

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master en Electronique

Thème :

**Estimation des paramètres cinétiques du
Réacteur NUR à l'aide du filtrage particulaire**

Président : S.AIT CHEIKH

Réalisé par : HAMANI Abdeslam

Examineurs : M.MAMERI

R.ZERGUI

Rapporteur : C.LARBES

F.ADDA

Promotion : Octobre 2015

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو تقدير بعض المؤشرات المميزة للمفاعل النووي NUR

اعتمادا على معطيات تطبيقية وخوارزمية الترشيح الجزئي.

مجموعة من التجارب اقيمت في وسط محيط ذو استطاعة شبه معدومة (اقل من 50 واط) وذلك لتفادي جميع التشويشات اللحظية الناتجة عن عاملي الحرارة و التسمم .

الآني لبعض المؤشرات بواسطة NURSAO. وقد تم افعال العديد من حالات عدم الاستقرار على النشاط النووي وذلك للتسجيل

في حين تم تسجيل معطيات اخرى عند نهاية تشغيل المفاعل

ولقد طبقت خوارزمية الترشيح الجزئي على هذه المعطيات من اجل الحصول على نتائج نهائية مقنعة.

كلمات مفتاحية : الترشيح الجزئي -نشاط اشعاعي -تدفق نوتروني

Résumé

L'objectif de ce travail est d'estimer les paramètres cinétiques caractérisant le réacteur NUR en se basant sur des données expérimentales et l'algorithme du filtre particulaire.

Des expériences ont été effectuées autour de zéro puissance (50 watts) afin d'éviter toutes perturbations intrinsèques dues à la dynamique du réacteur (effet de la température et poisons).

Des fluctuations externes sur la réactivité de différentes formes ont été provoquées, des enregistrements on-line de certains paramètres ont été effectués par NURSAO.

D'autres enregistrements ont été effectués à l'arrêt du réacteur,

Ces données ont été exploitées dans les algorithmes d'estimation par filtre particulaire, les résultats obtenus par ces derniers sont concluants.

Mots clés : filtre particulaire, réactivité, flux neutronique.

Abstract:

The objective of this work is to estimate the kinetic parameters characterizing the NUR reactor based on experimental data and the particle filter algorithm. Experiments were performed around zero power (50 watts) in order to avoid any inherent disturbances due to the dynamics of the reactor (temperature effects and poisons). External fluctuations on the reactivity of different shapes were caused; on-line recordings of certain parameters were performed by NURSAO. Other recordings were made in the reactor after shutdown. These data were used in the algorithms of estimation using the particle filter, the obtained results are conclusive.

Key words : particle filter, reactivity, neutron's flow.

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu de m'avoir donné la force pour réaliser ce présent travail

(الحمد لله)

Je tiens à exprimer ma très profonde gratitude à M. C.Larbes et Mme. F.Adda qui n'ont ménagé aucun effort pour me prendre en charge pour la réalisation de ce travail. Leur suivi, conseils et le temps qui m'avaient dispensé, et leur grande disponibilité dont ils ont fait preuve m'ont énormément facilité ma tâche.

Je tiens à remercier M. M.S.Ait-Cheikh d'avoir accepté de présider le jury

Je remercie aussi M. M.Mameri d'avoir bien voulu accepter d'examiner mon travail.

Mes remerciements vont aux enseignants, aux personnels et toute personne dévouée au service de l'école Nationale polytechnique.

A tous ces gens qui m'ont aidé au niveau du Centre de Recherche Nucléaire de Deraria (M.Boumedienne- Ameer-M.Taouinet...)Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance.

Sommaire

Liste des figures	1
Liste des abréviations.....	2
Chapitre 1 : Physique du réacteur	
Introduction.....	4
1.1Présentation de réacteur NUR	4
1.2 Contrôle des réacteurs :.....	6
1.3 Cinétique des réacteurs :.....	8
1.3.1 Fraction de neutrons retardés	8
1.3.2 Facteur de multiplication des neutrons	8
1.3.3 Réactivité	8
1.3.4 Durée de vie des neutrons directs	8
1.5. Equations cinétiques des réacteurs :	8
1.6 Conclusion	9
Chapitre 2 : Chaîne de mesure :	
Introduction	11
2.1détecteurs du flux neutronique	11
2.1.1.Chambre d'ionisation :.....	12
2.2 Amplification	13
2.2.1.Amplificateur logarithmique :.....	13
2.2.2 Amplificateur anti logarithmique :.....	15
2.2.3Translateur de niveau	16
2.2.4.Circuit de verrouillage.....	16
2..3 Conclusion.....	16

Chapitre 3 : Estimation des Paramètres Cinétiques à l'aide du Filtrage particulaire

Introduction	18
3.1 : Filtrage Particulaire :.....	18
3.1.1Modèle d'état non-linéaire et non gaussienne :.....	18
3.1.2 Algorithme.....	19
3.2 Estimation des paramètres cinétiques par le filtre particulaire	21
3.3 Comparaison entre le filtre particulaire et le filtre de kalman.....	25
3.4 Estimation de β_{eff}	26
3.5Conclusion	27
Conclusion général	29

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : Physique du réacteur.	
Figure 1.1. Bloc Réacteur NUR et système de refroidissement	3
Figure 1.2 : Cœur du réacteur NUR	3
Figure 1.3 : Figure 1.3 réaction de fission	4
Figure 1.4 : réaction de fission en chaîne.....	5
Figure 1.5 : Contrôle de la réaction de fission par les éléments absorbants	5
Chapitre 2 : Chaîne de mesure	
Figure 2.1 : Détecteur basé sur l'ionisation gazeuse.....	9
Figure 2.2 : Schéma Synoptique de la chaîne de mesure.....	11
Figure 2.3: Amplificateur logarithmique.....	12
Figure 2.4 : Amplificateur Anti-logarithmique	13
Chapitre 3 : Estimation des Paramètres Cinétiques à l'aide du Filtrage particulaire	
Figure 3.1 : Estimation du flux neutronique	18
Figure 3.2 : zoom sur le flux neutronique	19
Figure 3.3 : Estimation de la concentration des précurseurs	19
Figure 3.4 : Estimation de la source	19
Figure 3.5 Estimation de la réactivité	21
Figure 3.6 : Estimation de la concentration des précurseurs	21
Figure 3.7 : Estimation du flux neutronique	22
Figure 3.8 Comparaison entre les deux estimations et le signal d'observation.....	22

Liste des abréviations

MTR: Material Testing Reactor

AAN: Analyse par Activation Neutronique

CND : Contrôle Non Destructif

V-A : Variable aléatoire

M-C : Monté-Carlo

EKF : EstimatedKalmanfilter

Chapitre I

Physique du réacteur

Introduction :

La grande différence entre l'énergie engendrée par une réaction nucléaire et celle produite par une réaction chimique a révolutionné la physique moderne qui a commencé à s'orienter vers les recherches liées à la physique nucléaire, et afin d'exploiter les différents résultats obtenus dans les recherches théorique des réacteurs nucléaires expérimentaux sont mise en œuvre pour but d'obtenir un flux de neutrons, en vue de son utilisation pour l'expérimentation. L'énergie produite par les réactions de fission n'est généralement pas récupérée.[1]

1.1Présentation de réacteur NUR :

Le Réacteur de Recherche NUR est un réacteur ouvert de type piscine. Il est doté d'une grande flexibilité expérimentale et sa puissance nominale est de un (1) MW. Le flux neutronique thermique atteint la magnitude de 10^{13} n / cm² .sec .

Le combustible est de type plaque MTR (MaterialTestingReactor) enrichi approximativement à 20 %. Le cœur du réacteur est refroidi et modéré à l'eau légère avec une circulation du fluide caloporteur descendante.

Ce réacteur dispose verticalement de sites d'irradiation dans le cœur et dans la colonne thermique. Il dispose également de cinq canaux d'irradiation horizontaux.

Le système de refroidissement est composé d'un circuit primaire où circule de l'eau de grande pureté (deminéralisée) et d'un circuit secondaire où circule de l'eau adoucie. Un échangeur de chaleur transmet l'énergie calorifique du système primaire au système secondaire qui à son tour la transmet à l'atmosphère par le biais d'une tour de refroidissement (voir la figure 1.2). Le Réacteur NUR a été principalement conçu pour :

- Formation dans les domaines des sciences nucléaires et d'exploitation des réacteurs.
- Recherche fondamentale et appliquée dans la physique des réacteurs et du génie nucléaire.
- Production de radio-isotope à des fins médicales et industrielles.
- Diffusion Neutronique dans les canaux d'expérimentation.
- Analyse des matériaux par la méthode d'Analyse par Activation Neutronique (AAN).

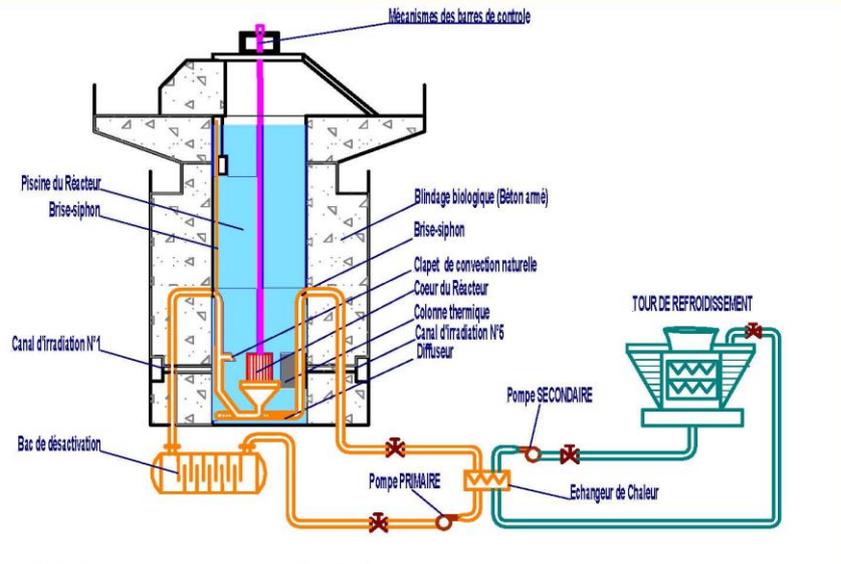


Figure 1.1. Bloc Réacteur NUR et système de refroidissement

Contrôle Non Destructif (CND) par la technique de Neutronographie pour un but industriel et de recherche.

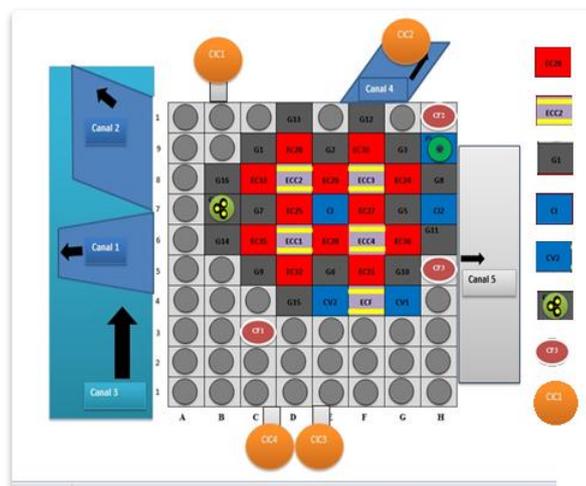


Figure 1.2. Cœur du réacteur NUR

1.2. Contrôle des réacteurs :

Pour éviter l'étouffement de la réaction en chaîne on essaye toujours de garder un nombre de neutrons générés supérieur au nombre de neutrons qui causent la fission. Un paramètre K a été défini appelé facteur de multiplication, il est utilisé pour suivre la production de neutrons, on a 3 valeurs de K :

$k < 1$ état sous critique : le nombre de fissions induites diminue en fonction du temps.

$k = 1$ état critique : chaque fission engendre une autre fission ce qui conduit à un niveau de puissance constant.

$k > 1$ état sur critique : le nombre de fission augmente à l'infini la puissance libérée croît d'une manière exponentielle ce régime de fonctionnement n'est utilisé que dans les armes nucléaires.[2], à travers cette grandeur on peut calculer la réactivité qui représente l'écart entre le cœur et la criticité, elle dépend de la nature des matériaux ainsi qu'à la géométrie de système nucléaire, elle est calculée en pcm (suite à ses faibles valeurs) à travers la relation suivante :

$$\rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}} \quad (1.1)$$

Le contrôle de réacteur est d'assurer le fonctionnement du réacteur à l'aide de barres de contrôle absorbantes aux neutrons qui sont insérées dans le cœur, elles absorbent les neutrons ce qui entraîne une diminution du flux neutronique, cela influe sur la puissance thermique du cœur, en jouant sur la position de la barre on peut ajuster avec une grande précision la réactivité dans le réacteur ce qui permet une approche fine vers un état critique pour changer la puissance de réacteur on déplace la barre de contrôle pour avoir une réactivité positive $\rho > 0$ puis on la ramène à 0 afin de travailler dans le régime critique.[3]

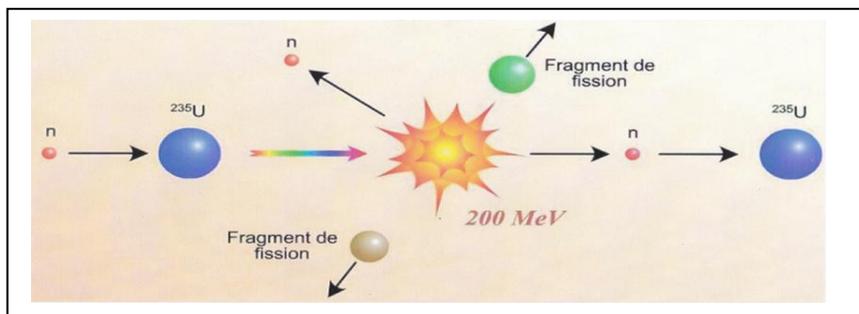


Figure 1.3 réaction de fission

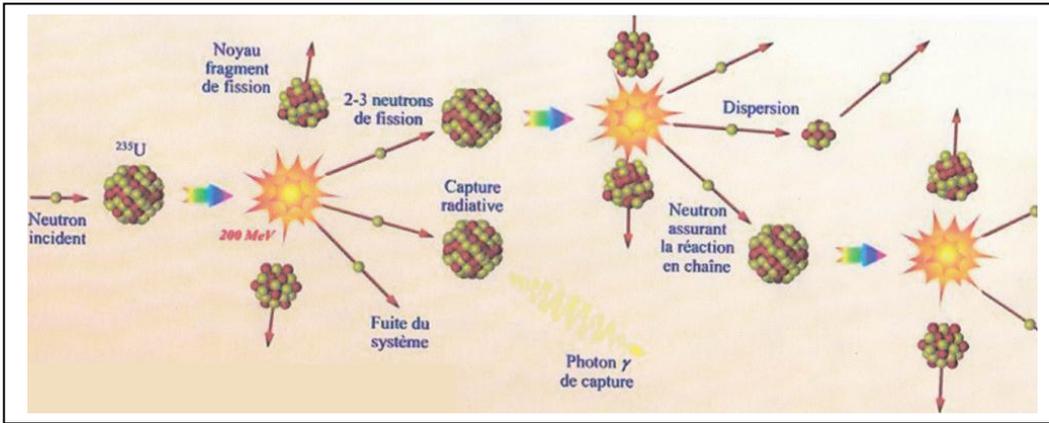


Figure 1.4 réaction de fission en chaîne

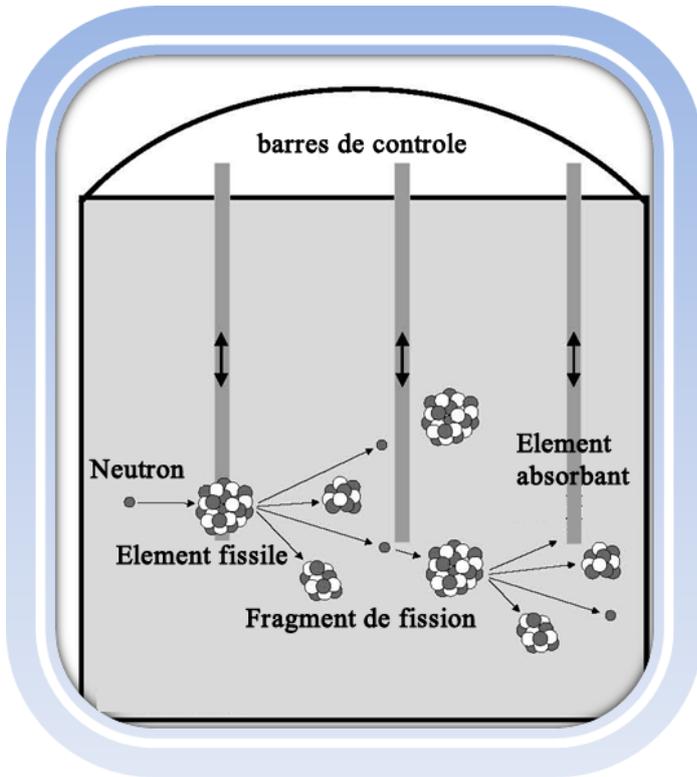


Figure 1.5. Contrôle de la réaction de fission par les éléments absorbants

1.3. Cinétique des réacteurs :

1.3.1. Fraction de neutrons retardés :

Lors d'une fission nucléaire le noyau lourd se divise en 2 noyaux plus légers en émettant 3 neutrons, ces neutrons sont appelés les neutrons prompts (rapides), autre neutrons se forment suite à la désintégration par radiation $-\beta$ des produits de fission ces neutrons sont appelés les neutrons retardés leur pourcentage par rapport à tous les neutrons de tout le cœur est nommé β_{eff} [3]

1.3.2. Facteur de multiplication des neutrons :

Le facteur de multiplication des neutrons (noté K) c'est le nombre moyen émis de neutrons dans une seule fission qui cause d'autres fissions. Les neutrons qui ne contribuent dans aucune nouvelle fission ne sont pas pris en compte.

1.3.3. Réactivité :

La réactivité calculée en pcm (pour cent mille) est une grandeur qui nous permet de mesurer l'écart d'un cœur par rapport à sa criticité, elle est calculée en fonction de k_{eff} par la relation (1.1)

1.3.4. Durée de vie des neutrons directs :

C'est le temps moyen qui sépare l'émission d'un neutron (naissance) et son absorption par le système (mort) il est nommé L ce temps-là il est moins important que le temps entre Λ générations qui représente le temps entre l'émission d'un neutron et sa capture par un noyau fissile donc il ne prend en compte que les noyaux qui engendrent une nouvelle fission la relation entre les 2 est donnée par

$$\Lambda = \frac{L}{K} \quad (1.2)$$

La densité neutronique est approximativement proportionnelle au flux neutronique et ce dernier est proportionnel à la puissance neutronique. La densité varie à la fois dans le temps et dans l'espace du cœur. Supposons que le cœur soit assez petit pour que la variation spatiale de la densité soit négligeable.

Le cœur est alors assimilé à un point. Les neutrons retardés peuvent être classés en plusieurs groupes, caractérisés par leur constante de temps et leur proportion relative β_j . Ces facteurs dépendent du combustible. On distingue 6 groupes de neutrons retardés.[4]

1.5. Equations cinétiques des réacteurs :

L'équation cinétique des réacteurs est donnée par la relation suivante :

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} N(t) + \sum_{i=1}^n \lambda_i C_i \quad (1.3)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} + \lambda_i C_i(t) = \frac{\beta}{\Lambda} N(t) \quad (1.4)$$

les deux équations représentent le modèle dynamique d'un réacteur point la suite de notre travail se basera sur ce modèle dans un régime stationnaire : $N(t) = N(0)$ et $C_i(t) = C_i(0)$ dans ce cas on a cette équation :

$$\frac{\rho}{\lambda} N(0) = \lambda_i C_i \quad (1.5)$$

Les régimes stationnaires correspondent bien aux réactivités nulles, de plus, les neutrons retardés n'ont aucune influence sur les résultats précédents. Quand le réacteur travaille dans un régime sous critique la contribution des neutrons retardés est négligée, on peut approximer notre modèle en [4] :

$$N(t) = \frac{-\Lambda}{\rho} S \quad \text{et} \quad (1.6)$$

$$C = \frac{\beta N}{\lambda \Lambda} = \frac{\beta S}{\Lambda(-\rho)} \quad (1.7)$$

Dans la suite de ce travail on se basera sur cette équation pour estimer le β_{eff} qu'on le considère un des paramètres cinétiques les plus importants à estimer. [5]

1.6. Conclusion :

Lors de ce chapitre on a présenté le principe du fonctionnement de notre réacteur NUR, puis on a parlé de ces paramètres cinétiques qu'on devrait estimer en se basant sur des hypothèses et équations mathématiques qui modélisent le fonctionnement de ce réacteur.

Chapitre II

Chaine de mesure

Introduction :

Afin de mesurer le flux neutronique un système de mesure a été élaboré, il est constitué d'un détecteur a chambre d'ionisation ou un ensemble de capteurs qui génèrent un courant électrique qui est relatif au flux neutronique du cœur, des filtres pour éliminer l'effet du bruit et une chaine d'amplification de ses signaux

2.1détecteurs du flux neutronique

Notre détecteur fait partie des détecteurs qui se basent sur l'ionisation gazeuse, le flux neutronique provoque une ionisation des particules du gaz dans un volume qui représente l'enceinte du détecteur. Lorsque ces ionisations ont lieu dans un gaz délimité par deux électrodes entre lesquelles une différence de potentiel est appliquée, on observe une migration des charges positives (ions positives) vers la cathode et des charges négatives (électrons) vers l'anode comme le montre la figure suivante :

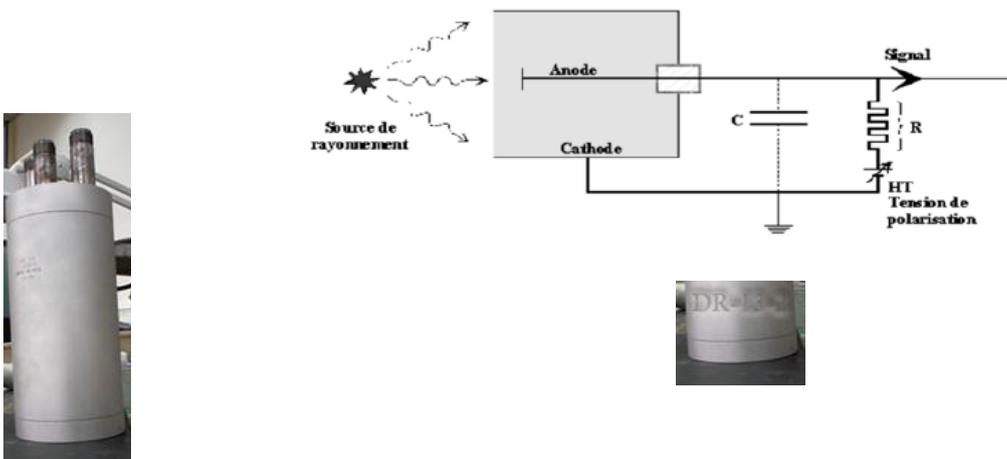


Figure 2.1 Détecteur basé sur l'ionisation gazeuse

L'énergie moyenne W_1 nécessaire à la création d'une paire d'ion dépend, d'une part de la nature du gaz et d'autre part, à un degré moindre, de l'énergie de la particule incidente et de sa nature.

Ainsi la formation d'une paire d'ions par une particule du Polonium exige en moyenne 35, 6eV dans l'aire, 29, 7eV dans le néon, 23, 6eV dans le Xénon. Si la particule perd une énergie W dans sa traversée du volume utile du détecteur, il en résulte la création de N_0 paires d'ions : $N = W/W_1$, chaque paire étant formée d'un électron et d'un ion positif. Ces porteurs de charge se déplacent dans le champ électrique appliqué avec une vitesse fonction du champ, de la nature et

de la pression du gaz. La vitesse des électrons étant très supérieure à celle des ions positifs, ils atteignent l'anode avant que les ions se déplacent

Si le champ appliqué est suffisamment intense, les électrons acquièrent assez d'énergie pour créer de nouvelles paires d'ions par chocs avec les molécules de gaz : sur un parcours dx , N électrons provoquent ainsi la formation de dN nouvelles paires d'ions [5] :

$$dN = \alpha \cdot N \cdot dx. \quad (2.1)$$

α étant le coefficient de Townsend il dépend de la pression p , du champ électrique E , et de la nature du gaz selon une expression de la forme :

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) \quad (2.2)$$

A et B sont des constantes, cette ionisation secondaire se produit dans l'aire dès lors que le rapport E/p est supérieur à $22,5 \text{ mV/cm.Pa}$ soit 2300 V/cm à la pression atmosphérique normale.

Pour N_0 paires d'ions créées par la particule incidente dans le volume utile du détecteur, le nombre N de charge collectées par les électrodes, et par suite l'amplitude du signal de sortie, dépendent de la tension V appliquée aux électrodes, en fonction de la tension V on distingue divers régimes de fonctionnement du détecteur.[5]

2.1.1. Chambre d'ionisation :

Lorsque le gaz contenu dans le détecteur est soumis à un flux constant de particules, on recueille à l'anode un courant I qui est proportionnel :

-Au nombre n de particules incidentes par second dans le volume utile.

-Au nombre N_0 de paires d'ions formées par chacune de ces particules.

$$I = q_e n N_0 \quad (q_e = 1,6 \cdot 10^{-19})$$

Dans le cas d'un rayonnement X ou γ le courant I peut être mis sous la forme :

$$I = \frac{k \cdot \vartheta \cdot p \cdot D}{1.08} 10^{-18}$$

Avec I en Ampère d'ordre de 10^{-15} à 10^{-4} , k étant une constante pour un gaz donné ($k = 1$ pour l'aire), ϑ le volume utile en cm^3 , p la pression du gaz exprimée en atmosphère et D le débit de dose en roentgen/heure, le signal de mesure est la chute de tension V_m provoquée par ce courant dans une résistance R_m élevée ($R_m > 10^{10} \Omega$). On utilise après pour la mesure du courant un

convertisseur courant-tension, on compense généralement l'effet des rayonnements parasite par l'ajout des courant délivrés par deux chambres d'ionisation

2.2. Amplification :

La chaîne d'amplification comporte 5 blocs principaux qui ont la tâche d'amplifier le signal soit avec un gain fixé par l'amplificateur linéaire, soit son log ou la dérivée du log, puis ce signal amplifié va être transféré vers un translateur de niveau avant d'être affiché par un afficheur analogique.

La figure suivante montre le schéma synoptique de la chaîne de mesure :

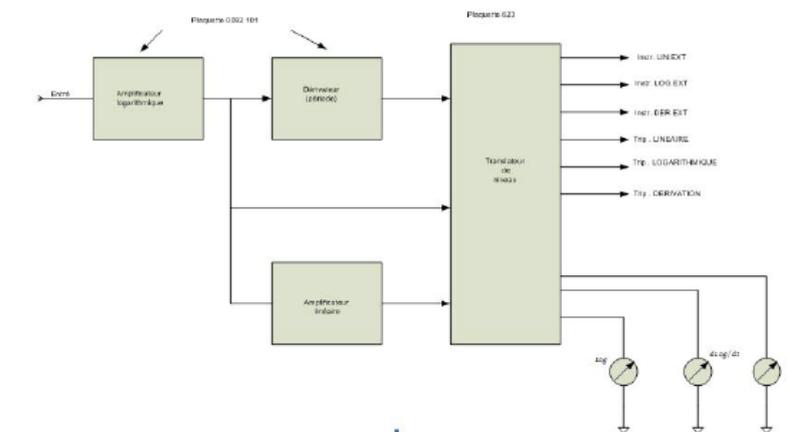


Figure 2.2 Schéma Synoptique de la chaîne de mesure

Les différents blocs de cette chaîne sont :

2.2.1 Amplificateur logarithmique :

Son rôle est de donner un signal proportionnel au logarithme du courant, il est réalisé à l'aide d'un amplificateur opérationnel en boucle de retour avec un dipôle non linéaire tels qu'une diode ou un transistor bipolaire.

Ce type d'amplificateurs est très utile dans la compression d'échelle dans le cas où les courants sont très faibles comme dans le cas de notre détecteur, il permet une bonne visualisation des variations faibles.

Cet ampli est représenté par le schéma suivant :

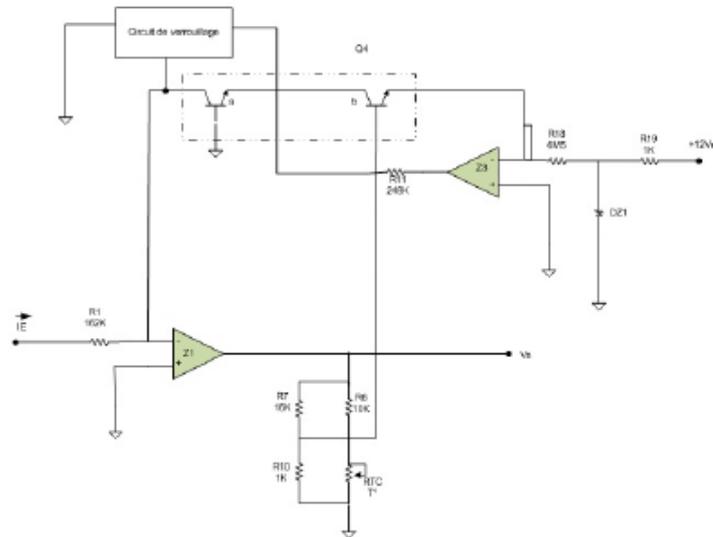


Figure 2.3 Amplificateur logarithmique

Le circuit génère une tension de sortie proportionnelle au logarithme du courant d'entrée le transistor (a) est utilisé comme élément non linéaire, son rôle est de créer une contre réaction pour l'ampli z1.

Ce transistor est aussi relié au diviseur résistif de la sortie de z1 et la base d'un autre transistor (b), le courant de collecteur du transistor (a) est égal au courant d'entrée IE. Le transistor (b), est utilisé comme élément de rétroaction pour Z3, son courant de collecteur est par l'application de rétroaction négative égal au courant de l'entrée constante IR. Etant donné que le courant de collecteur est la tension base-émetteur sont constantes donc (sans tenir compte de l'effet de la température) la tension base-émetteur du premier transistor (a) est aussi constante et elle varie en fonction des changements dans le courant d'entrée. La tension de sortie Va est une fonction de la différence des tensions d'émetteur de base des deux transistors, et donc les transistors (a) et (b) ont la tâche du retardateur étudié à la partie théorique.[6]

2.2.2. Amplificateur Anti logarithmique :

Cet amplificateur nous permet de reconstituer le courant débité par le détecteur à partir de la sortie d'amplificateur opérationnel

La conception d'un tel ampli est montrée par le schéma suivant

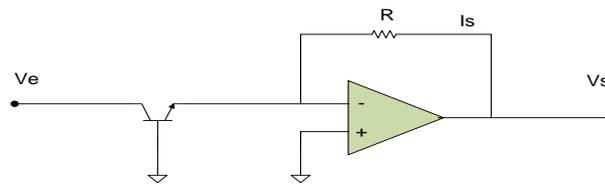


Figure 2.4 Amplificateur Anti-logarithmique

2.2.3 Translateur de niveau :

Composé de trois amplificateur intégrateur son rôle est de détecter les rampes délivrées par le détecteur et les intégrer afin ce bloque comporte des suiveurs qui ont pour tâche de diviser la sortie pour placer plus d'instruments de mesure.

2.2.4 Circuits de verrouillage :

Ces derniers servent à protéger la chaîne de mesure contre le courant élevé en le bloquant, l'utilisation de ces dernier est indispensable pour assurer la protection du matériel global.

2.3 Conclusion :

Dans cette partie on a essayé de donner un petit aperçu sur l'instrumentation du réacteur NUR , le type de détecteur utilisé pour capter le flux neutronique ainsi que les différents blocs de la chaîne de mesure.

Chapitre III

Estimation des Paramètres Cinétiques à l'aide du Filtrage particulaire

Introduction :

Le filtrage particulaire c'est un calcul numérique approché du filtre Bayésien, il connaît actuellement un fort développement dans de nombreux domaines relevant des sciences et techniques de l'information et de la communication, ou des sciences de l'ingénieur.

La nature de l'équation cinétique de notre réacteur qui peut s'écrire sous forme récursive nous permet de lui appliquer ce filtre afin d'estimer les paramètres cinétiques comme le β_{eff} et la réactivité ainsi que l'évolution dans le temps du flux neutronique et la densité de précurseur.

3.1 : Filtrage Particulaire :

Reconnu aussi sous le nom des méthodes de Monte-Carlo Séquentielles sont des méthodes utilisées pour estimer les réseaux bayésiens et constituent des méthodes 'en-ligne' analogues aux méthodes de Monte-Carlo, en d'autres mots dans cette méthode les particules explorent l'espace d'état, en évoluant de manière indépendante comme le mécanisme de sélection, qui concentre automatiquement les particules (i.e. la puissance de calcul disponible) dans les régions d'intérêt de l'espace d'état.

3.1.1 Modèle d'état non-linéaire et non gaussienne :

On considère le problème simple suivant, où il s'agit d'estimer l'état X_k d'un système au vu d'observations (Y_0, \dots, Y_k) recueillies dans un bruit blanc additif, pas nécessairement gaussien. En général, les observations seules ne permettent d'estimer l'état caché, et il est nécessaire de disposer d'un modèle a priori, suffisamment réaliste, pour décrire l'évolution de l'état entre deux instants d'observation.

Par exemple

$$X_k = F_k(X_{k-1}, W_k) \quad (3.1)$$

$$Y_k = h_k(X_k) + V_k \quad (3.2)$$

Où l'incertitude sur l'état initial est décrite par la distribution de probabilité $X_0 \sim \mu_0(dx)$, où $\{W_k\}$ et $\{V_k\}$ sont des bruits blancs indépendants, de la condition initiale X_0 c'est-à-dire des suites de V.A. indépendantes, pas nécessairement gaussiennes, décrites par les distributions de probabilité $W_k \sim P_k(d\omega)$ et $V_k \sim q_k(v)dv$. Sous ces hypothèses les états cachés $\{X_k\}$ suivent une dynamique markovienne conditionnellement aux états passés (X_0, \dots, X_{k-1}) l'état présent.

X_k ne dépend que de l'état précédent X_{k-1} , et (ii) conditionnellement aux états cachés (X_0, \dots, X_k), les observations sont indépendantes, et la distribution de l'observation Y_k ne dépend que de l'état X_k au même instant : $Y_k | X_k = x \sim q_k(y - h(x)) dy$, et on désigne par $\Psi_k(x) = q_k(Y_k - h_k(x))$, la fonction de vraisemblance associée, qui quantifie l'adéquation de chaque état x par rapport à l'observation courante Y_k :

Cette fonction dépend de l'écart $Y_k - h_k(x)$ entre l'observation $h_k(x)$ à laquelle on s'attend si le système occupait l'état x , et l'observation réelle Y_k .

3.1.2 Algorithme :

L'idée est de représenter la distribution de probabilité conditionnelle $\mu_k(dx)$ de l'état caché X_k sachant les observations (Y_0, \dots, Y_k) à l'aide d'un système de particules caractérisé par les positions (ξ_k^1, \dots, ξ_k^N) et les poids (w_k^1, \dots, w_k^N), soumis au mécanisme d'évolution suivant.

Mutation entre deux observations, les particules explorent l'espace d'État de façon indépendante, en imitant le comportement suivi par l'état caché, c'est-à-dire en suivant le modèle a priori.

Pondération lorsqu'une nouvelle observation est disponible, l'adéquation de chaque particule avec cette observation est évaluée grâce à la fonction de vraisemblance : chaque particule est alors affectée d'un poids proportionnel à la valeur calculée.

Sélection les particules sont éliminées ou multipliées, en fonction de leur poids, c'est-à-dire que les particules auront

D'autant plus de descendants à la génération suivante que leur vraisemblance est grande.

Pour mettre en œuvre l'algorithme décrit dans le Tableau 1, il suffit de savoir :

- simuler une V-A. selon la distribution initiale, Et en tout point x de l'espace d'état
- simuler une V-A. selon la transition $X_k | X_{k-1} = x$, c'est-à-dire selon la dynamique du modèle à priori,
- calculer à une constante multiplicative près la fonction de Vraisemblance : il faut pour cela que la probabilité d'émission $Y_k | X_k = x$ ait une densité par rapport à une mesure ne dépendant pas de l'état x , et qu'on dispose d'une expression Explicite pour cette densité.
- dans l'étape de sélection, il est possible de réduire la variance introduite par l'étape de ré-échantillonnage, en utilisant d'autres algorithmes de redistribution des particules.

3.2 Estimation des paramètres cinétiques par le filtre particulaire :

La nature non linéaire de notre modèle d'état, préconise l'utilisation du filtre particulaire, pour ce filtre la connaissance des états antérieurs et les observations est suffisante pour estimer l'état actuel, il est donc possible de suivre, en temps réel, lors de l'évolution d'un système, les valeurs de paramètres inaccessibles à la mesure.

Un réacteur nucléaire est un système physique dont les paramètres, la réactivité, le flux neutronique, concentration des précurseurs et le terme source, sont très importants à connaître lors du démarrage et durant le fonctionnement du réacteur, ces grandeurs ne sont pas accessibles à une mesure directe. Un algorithme d'estimation de ces termes par filtrage particulaire est mis au point les résultats de cette estimation vont être dans la suite de ce chapitre.

-Représentation du modèle :

Comme on avait déjà expliqué dans le premier chapitre l'équation cinétique de notre réacteur peut s'écrire sous forme d'un modèle d'état, nos observations représentent les enregistrements effectués au niveau du réacteur, comme observation on a le courant donné par la chambre d'ionisation (la chaîne de mesure) ce courant admet un bruit de mesure qu'on le modélise par sa covariance R, ce courant est notre représentant du flux neutronique, donc comme première étape de traitement on doit multiplier ce courant par le facteur d'échelle qui vaut -2×10^5 . On a effectué une estimation avec deux modèles d'état, dans le premier modèle les paramètres à estimer sont le flux neutronique, la concentration des précurseurs et la source tandis que dans le deuxième la réactivité remplace la source comme 3ème paramètre.

Première estimation :

Le premier modèle est donné par l'équation matricielle suivante :

$$\frac{dX}{dt} = \begin{pmatrix} \frac{-\beta}{\Lambda} & \lambda & 1 \\ \frac{\beta}{\Lambda} & -\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} X(t) + \begin{pmatrix} \frac{n(t)}{\lambda} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u(t) + w(t) \quad (3.1)$$

$$Y(t) = (1 \ 0 \ 0) X(t) + V(t)$$

Avec :

$$x(t) = \begin{pmatrix} \frac{n(t)}{\lambda} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Et $y(t) = n(t)$

Et $u(t)=\rho(t)$

Le bruit d'état $w(t)$ et le bruit de mesure $V(t)$ sont des bruits gaussiennes, leurs matrices de covariance Q et R sont égal à

$$Q=\text{Cov}(y)*2.8*10^{-3}$$

$$R=Q*2.8*10^2$$

Avant de lui appliquer le filtre particulaire, notre modèle va être discrétisé à l'aide de la fonction C2D sur Matlab qui se base sur l'approximation d'Euler.

Le modèle discret du système est le suivant :

$$\frac{dx}{dt}=\begin{pmatrix} 0.005359 & 0.005359 & 0.048 \\ -0.9946 & 0.9946 & 0.952 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}X(t)+\begin{pmatrix} 0.048 \\ 0.0952 \\ 0 \end{pmatrix}u(t)+w(t)$$

$$Y(t)=(1 \ 0 \ 0)x(t)+V(t)$$

La simulation avec Matlab nous donne les résultats suivants :

Pour le flux neutronique

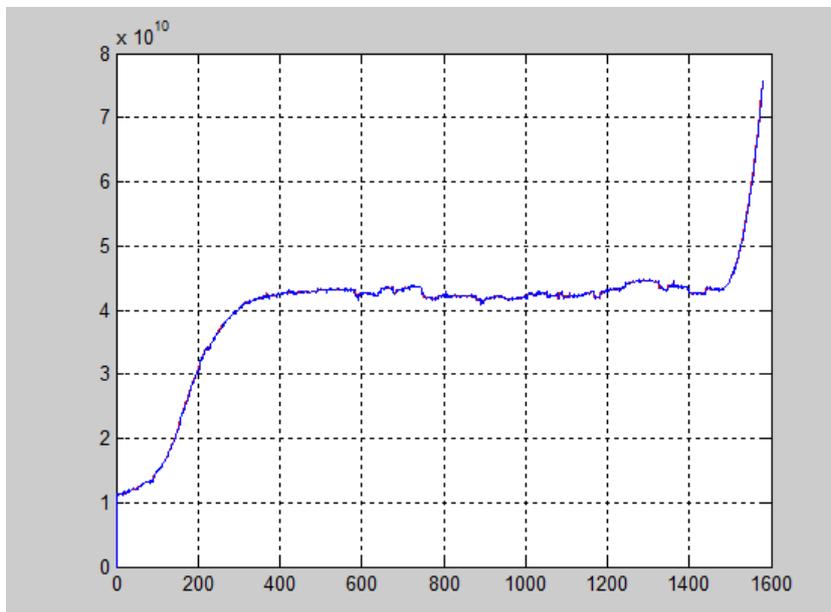


Fig3.1 Estimation du flux neutronique

Le graphe montre que l'observation et la prédiction sont identiques

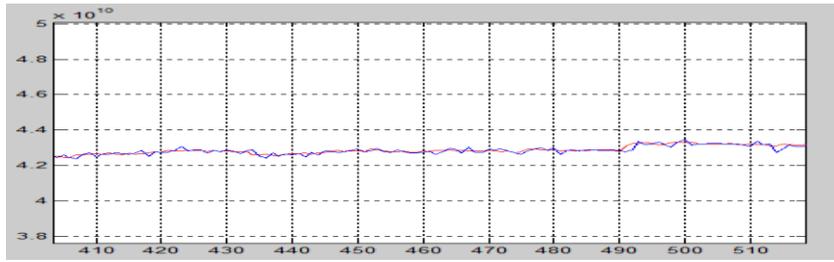


Fig 3.2 zoom sur le flux neutronique

Pour la concentration du précurseur elle est de l'ordre 10^2 *flux neutronique.

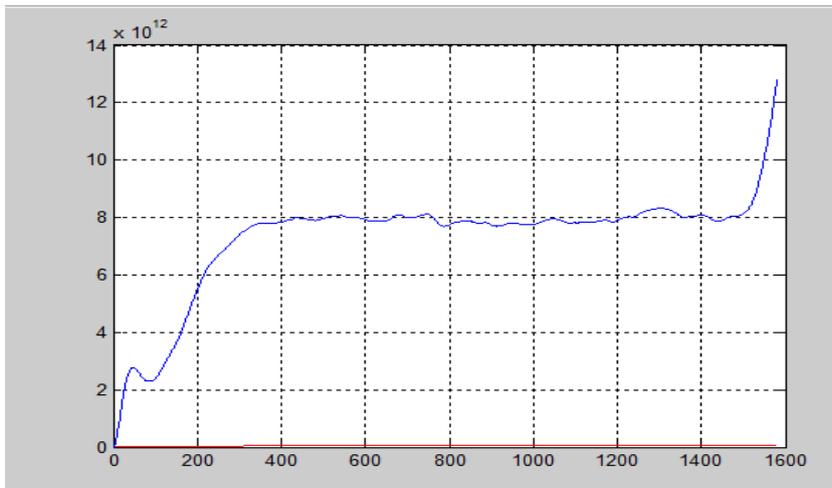


Fig 3.3 Estimation de la concentration

Des précurseurs

Pour la source on a :

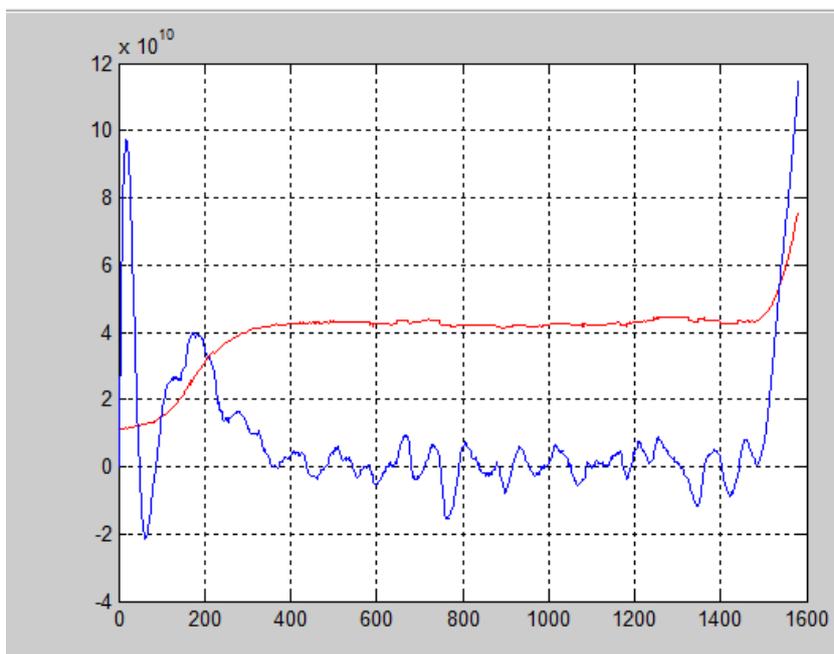


Fig 3.4 Estimation de la source

On remarque que le signal obtenu commereprésentant du terme source est tend vers zéro. Ce résultat dû au régime sous-critiquequ'on a utilisé.

2^{ème} *estimaion*:

Dans le deuxième modèle on essaye d'estimer la réactivité à la place de la source qu'on la considère nulle.

$$\frac{dX}{dt} = \begin{pmatrix} \frac{\zeta(t)-\beta}{\Lambda} & \lambda & -\frac{n(t)}{\Lambda} \\ \frac{\beta}{\Lambda} & -\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} X(t) + w(t)$$

$$Y(t) = (1 \ 0 \ 0) X(t) + V(t)$$

Tel que :

$$X(t) = \begin{pmatrix} n(t) \\ c(t) \\ \rho(t) \end{pmatrix}$$

L'efficacité du filtre particulaire se distingue dans ce type de modèles non linéaires, en effet d'autre types de filtres comme celui de Kalman donnent des résultats sous-optimales pour des systèmes pareils en essayant de les approximer dans des régions linéaires, les résultats sont loin d'être bons quand le est régime non stationnaire, cependant le choix de filtrage particulaire représente la meilleure solution pour remédier a ce problème.

De la réactivité est la suivante :

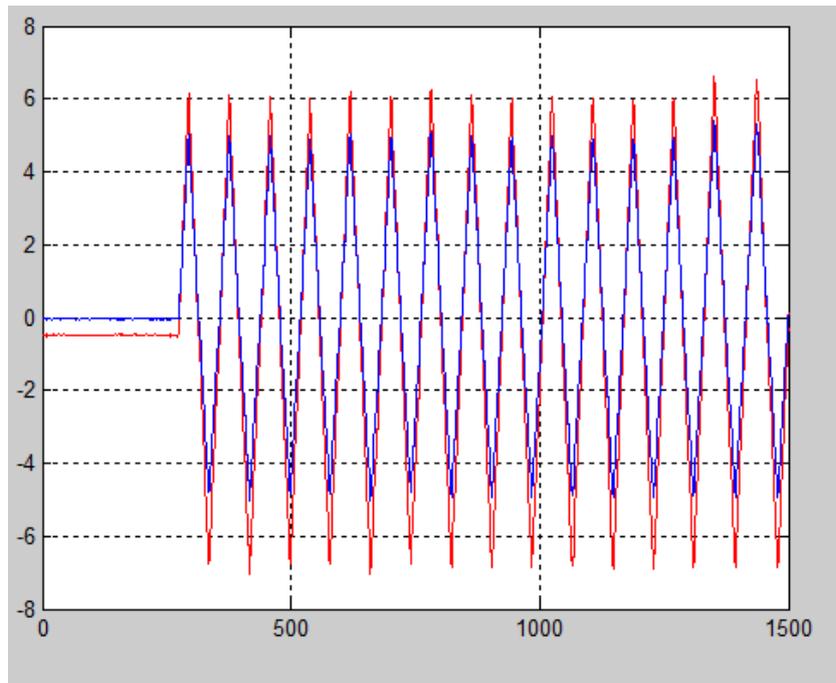


Fig 3.5 Estimation de la réactivité

Le graphe en rouge représente la réactivité estimée et celui en bleu, la réactivité observée.

Estimation de la concentration des précurseurs

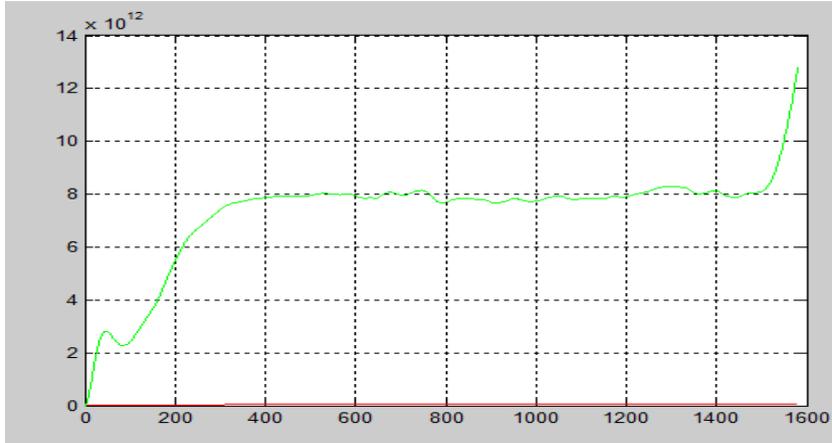


Fig 3.6 Estimation de la concentration des précurseurs

Estimation du flux neutronique

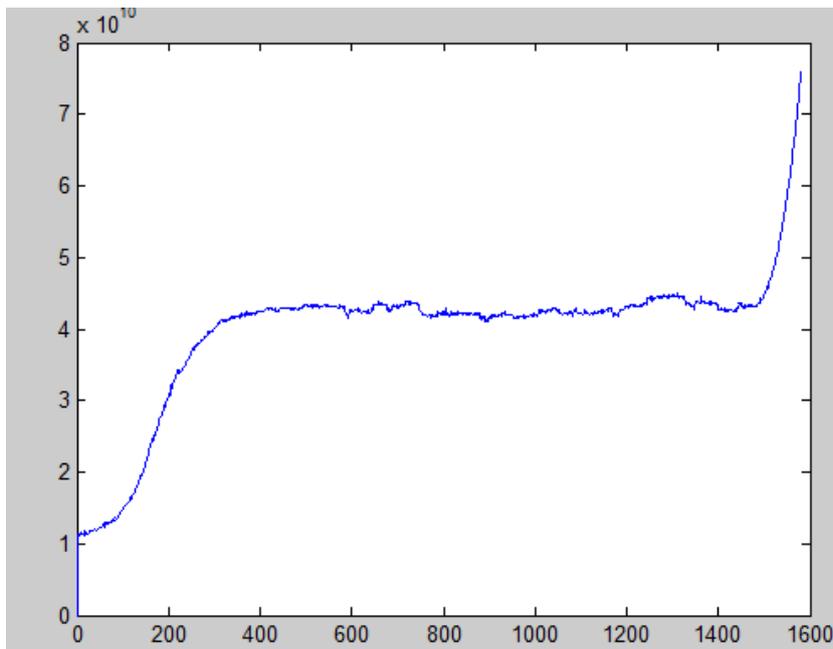


Fig 3.7 Estimation du flux neutronique

On remarque que les résultats pour la concentration des précurseurs et le flux neutronique sont similaires pour les deux modèles ce qui prouve que le filtre particulaire reste optimal pour des systèmes non linéaires.

3.3 Comparaison entre le filtre particulaire et le filtre de Kalman :

A travers cette section on va comparer les résultats d'estimation déjà obtenus pour les filtre particulaires et celle obtenus pour le filtre de Kalman.

Les résultats de simulation du flux neutronique obtenu pour ces deux filtres sont représentés dans la figure suivante :

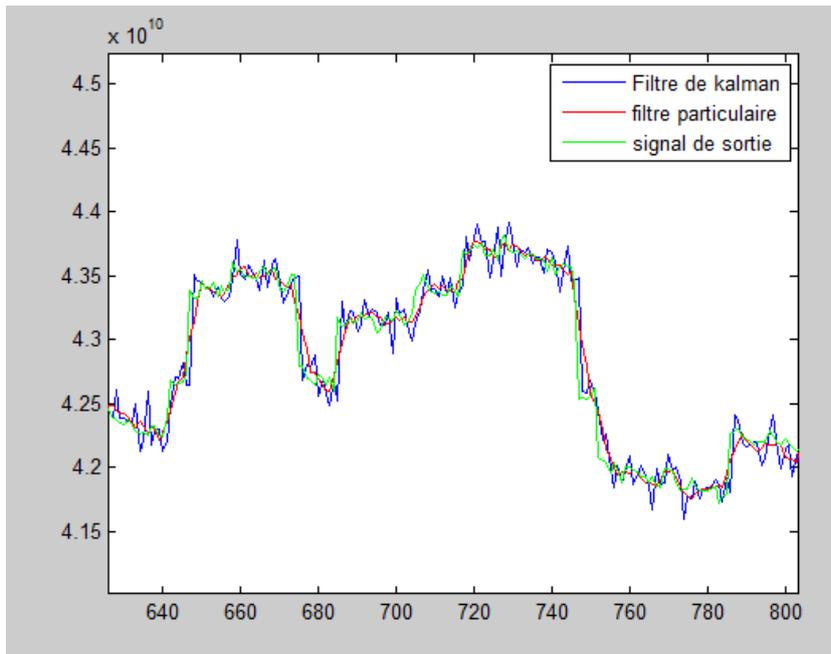


Fig 3.8 Comparaison entre les deux estimations et
Le signal d'observation

La figure précédente démontre que pour un système non linéaire comme dans le cas du deuxième modèle le filtre particulaire présente les meilleurs résultats ,on voit clairement que le signal estimer est lissé qui suit l'allure du signal d'observation (TRACKING) contrairement aux estimations du filtre de Kalman qui sont bruitées .

3.4 Estimation de β_{eff} :

Première estimation :

Si on travaille dans des régions où le flux neutronique est considéré comme stationnaire on peut travailler avec l'approximation suivante :

$$\beta_{\text{eff}} = \lambda \cdot \Lambda \cdot \frac{n(t)}{c(t)}$$

On trouve $\beta_{\text{eff}} = 0.0075\%$

Deuxième estimation :

On se base sur l'estimation de la réactivité estimée mesurée en dollar et en la devise sur la réactivité observée en PCM, le rapport nous donne le β_{eff}

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{\rho_{\text{dollar}}}{\rho_{\text{pcm}}} = 0.0072\%$$

3.5 Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les différents résultats de notre estimation, en appliquant le filtre particulaire sur deux modèles représentatifs de notre réacteur NUR ,l'étude comparative entre l'estimation des différents paramètres cinétiques par le filtre de Kalman et le filtre particulaire a montré la supériorité de ce dernier surtout dans le cas d'un modèle non-linéaire ,et en se basant sur les différentes estimations on a pu calculer le β_{eff} qu'est un paramètre très important pour l'opérateur et l'expérimental.

Conclusion générale

Dans cette étude on a pu développer un algorithme basé sur les différentes équations du filtre particulaire, le rôle de ce dernier est d'estimer les différents paramètres cinétiques de notre réacteur.

La première partie est un aperçu sur la physique du réacteur NUR, les différents techniques pour contrôler son énergie et les différentes mesures de sécurité prises en cas d'incident, une petite identification de ces paramètres cinétiques ainsi que l'équation qui le régit a été faite afin d'expliquer le rôle de notre estimation dans l'expérimental.

Dans la 2^{ème} partie on a bien expliqué la chaîne de mesure de notre réacteur. De la chambre d'ionisation jusqu'à la sortie, le signal récolté passe par différents étages pour qu'il soit amplifié et filtré de tous les bruits.

La 3^{ème} partie est l'application du filtre particulaire sur 2 modèles représentatifs du réacteur. A travers le 1^{er} modèle (modèle linéaire) on a pu estimer le flux neutronique, la densité des précurseurs et la source de puissance, tandis que le 2^{ème} modèle et non-linéaire il nous a servi pour l'estimation de la réactivité.

L'estimation de ces paramètres nous a aidé dans le calcul de β_{eff} un des paramètres les plus importants dans l'expérimental et pour l'opérateur.

A la fin on a terminé notre étude par une comparaison entre nos résultats et ceux faits par le filtre de Kalman afin de justifier notre choix d'utiliser le filtre particulaire.

Bibliographie

- [1] Claude le Sech Christian PHYSIQUE NUCLÉAIRE Des quarks aux applications
Maison d'édition DUNOD ,paris ,2010
- [2] Davide Bertolloto,PavelFrajtag et Gaëtan Girardin : Flux Neutronique - Théorie et
Mesures Laboratoire de physique des Réacteurs et de comportement des Systèmes
École Polytechnique Fédéral de Lausanne.
- [3] La gestion des déchets radioactifs INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE
SURETÉ
NUCLÉAIRE Collection thématique,France 2012
- [4] P, REUSS. Précis de neutronique. EDP Sciences 2003, Institut National des Sciences et
Techniques Nucléaires.
- [5] F. LEGLAND Filtrage particulaire , IRISA / INRIA, Campus de Beaulieu,France.
- [6] Z.Lenouar, Estimations des paramètres cinétiques à l'aide du filtre de Kalman, thèse
d'ingénieur ENP,2015
- [7] Hanselman, Duane et Bruce Littlefield. Mastering Matlab 5. 1998 New Jersey, Prentice
Hall.
- [8]F.Adda, Application de la commande de la logique flou au contrôle d'un réacteur
.nucléairede recherche. Thèse de magister.ENP. 06 Mai 2001.