

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 21 JUIN 75



ANALYSE DE BRUIT SUR LES REACTEURS A NEUTRONS RAPIDES :
détection de défauts naissants et estimation de paramètres
physiques

G. LE GUILLOU

Commissariat à l'Energie Atomique - CEN / CADARACHE - St. Paul Lez Durance BP. N° 1 - 13

RESUME

L'analyse des fluctuations de signaux issus d'un réacteur nucléaire de puissance (filiale Rapide), par des méthodes de corrélation et d'analyse spectrale, débouche actuellement sur deux applications principales :

1.- l'estimation en ligne de paramètres de fonctionnement (coefficients de réactivité)

2.- la détection de défauts naissants (ébullition, vibrations mécaniques anormales)

L'ensemble de ces deux applications donne des éléments essentiels pour le suivi de l'intégrité du coeur des réacteurs rapides et pour le diagnostic du défaut naissant.

SUMMARY

The analysis of the signals fluctuations coming from a power nuclear reactor (a breeder), by correlation methods and spectral analysis has two principal applications :

1.- On line estimation of physical parameters (reactivity coefficients)

2.- Beginning failures (little boiling, abnormal mechanic vibrations)

These two applications give important informations to the reactor core control and permit a good diagnosis.

ANALYSE DE BRUIT SUR LES REACTEURS A NEUTRONS RAPIDES :
détection de défauts naissants et estimation de paramètres
physiques

I/ - INTRODUCTION

Les applications des techniques de traitement du signal, appliquées aux réacteurs nucléaires de puissance, sont en développement.

Dans une première période, grossomodo de 1945 à 1965, les applications sont du domaine de la physique neutronique (expérience "α de ROSSI"), les expériences critiques fournissent l'essentiel des données expérimentales.

Dans la période actuelle les développements respectifs de la technologie électronique et des programmes nucléaires de puissance ont bouleversés les données. Des outils électroniques puissants permettent de faire, pratiquement en temps réel et à très grande échelle, à des coûts raisonnables, des traitements comme la corrélation et l'analyse spectrale. L'amélioration du contrôle et de la sécurité de fonctionnement des centrales nucléaires de puissance, la fourniture d'éléments nouveaux pour le diagnostic de défaut naissant, dans une certaine mesure l'identification de processus, sont les applications les plus développées. L'intérêt du traitement du signal tient, d'une part, au caractère passif de son application et, d'autre part, au fait que seule cette technique permet de saisir des états pathologiques naissants comme les défauts mécaniques et l'ébullition localisée.

Nos travaux sont liés au développement de la filière surrégénératrice refroidie au sodium mais certaines applications sont généralisables à d'autres types de réacteurs.

Notre champ expérimental est constitué par les deux réacteurs prototypes de la filière surrégénératrice :

RAPSODIE : réacteur prototype d'irradiation, d'une puissance nominale de 40 MegaWatt thermiques, situé à CADARACHE

PHENIX : réacteur prototype producteur d'électricité (250 MegaWatt électriques) situé à MARCOULE

Hormis leurs puissances nominales ce qui différencie ces deux réacteurs, sur le plan technologique, est la conception de leurs circuits d'échanges thermiques :

RAPSODIE est un réacteur à boucles (la cuve ne contient que le coeur)

PHENIX est un réacteur intégré (la cuve contient le coeur, les pompes et les échangeurs primaires).

C'est une différenciation importante de nature à modifier qualitativement et quantitativement les sources d'excitation que prennent en compte les applications du traitement du signal.

Il faut bien comprendre que notre champ expérimental se limite au centre potentiellement névralgique d'une installation nucléaire de puissance : le coeur du réacteur. Parmi les innombrables mesures disponibles nous retenons celles qui peuvent véhiculer les informations issues de ce centre.

Le coeur du réacteur est le processus que nous analysons; le but : améliorer la qualité et la sûreté du contrôle de son intégrité.

L'observation des réalisations de ce processus se fait dans deux directions :

- obtention des signatures caractéristiques de l'état stationnaire normal (bruit naturel)
- obtention des signatures en état perturbé stationnaire (défaut réel ou provoqué expérimentalement).

Les réalisations du processus que nous analysons par les méthodes du traitement du signal sont surtout les fluctuations - ou "bruit" - par rapport à la valeur moyenne des mesures physiques suivantes :

- fluctuations du signal de puissance neutronique
- fluctuations du signal de température d'entrée dans le coeur
- fluctuations du signal de débit de sodium dans le coeur
- Signaux de vibrations mécaniques.

Le traitement du signal s'opère en deux temps (voir la figure 3) :

- 1 - Enregistrement magnétique analogique des réalisations du processus (bruits centrés) sur des durées variant de six à douze heures.
- 2 - Analyse en laboratoire, et en contraction de temps, de ces enregistrements par corrélation et analyse spectrale.

Le matériel de base du laboratoire est actuellement une chaîne de traitement du signal automatisée comprenant :



ANALYSE DE BRUIT SUR LES REACTEURS A NEUTRONS RAPIDES :
détection de défauts naissants et estimation de paramètres
physiques

- Un corrélateur BF en 1024 points
- Un ordinateur 12 K mémoires permettant de faire de la FFT

Le laboratoire comporte aussi un analyseur de spectre en temps réel et sera bientôt équipé d'un PLURIMAT S.

Les résultats que nous présentons ne donnent évidemment qu'une vue partielle de nos travaux. Nous avons choisi de montrer trois réalisations typiques :

- Identification de processus sur RAPSODIE
- Caractérisation d'une ébullition en pile (sur RAPSODIE)
- Détection d'un défaut mécanique naissant (PHENIX)

Nous sommes prêts à répondre aux questions, notamment dans le domaine de la méthodologie du traitement.

II/ - DESCRIPTION SOMMAIRE DU PROCESSUS.

1 - Le modèle dynamique simplifié du processus.

En préambule nous devons affirmer le rôle prépondérant d'une réalisation particulière du processus : le bruit neutronique.

La formation des bruits que nous analysons admet le processus schématisé de la figure 1.

Dans la pratique les fonctions de transfert notées "FT₁" sont de simples coefficients algébriques. Ainsi la dynamique du bruit de puissance repose essentiellement sur la fonction de transfert "G(p)" du coeur.

"K(p)" est la fonction de transfert du coefficient de contre réaction interne de puissance et "G₀(p)" est la fonction de transfert dite "à puissance nulle".

La figure 2 résume les principales caractéristiques de la fonction de transfert du coeur.

On retiendra surtout :

- pour les fréquences inférieures à 10⁻³ Hertz

$$G(p) \rightarrow -\frac{1}{N_0 \cdot K(0)}$$

- pour les fréquences intermédiaires

$$10^{-1} < f < 10^4 \text{ Hertz}$$

$$G(p) \approx G_0(p) \rightarrow \frac{1}{\beta}$$

L'expression de "G(p)" est spécifique au problème étudié : il est très rare d'avoir à utiliser l'expression complète. Par exemple les zones fréquentielles de plus grande probabilité d'apparition des sources de bruit sont :

- bruit de température d'entrée :

$$10^{-4} < f < 10^{-2} \text{ Hertz}$$

- bruit de vibrations mécaniques :

$$1 < f < 20 \text{ Hertz}$$

- bruit d'ébullition du sodium :

$$1 < f < 10 \text{ Hertz}$$

2 - Le modèle de densité spectrale de puissance neutronique pour les réacteurs nucléaires de puissance.

Notations :

DSP = abréviation de "densité spectrale de puissance"

N = indice d'une puissance neutronique

R = indice d'une réactivité

S_{NN}(f) = DSP du bruit de puissance neutronique

S_{RR}(f) = DSP du bruit de réactivité

A, B, E = Constantes

$$S_{NN}(f) \approx \left[\underbrace{A \cdot N_0}_{(1)} + \underbrace{B \cdot N_0^2 \cdot |G(f)|^2 \cdot S_{RR}(f)}_{(2)} \right] \cdot |D(f)|^2 \quad (1)$$

Le terme (1) représente la contribution du bruit non corrélé (essentiellement le bruit de détection dans le cas des réacteurs de puissance).

Le terme (2) représente la partie utile, corrélée, de la DSP.

La qualité de la détection, basée sur le traitement du bruit neutronique, est d'autant meilleure que l'importance relative du terme non corrélé, dans (1), est moindre. Cette caractéristique croît, toutes choses égales, proportionnellement au flux neutronique au niveau de la chambre d'ionisation :

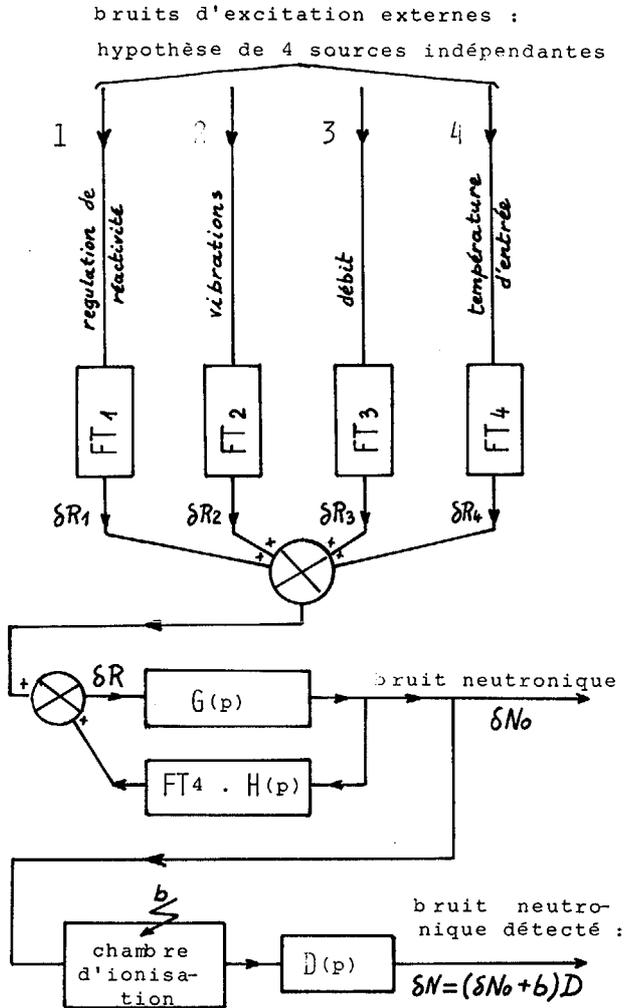
- bonne pour RAPSODIE (chambre en cuve)

- médiocre dans le cas de PHENIX (chambre sous cuve).

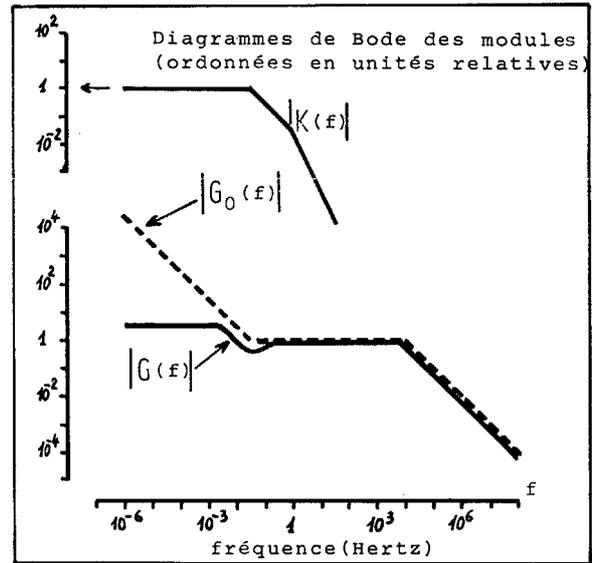
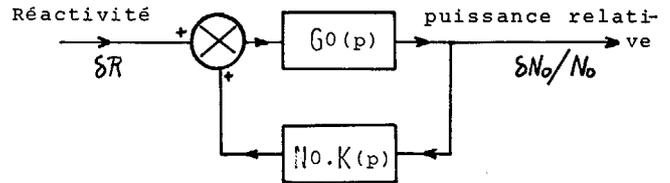
La figure 4 illustre cette propriété.

ANALYSE DE BRUIT SUR LES REACTEURS A NEUTRONS RAPIDES :
déttection de défauts naissants et estimation de paramètres
physiques

- Figure 1 - SCHEMA IDEALISE DU PROCESSUS GLOBAL.



- Figure 2 - SCHEMA BLOC DU PROCESSUS G(p)



- "FT" = fonction de transfert de la conversion "bruit d'excitation + réactivité"
- $G(p)$ = fonction de transfert "Réactivité + puissance" du coeur
- $D(p)$ = fonction de transfert de l'instrumentation électronique
- $H(p)$ = fonction de transfert de la contre réaction externe (échangeurs de chaleur)

- λ = constante de décroissance moyenne des neutrons retardés $\approx 0.1 \text{ sec}^{-1}$
- β = fraction relative des neutrons retardés $\approx 5.10^{-3}$
- l = temps de vie moyen du neutron prompt $\approx 10^{-7} \text{ sec.}$
- N_0 = niveau moyen de puissance neutronique

$$G(p) = \frac{G_0(p)}{1 - N_0 \cdot K(p) \cdot G_0(p)}$$

$$G_0(p) \approx \frac{p + \lambda}{p l (p + \beta/l)}$$



ANALYSE DE BRUIT SUR LES REACTEURS A NEUTRONS RAPIDES :
détection de défauts naissants et estimation de paramètres
physiques

La DSP du bruit de réactivité, dans le cas général, est de la forme :

$$S_{RR}(f) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \delta R_i(f) \cdot \delta R_j^*(f) \quad (2)$$

Lorsqu'il n'y a pas de corrélation entre les sources :

$$S_{RR}(f) = \sum_{i=1}^K |\delta R_i(f)|^2 \quad (3)$$

On remarquera, d'après (1), que "l'espérance de détection" d'un défaut stationnaire croît avec le niveau de puissance; en effet :

$$\left[\frac{S_{N_1 N_1}(f)}{S_{N_2 N_2}(f)} \right]_{\text{Corrélé}} = \left[\frac{P_1}{P_2} \right]^2 \quad (4)$$

L'intercorrélacion, et plus généralement la mesure interspectrale, accroît évidemment la qualité de la détection :

- On dispose de deux chambres d'ionisation indépendantes et de mêmes caractéristiques:

$$S_{N_1 N_2}(f) = B \cdot N_o^2 \cdot |G(f)|^2 \cdot S_{RR}(f) \cdot |D(f)|^2 \quad (5)$$

- On fait l'intercorrélacion entre une mesure significative d'une source et le bruit neutronique :

$$S_{NR_K}(f) = E \cdot N_o \cdot G(f) \cdot D(f) \cdot |\delta R_K(f)|^2 \quad (6)$$

dans ces conditions les bruits non corrélés disparaissent.

Remarques : La fonction de transfert de mesure, "D(p)", est un filtre passe bas dont la fréquence de coupure varie, selon le type de chaîne, entre 10 Hertz et quelques centaines de Hertz. Cette limitation de la bande passante, si elle limite le champ d'application du traitement du signal, n'est pas déterministe : elle résulte d'un compromis entre les impératifs du contrôle classique (intégration volontaire des fluctuations) et ceux de nos mesures de bruits.

III/ - PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS SUR LES
REACTEURS RAPSODIE ET PHENIX.

1 - L'identification des sources de bruit

Méthode utilisée : Calcul des fonctions de cohérence et des fonctions d'inter-corrélacion normalisées.

1.1 - Les sources stationnaires

- a) - Le bruit de température d'entrée dans le coeur :
dû aux mélanges et au pompage des régulations au niveau des échangeurs de chaleur. (Voir les fig. 5)
Plage de fréquence optimum =
 10^{-4} Hertz à 10^{-2} Hertz
Valeur efficace moyenne = 0,1°C
- b) - Le bruit de vibration mécanique des structures (PHENIX).
- Vibration, par excitation des modes propres, induites par frottement (effet indirect de débit primaire) (Voir les fig. 6)
Plage de fréquence = Sept harmoniques de 13,3 Hertz (mode forcé) et un pic vers 6 Hertz (mode propre).
Valeur efficace, seuil
détectable = 10 microns

1.2 - Les sources ayant caractérisé une anomalie.

- a) - Cas d'une anomalie "réelle" :
apparition d'un pic de fréquence, d'origine mécanique (sans gravité) (Voir les fig. 6)
- b) - Cas d'une anomalie provoquée expérimentalement :
Création d'une zone d'ébullition localisée dans un assemblage spécial de RAPSODIE.

La détection se fait sans ambiguïté tant en amplitude qu'en fréquence (Voir les fig. 7)

2 - FIGURES

ANALYSE DE BRUIT SUR LES REACTEURS A NEUTRONS RAPIDES :
déttection de défauts naissants et estimation de paramètres
physiques

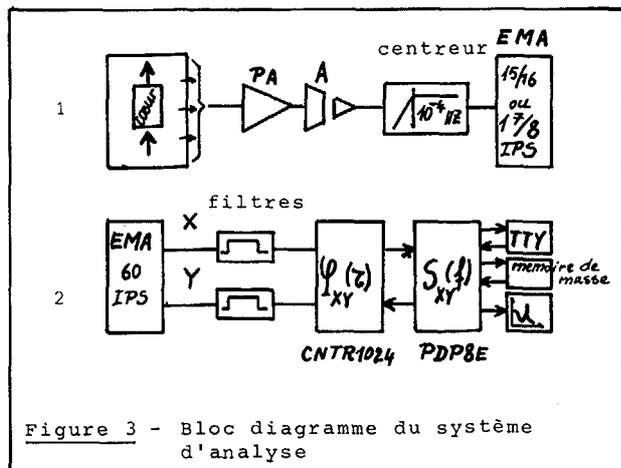


Figure 3 - Bloc diagramme du système d'analyse

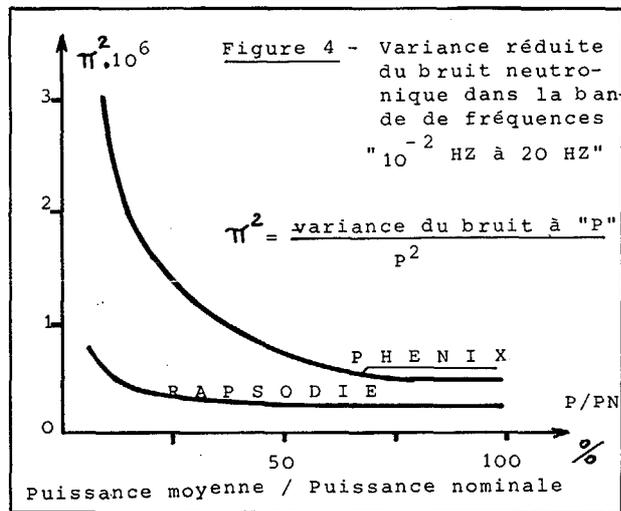


Figure 4 - Variance réduite du bruit neutronique dans la bande de fréquences "10⁻² Hz à 20 Hz"

Puissance moyenne / Puissance nominale

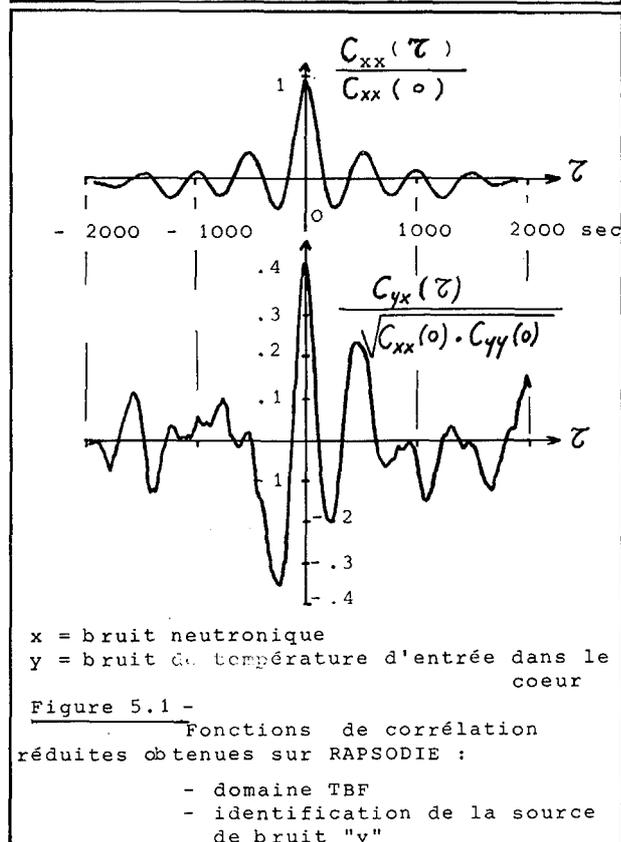


Figure 5.1 - Fonctions de corrélation réduites obtenues sur RAPSODIE :

- domaine TBF
- identification de la source de bruit "y"

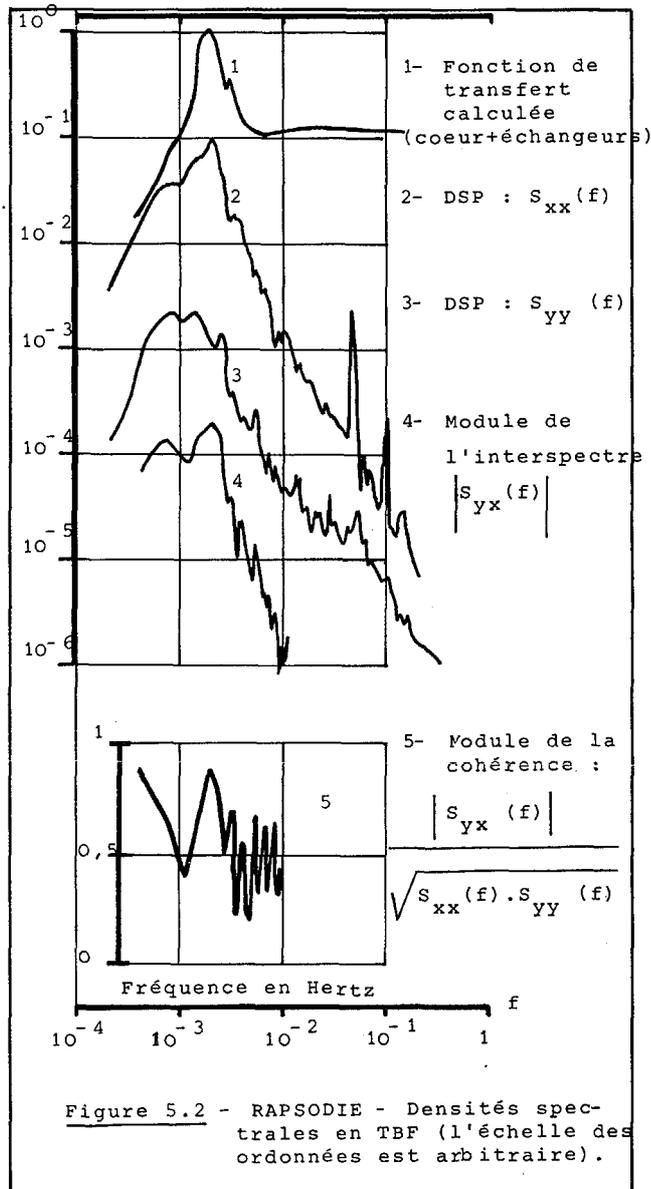


Figure 5.2 - RAPSODIE - Densités spectrales en TBF (l'échelle des ordonnées est arbitraire).

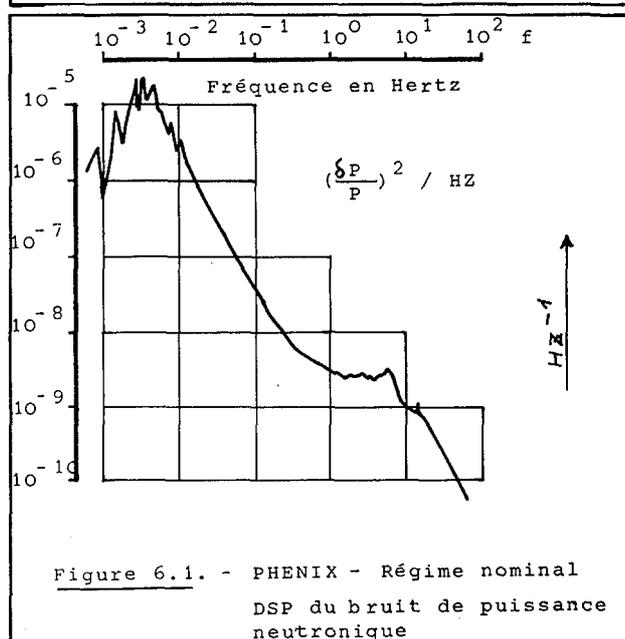


Figure 6.1. - PHENIX - Régime nominal DSP du bruit de puissance neutronique



ANALYSE DE BRUIT SUR LES REACTEURS A NEUTRONS RAPIDES :
déttection de défauts naissants et estimation de paramètres
physiques

