de cette répartition à 6,798Å avec un écart type de 0,476Å.

On en déduit que pour une vitesse de rotation du sélecteur mécanique de 3345 tr/min, les neutrons sélectionnés présentent une distribution autour de 6,8 Å.

3.3.2 Relation entre potentiomètre, vitesse et longueur d'onde

Plusieurs mesures de longueur d'onde sont réunies dans le Tableau 5. Ces mesures ont été réalisées avec la même technique que précédemment.

Potar. (?)	Vitesse (v)	L. d'onde (?)
4.5	3155	7.20
5	3516	6.46
5.5	3852	5.89
6	4230	5.42
6	4230	5.40
5.5	3867	5.86
5	3510	6.48
4.5	3155	7.2

Tableau 5 - Mesures de longueurs d'ondes en fonction de différentes vitesses.

Avec ces mesures il est ainsi possible de connaître l'équation de la courbe ? = f(v) et de la comparer à celle que nous avions estimée dans le premier chapitre page 14, à partir des données du constructeur : $I_{(A)} = \frac{20573}{N}$. Sur la Figure 16, nous avons représenté cette courbe en bleu et nos points mesurés en rouge. En effectuant un ajustement de nos points par rapport à une courbe de la forme y=A/x (où A est une constante, A=20573 en théorie) nous constatons un décalage par rapport à la théorie.



Figure 16 - Courbe : ? = f (v). Courbe théorique en bleu et expérimentale en rouge

Nous obtenons une courbe (en rouge), dont l'ajustement nous donne une courbe d'équation :

$$I_{(A)} = \frac{22741}{N}$$
(22)

La constante de numérateur est exprimée en fonction de a et L; la modification de la constante est dû au fait que le sélecteur mécanique ne possède probablement pas un angle d'hélice de 25° . Le constructeur nous indique que cet angle peut être modifié de $\pm 4,5^{\circ}$ en tournant le sélecteur sur lui même d'un angle e. Or nous ne connaissons pas la valeur actuelle de cet angle de rotation. On peut estimer celui-ci en sortant a de l'équation :

$$I_{(A)} = \frac{3950 \,a}{L.\text{w}} = \frac{3950 \,a \times 60}{2\text{p}.L.N}$$
(23)

avec N=3345 tr/min, ?=6,8 Å on trouve $a_{vrai}=27,640^{\circ}(\pm 3,4.10^{-2})$. Il faut aussi prendre en considération que la fente hélicoïdale n'est pas infiniment mince mais présente une largeur qui là encore modifie l'angle a. La fente présente une largeur de 11,5mm ce qui engendre sur une longueur de 800mm un angle de 0,8°. L'angle de rotation est donc e= a_{vrai} - $a_{théorique}$ - 0,8=1,8°. Nous ne connaissons pas l'incertitude d'alignement du sélecteur par rapport à l'axe du faisceau mais nous pouvons conclure que celui-ci présente vraisemblablement un angle de rotation de l'ordre de 1,8°.

Désormais nous utiliserons donc l'équation (24) pour étalonner notre système :

$$I_{(A)} = \frac{22741}{N}$$
(24)

3.4. Paramètres de commande à distance

Cette commande dite « à distance » repose sur le même principe que la commande manuelle ; elle permet d'envoyer une tension 010V dans le régulateur par l'intermédiaire d'une carte de conversion numérique analogique 16 bits. Cette carte se situe dans la baie électronique et est pilotée via une liaison IEEE.

Il est donc nécessaire de connaître la courbe N = f (v) ; N étant le nombre envoyé à la carte de conversion et v la vitesse de rotation. On pourra ainsi trouver N = f (?) grâce aux courbes précédemment trouvées. Une précision sur la mesure de la vitesse de ±1 tr/min à 6000 tr/min est suffisante car cela entraîne ? ?=0,02 Å, qui reste bien inférieur à la résolution du sélecteur. On obtiendra facilement cette incertitude avec la carte de conversion numérique analogique 16 bits disponible au laboratoire. Cette carte nous permet d'envoyer une tension U comprise entre 0V et +10V. Le pas de quantification « q » est donc de 0,15 mV ($q = \frac{10}{2^{16}}$) et l'incertitude s_q=q/2=0.075mV ; la tension désirée en sortie « U » sera obtenue en envoyant le nombre N correspondant soit : $U_{sortie} = N \times q$. Cette tension est envoyée sur l'entrée consigne vitesse de la régulation, entrée ±10 V (12 bits).

3.5. Etude de stabilité

Nous avons effectué une étude comparative entre l'ancienne régulation et la nouvelle pour mettre en évidence que cette nouvelle régulation est plus stable que la précédente et que les fluctuations de la vitesse de régulation n'accentuent pas l'incertitude sur la longueur d'onde sélectionnée par le sélecteur mécanique. On fixe une vitesse de consigne et l'on relève la vitesse de rotation grâce à une carte d'acquisition fournie par le groupe Electronique. Cette carte nous permet de mesurer le temps écoulé pendant un tour. Il est ainsi possible de mettre en évidence les variations de vitesse. On évalue cette stabilité pour différentes vitesses : 900 tr/min, 3000tr/min et 5000tr/min (avec un accouplement magnétique). Les figures 17, 18 et 19 sont accompagnées du Tableau 6 mettant en évidence les différences de stabilité.







Figure 18 - Etude comparative de stabilité à 3000 tr/min



Figure 19 - Etude comparative de stabilité à 5000 tr/min

	ancienne	nouvelle	ancienne	nouvelle	ancienne	nouvelle
	regulation	regulation	regulation	regulation	regulation	regulation
Consigne	c = 900 tr/min		c= 3000 tr/min		c = 5000 tr/min	
Moyenne (tr/min)	900,439	899,657	2999,771	2998,352	5000,245	5000,572
Écart-type s (tr/min)	0,334	0,251	0,612	0,372	0,891	0,441
Variance expérimentale s ² (tr/min) ²	0,111	0,063	0,374	0,138	0,794	0,194
Plage (tr/min)	3,861	1,583	6,100	2,946	7,429	4,584
Minimum (tr/min)	898,471	898,858	2997,002	2996,554	4996,689	4998,195
Maximum (tr/min)	902,332	900,441	3003,102	2999,500	5004,118	5002,779
Nombre d'échantillons n	5186	5186	14997	15623	14997	15623

Tableau 6 - Statistiques pour l'étude de stabilité

$$\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \quad (25) \qquad \qquad Variance = \mathbf{S}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2 \quad (26)$$

Le Tableau 6 nous permet d'évaluer la stabilité de la nouvelle régulation de vitesse. En observant les valeurs des variances on constate qu'avec la nouvelle régulation elles sont réduites de moitié pour 1000 et 3000 tr/min et d'un facteur 4 pour 5000 tr/min. Cette bonne stabilité ne se répercutera pas de façon mesurable sur la sélection des neutrons car il faut rappeler qu'avec le sélecteur mécanique on obtient un faisceau «peu mono chromatique » (? ?/? = 15 %) et que de tels écart types engendrent des variations ?? très inférieures à celle engendrées par le sélecteur.