

L'accélérateur SPIRAL2 a été conçu pour produire des faisceaux ayant des intensités et des énergies maximales fonction du type de particules accélérées. Les barrières radiologiques ont été calculées pour répondre à ces limites. Vis à vis de l'Autorité de Sureté Nucléaire (ASN), le projet doit mettre en œuvre des systèmes de contrôle permettant de vérifier que l'accélérateur reste dans son domaine de fonctionnement

Les systèmes de mesure de contrôle d'intensité, de rendement et d'énergie doivent donc être conçus pour garantir des exigences de sureté de fonctionnement. Les incertitudes des chaines de mesure doivent être prises en compte dans la définition des seuils de surveillance. Cette présentation explique la façon dont les incertitudes ont été définies et évaluées.

INTRODUCTION

Le projet SPIRAL2 est prévu pour accélérer et produire différents faisceaux, des protons, des deutons et des ions vers les salles NFS (Neutrons for Science) et S3 (Super Separator Spectrometer)

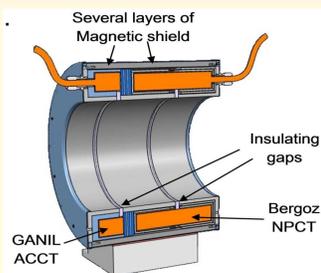
Beam	P	D+	Ions (1/3)
Max. Intensity	5 mA	5mA	1 mA
Max. Energy	33 MeV	20 MeV/A	14.5 MeV/A
Max. Power	165 kW	200 kW	43.5 kW

Pour obtenir les autorisations de démarrage, le projet SPIRAL2 doit démontrer que l'accélérateur respecte son domaine de fonctionnement.

Une Analyse de Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE) a été effectuée sur les deux systèmes de mesure. L'évaluation et la quantification des incertitudes ont aussi été traitées.

CONTRÔLES DES INTENSITÉS ET DES RENDEMENTS FAISCEAUX

Des blocs comprenant des transformateurs d'intensités (ACCT et DCCT) permettent de mesurer de façon non-interceptive les intensités faisceau et les rendements à différents endroits de l'accélérateur.



Les ACCT (AC Current Transformer) et DCCT (DC Current Transformer) sont complémentaires et permettent d'assurer une redondance des mesures.

Les DCCT sont des diagnostics du commerce permettant de mesurer des faisceaux continus et hachés. Leur temps de réponse est de l'ordre de 50µs, leur bande passante autour de 10 kHz et leur sensibilité de plusieurs dizaines de µA.

Les ACCT possèdent des temps de réponse plus rapides inférieurs à la µs et une sensibilité inférieure au µA mais ne fonctionnent qu'avec des faisceaux hachés.

MESURE DE LA VITESSE ET DE L'ÉNERGIE DU FAISCEAU

Le calcul de la vitesse du faisceau par temps de vol (TOF: Time of Flight) consiste à mesurer les temps mis par le faisceau pour aller d'une sonde à une autre (voir poster « Développement d'un logiciel sécuritaire pour la surveillance de l'énergie du faisceau de SPIRAL2 »). Les sondes sont des tubes isolés qui captent le champ électrique produit par les paquets du faisceau passant au travers. Le temps est calculé à partir de la phase des signaux issus des sondes.

La formule de la vitesse est la suivante:

$$v = \frac{D_{12}}{T_{12}} = \frac{D_{12}}{T_{acc}(N + \frac{\phi_{12}}{360})} = 360 \cdot \frac{D_{12}}{360 \cdot N + \phi_{12}} \cdot F_{acc} \quad \text{Eq. (1)}$$

D_{12} : Distance entre les sondes 1 et 2

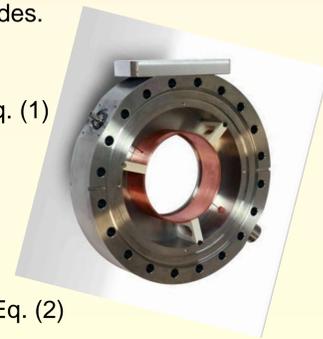
ϕ_{12} : phase sonde 1 – phase sonde 2

N: Nb de paquets entre 2 sondes

Facc: Fréquence accélérateur

L'énergie correspond à: $E_c(\text{MeV}) = E_{mu} \cdot (\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1) \quad \text{Eq. (2)}$

E_{mu} : Energie de masse unitaire: 931,49 MeV



PARAMÈTRES D'INFLUENCE SUR LES MESURES D'ENERGIE

Les paramètres d'influence sont:

Grandeur	Unité	Source
Pour chaque phase ϕ	degré	Bruit en phase du signal
		Non linéarité
		Bruit en phase du signal test (correction du retard)
		Non linéarité du signal test (correction du retard)
Différence de phase	degré C	Température
Distance	m	Incertitude due à la distance entre deux sondes

Le traitement des incertitudes donnent les résultats suivants:

Source Incertitude	Amplitudes du signal issus des sondes		
	0dBm	-60dBm	-80dBm
Bruit en phase	0.03°	0.04°	0.21°
Linearité	0.08°	0.7°	3.5°
Température	0.016°C	0.016°C	0.016°C
Distance	0.48mm	0.48mm	0.48mm

Le bruit en phase et la linéarité sont fonction de l'amplitude des signaux issus des sondes.

Il est nécessaire de simuler les amplitudes des signaux pour les différents faisceaux, courants et énergies.

PARAMÈTRES D'INFLUENCE SUR LES MESURES D'INTENSITÉ

L'incertitude de mesure du courant est due à plusieurs causes.

Nous avons tout d'abord une erreur systématique.

L'électronique de mesure délivre une tension $V = k \cdot I + V_{offset}$.

Nous connaissons le coefficient de la pente k et la tension d'offset Voffset avec une certaine erreur. Cela vient de la chaîne à qualifier et des appareils de mesure utilisés. Il se rajoute, une erreur aléatoire due aux variations probabilistes de la tension V.

D'autres paramètres que le mesurande interviennent sur le résultat de mesure (température, champ magnétique, ..).

Il est important de lister tous ces paramètres d'influence puis de les quantifier.

Paramètres	ACCT	DCCT	Commentaire
Linéarité	0.27%	0.5%	
Offset du capteur en fonction T°		20µA/°C	de 15°C à 30°C
Champ magnétique externe		0.12µA/Gauss	de 0 à 400Gauss
Bruit (du capteur)	3nA/√Hz	200nA/√Hz	
Perturbation DCCT et 50Hz	3µA + 1µA		
Low Drop	2%/s		Temps max. des pulses 200ms
Slew Rate	5µs	50µs	Négligeable (temps d'intégration)
Offset de l'électronique	1µA	6µA	ACCT: clamp DCCT: bruit sur 1s. (réglage d'offset)

L'influence importante de la température sur l'offset des DCCT a amené à construire autour des blocs un système de régulation de température de 40°C +/- 1°.

PROPAGATION DES INCERTITUDES ET RÉSULTATS

Une sommation des incertitudes types est ensuite effectuée. Les paramètres indépendants sont sommés de façon quadratique, les autres par une somme ordinaire. L'incertitude totale élargie correspond au résultat de cette somme multipliée par un coefficient d'élargissement.

Bande passante des voies:
DCCT voie rapide: 10kHz
DCCT voie lente: 0,5 Hz
ACCT voie rapide: 100 kHz
ACCT voir lente: 0,5 Hz

Intensité faisceau	Incertitude sur la mesure d'intensité			
	DCCT		ACCT	
	Voie rapide	Voie lente	Voie rapide	Voie lente
50µA	N.A.	±24µA	±9.2µA	±3.2µA
150µA	±140µA	±24µA	±9.2µA	±3.2µA
1mA	±150µA	±27µA	±9.7µA	±3.7µA
5mA	±170µA	±47µA	±12µA	±5.7µA

PROPAGATION DES INCERTITUDES ET RESULTATS

Des coefficients de sensibilité sont calculés à partir des dérivées partielles de l'équation (1) de la vitesse.

$$C_1 = \frac{\partial V}{\partial D} \quad C_2 = \frac{\partial V}{\partial \phi_1} \quad C_3 = \frac{\partial V}{\partial \phi_2}$$

L'incertitude de la vitesse ($u_{vitesse}$) correspond à :

$$u_{vitesse} = C_1 * u_{distance} + C_2 * u_{\phi_1} + C_3 * u_{\phi_2}$$

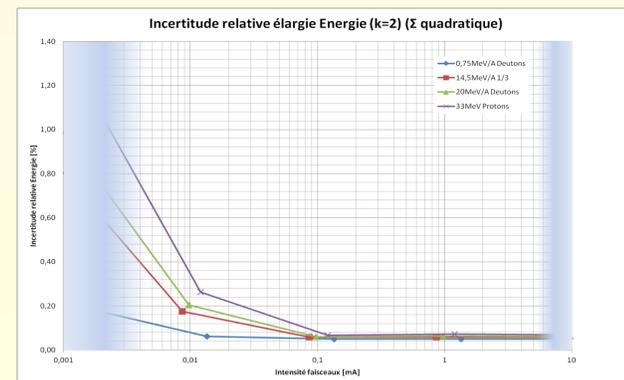
u_{ϕ_1} et u_{ϕ_2} sont la somme des incertitudes des paramètres d'influence des phases.

De façon identique, l'incertitude de l'énergie est déterminée à partir de la dérivée partielle de l'équation (2).

$$C_4 = \frac{\partial E}{\partial V} \quad u_{energie} = C_4 * u_{vitesse}$$

Pour différentes énergies, les coefficients C_1 , C_2 , C_3 et C_4 sont calculés. Nous obtenons les incertitudes fonction de l'amplitude du signal sonde.

Les simulations des sondes en fonction des différents faisceaux permettent de faire la relation entre les amplitudes sondes et les intensités faisceau en fonction de l'énergie. Les courbes ci-contre montrent les résultats obtenus.



CONCLUSION

La caractérisation d'incertitudes de chaines d'instrumentation nécessite un travail de mesure, de traitement et d'analyse important. Cela impose de comprendre parfaitement le fonctionnement des chaines d'instrumentation et implique l'utilisation de bancs de test, la nécessité de faire varier les paramètres d'influence séparément. Les mesures présentées ici portent sur des prototypes, ce travail sera bientôt à effectuer sur les chaines de mesures définitives.