



A.F.C.E.T Automatique 1981.
NANTES, (France), 27 - 29 octobre 1981.
CEA - CONF 6150

APPLICATION DE LA METHODE DE RECONNAISSANCE DES FORMES
A LA SURVEILLANCE ACOUSTIQUE DES REACTEURS RAPIDES

M. BRUNET M. VAL*

RESUME :

La détection précoce des anomalies de fonctionnement est un objectif intéressant la sûreté des réacteurs rapides. L'accident le plus vraisemblable est le bouchage total ou partiel d'un assemblage dont une des manifestations est la mise en ébullition du sodium qu'il contient. Cette ébullition s'accompagne de l'émission d'ondes acoustiques dont la détection par des capteurs appropriés paraît un moyen efficace de surveillance du cœur.

Le CEA conduit depuis plusieurs années un programme expérimental d'étude de la détection de l'ébullition par voie acoustique. Le texte présente les différentes expériences mises en oeuvre puis établit un parallèle entre les résultats obtenus par les procédures classiques de traitement et ceux obtenus par application aux mêmes données de base de la méthode de reconnaissance des formes.

* Université de COMPIEGNE

1 - INTRODUCTION.

Dans le cadre de la protection des coeurs de réacteurs rapides en fonctionnement, le Commissariat à l'Energie Atomique conduit un programme de détection précoce des anomalies de refroidissement par voie acoustique.. Cette méthode de prévention de la mise en ébullition intempestive du caloporteur, le sodium, est basée sur le fait que la recondensation des bulles de vapeur dans une zone de sous saturation engendre localement des variations brutales de pression qui peuvent être transmises par le fluide jusqu'à des capteurs judicieusement disposés. Malheureusement, dans un réacteur, ces signaux sont en concurrence avec des signaux de nature voisine mais provoqués de façon permanente dans l'enceinte de mesure par les organes annexes au fonctionnement du coeur : pompes de circulation du fluide, circuits de prélèvement, etc ... Les possibilités de détection reposent donc sur l'obtention d'un rapport signal sur bruit aussi favorable que possible, c'est à dire sur la mise en oeuvre de méthodes de traitement du signal performantes.

L'étude expérimentale des possibilités de détection acoustique de l'ébullition a été menée successivement sur des expériences hors réacteur (boucles CFNa) qui présentent une grande souplesse d'exploitation et un bruit d'ambiance très faible puis en réacteur dans des conditions plus réalistes avec l'expérience d'ébullition NABO dans RAPSODIE et de l'expérience dite du siffleur dans PHENIX(1). Après avoir présenté les conditions de réalisation de ces trois expériences et les résultats obtenus à partir de mesures acoustiques par des méthodes classiques de traitement du signal, ce document met en évidence l'efficacité des méthodes de reconnaissance des formes décrites par ailleurs dans ce présent congrès.

2 - PRESENTATION DES EXPERIENCES.

2.1. Expérience d'ébullition dans la boucle CFNa.

Dans la boucle CFNa (Convection Forcée Sodium), exploitée par le Service des Transferts Thermiques à GRENOBLE, une pompe mécanique assure la circulation de sodium liquide dans la section d'essai schématisée figure 1. La section d'essai simule un assemblage combustible de SUPER PHENIX 1 réduit à une grappe de 19 aiguilles. Chaque aiguille (\varnothing 8,65 mm séparées par un fil espaceur hélicoïdal \varnothing 1,3 mm) comporte une section chauffée électriquement de 600 mm de long capable de dissiper 30 KW. Au-dessus de la section chauffante, la géométrie du dispositif reconstitue la thermohydraulique d'un assemblage standard.

Quatre détecteurs acoustiques à guide d'ondes repérés A, B, C, D sont disposés le long de la section d'essai. L'installation comporte également une instrumentation pourvue de débitmètres, de thermocouples et de capteurs de pression.

Le sodium pénètre à température constante (400°) par le bas de la section d'essai à un débit contrôlé par la vanne de pied. Il s'échauffe au contact de la grappe et s'évacue par le haut où il est recyclé après refroidissement. Des conditions d'ébullition de plus en plus sévères sont obtenues, pour une certaine puissance de chauffe dissipée dans la grappe, par réduction de débit d'entrée par paliers successifs.

2.2. Expérience d'ébullition dans RAPSOEIE.

Cette expérience NABO (Sodium Boiling) présente par rapport à CFNa l'originalité d'être réalisée dans un réacteur de puissance, c'est à dire dans des conditions d'ambiance plus réalistes.

Pour cet essai, un assemblage expérimental présentant extérieurement la même géométrie qu'un assemblage standard a été chargé au centre du coeur (figure 2). Ce dispositif renferme une cheminée cylindrique séparant en deux courants concentriques ascendants le débit de sodium. A l'intérieur de la cheminée, 7 aiguilles de tantale de 350 mm de long et 11 mm de diamètre centrées sur le coeur dissipent par échauffement γ une puissance de 5 KW environ, pour une puissance réacteur de 10 MW. Cette puissance est suffisante pour porter à l'ébullition le débit interne de sodium volontairement réduit à une valeur très faible. La vapeur produite se recondense dans le volume même de l'assemblage au confluent des veines interne et externe du sodium, sans préjudice pour le fonctionnement du réacteur.

Le contrôle de l'ébullition est obtenu à débit de sodium constant par variation de la puissance thermique totale du coeur qui détermine proportionnellement le flux de rayonnement γ qui baigne l'assemblage.

Les signaux acoustiques sont recueillis par un transducteur à guide d'ondes plongeant dans le collecteur chaud et qui fait partie de l'instrumentation de contrôle du réacteur.

2.3. Expérience de cavitation dans PHENIX.

Des considérations évidentes de sécurité excluent la réalisation d'expériences d'ébullition dans le réacteur électrogène PHENIX. Néanmoins, pour profiter au mieux de ses conditions d'ambiance, très proches de celles des futurs grands réacteurs de la filière, on a imaginé de substituer aux signaux acoustiques de l'ébullition, ceux de la cavitation dont la phénoménologie est voisine.

Pour cela (figure 3), un assemblage en acier de la protection neutronique latérale, dans lequel circule un débit sodium significatif, a été équipé d'un diaphragme qui présente un phénomène de cavitation au-delà d'un certain débit critique. L'essai consiste, au démarrage du réacteur à suivre l'évolution des signaux acoustiques en fonction du débit de sodium croissant dans le coeur, mesuré par le régime de rotation des pompes primaires. Au régime nominal de fonctionnement du réacteur le débit est maximal, le phénomène de cavitation également mais la recondensation des bulles produites a lieu au sein du fluide sans dommage pour les structures environnantes.

Les signaux acoustiques sont recueillis sur les détecteurs à guide d'ondes qui équipent la Centrale et dont la disposition par rapport au coeur est indiquée sur la figure 3.

3 - RESULTATS DE L'ANALYSE CLASSIQUE DES SIGNAUX ACOUSTIQUES.

L'idée initiale était de caractériser l'ébullition par sa signature spectrale. Toutes les tentatives menées dans ce sens se sont heurtées à la complexité des spectres (figures 4, 5, 6) due partie à la réponse propre des capteurs (effet de capote = modulation du spectre figures 5 et 6 liée aux réflexions des ondes acoustiques aux extrémités

du guide d'ondes), partie à la présence de nombreux modes propres de vibration de l'enceinte de mesure (figure 4).

La seule information sûre était une translation des spectres en niveau, sans altération significative de leur forme, en présence d'ébullition. Cette constatation a justifié le développement de méthodes d'analyse basées cette fois sur des quantités intégrales : valeur efficace ou puissance de bruit dans la bande de fréquence. Les figures 7, 8, 9 en montrent le résultat faisant apparaître que le rapport signal (d'ébullition) sur bruit (en général d'origine mécanique) s'accroît significativement par élimination des fréquences inférieures à 10 KHz (figure 7); cet avantage, évident dans le cas de CFNa, étant d'autant moins marqué que le niveau global de bruit est plus élevé et de nature plus complexe.

Un examen plus attentif des signaux dans le domaine temporel fait apparaître que l'ébullition se caractérise en général par des signaux discrets de faible durée et de grande amplitude. Un choix judicieux du niveau de discrimination en permet le comptage. Cette technique confirme parfaitement les résultats précédents (figures 4 et 6).

Les conclusions sont que l'ébullition apparaît dans CFNa pour les débits inférieurs à 1,45 m³/h, pour NABO à une puissance supérieure à 10,3 MW. Le début de cavitation se produit dans l'assemblage siffleur pour des vitesses de pompes supérieures à 650 tours/minute.

4 - METHODE DE RECONNAISSANCE DES FORMES.

La présence dans le signal d'ébullition d'émission discrètes dénombrables n'est pas compatible avec l'invariance supposée de la forme du spectre. D'où l'idée de substituer à l'analyse visuelle des spectres, superficielle et subjective, une méthode plus systématique et plus sensible. L'Université de Technologie de COMPIEGNE a développé à la demande du C.E.A une procédure d'analyse des densités spectrales de puissance. Cette méthode, basée sur les principes de la reconnaissance des formes, peut être schématisée de la façon suivante (2).

A partir des densités spectrales de puissance on calcule l'énergie moyenne dans des bandes de fréquences consécutives selon des découpages présentés figures 4 à 6, puis la participation relative de l'énergie totale du spectre (quantité indépendante du gain d'enregistrement des signaux). Chaque spectre correspondant à une situation expérimentale particulière est finalement caractérisée par un vecteur à 20 composantes (découpage du spectre en 20 bandes). Ce vecteur constitue un échantillon. Une expérience se traduit par l'élaboration d'un jeu d'échantillons statistiquement représentatif de ses différentes phases. Ainsi dans les cas cités chaque palier (de débit pour CFNa, de puissance pour NABO, de vitesse de pompes pour PHENIX) est caractérisée par 10 vecteurs établis en 10 instants différents du palier.

Un algorithme de coalescence, ISODATA, réalise la partition de l'ensemble des vecteurs en classes distinctes. Cette partition, basée sur un Critère de " distance " dans l'espace à 20 dimensions, assure la meilleure distance inter-classes en même temps que la dispersion minimum intra-classe. Le tableau 1 présente la partition en 2 sous classes des trois expériences citées. Il est à remarquer que ces partitions s'interprètent comme la distinction entre deux états : avec

ou sans ébullition pour CFNA et NABO, avec ou sans cavitation pour PHENIX avec des valeurs cohérentes du paramètre principal pour la transition entre les deux états : ébullition $d \leq 1,44$ m³/h pour CFNa, $p > 7,6$ MW pour NABO, cavitation au-dessus de 625 tours/mn.

Les calculs en dimension 20 étant relativement lourds un second algorithme BRANCH and BOUND, réalise la sélection de caractère. A partir de la partition déterminée par ISODATA, le code établit une hiérarchie dans les 20 composantes des vecteurs échantillons basée sur la conservation d'un critère mathématique dont la valeur est maximale pour 20 composantes. Cette analyse montre ainsi qu'une sélection basée sur les cinq composantes spectrales reprées sur la figure 4 conserve 65% du critère pour CFNa alors que deux bandes de fréquence seulement, indentiques d'ailleurs pour les deux expériences, conservent plus de 50% du critère pour NABO et PHENIX. En dernier lieu, un code de discrimination linéaire permet à partir des cinq ou des deux composantes retenues de classer tout nouvel échantillon de part ou d'autre d'un hyperplan pour CFNa, d'une droite pour NABO ou PHENIX (figures 10 et 11) partageant l'espace d'épreuve en deux régions correspondant l'une à l'absence du phénomène à détecter.

La procédure succinctement évoquée permet donc bien à partir des trois étapes de coalescence, de sélection de caractère et de discrimination linéaire de bâtir un outil de détection basé sur l'analyse spectrale.

5 - CONCLUSION.

L'application d'une procédure cohérente de reconnaissance des formes à l'analyse d'expériences qualificatives des méthodes de détection précoce d'anomalies de fonctionnement des réacteurs apporte des résultats encourageants. En effet, la discrimination expérimentale entre états normal et anormal s'effectue selon les mêmes frontières que celle établies par des méthodes de traitement du signal plus conventionnelles. L'avantage de la reconnaissance des formes réside dans le fait que sa mise en oeuvre en ligne est particulièrement simple grâce aux appareils d'analyse spectrale du commerce directement compatibles avec mini-ordinateurs capables de gérer les algorithmes de décision.

Mais avant de pouvoir effectivement exploiter ces potentialités, un travail d'interprétation physique reste à faire pour justifier a posteriori le choix des caractères dominants, par exemple leur identité dans NABO et PHENIX, les différences entre ces deux situations et CFNa, ect ... Cette interprétation actuellement en cours, devrait apporter des précisions sur la caractérisation fine des phénomènes anormaux (existence de sous-classes dans ISODATA) et permettre d'optimiser a priori les procédures de traitement et de décision.

D'autres étude menées en parallèle sur les signaux neutroniques et les fluctuations de température semblent montrer que la synthèse entre ces différentes sources d'information est possible et que la reconnaissance des formes traitera finalement des vecteurs dont les composantes auront des origines physiques différentes.

R E F E R E N C E S

- (1) G. LEGUILLOU et COLL.
BOILING DETECTION IN FAST REACTOR BY NOISE ANALYSIS.
SMORN II - Progress in Nuclear Energy Vol 1 N° 2 - 4 1977
- (2) M. VAL et COLL.
PATTERN RECOGNITION TECHNIQUE IN SODIUM COALED FAST BREEDER
REACTORS ACOUSTIC SIGNALS ANALYSIS
5 Th International Conference on Pattern Recognition
MIAMI Décembre 80.

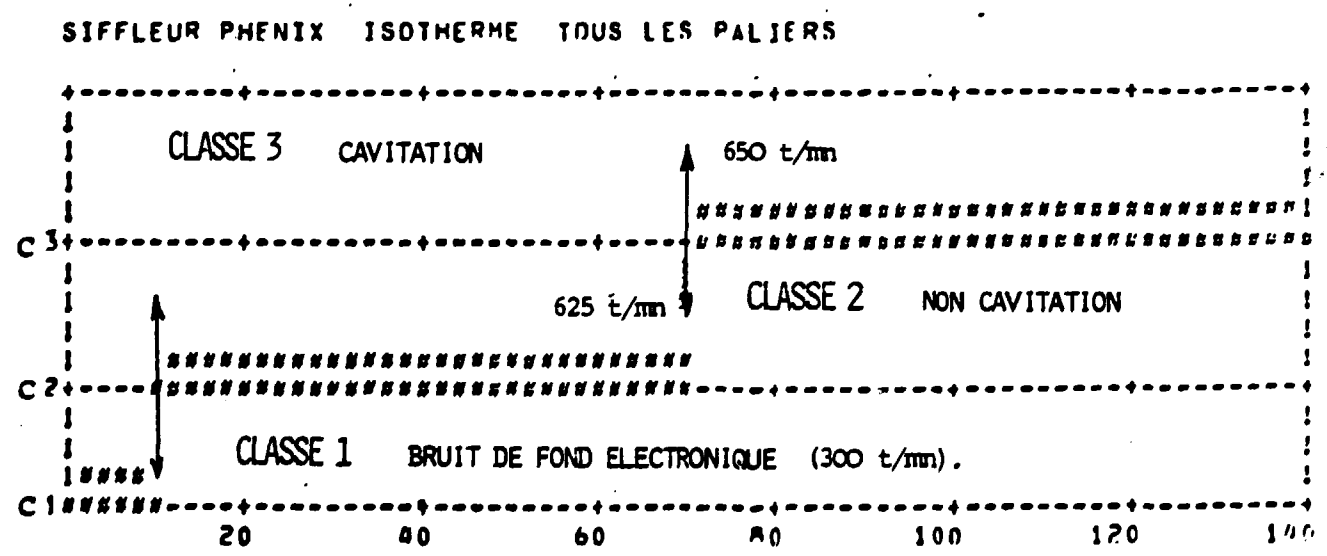
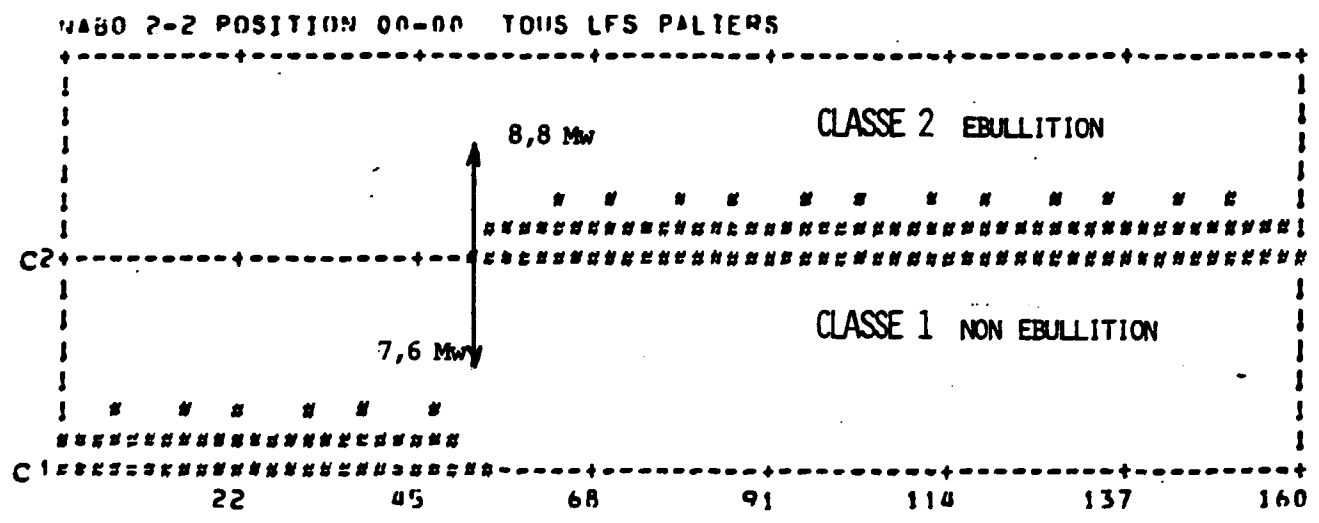
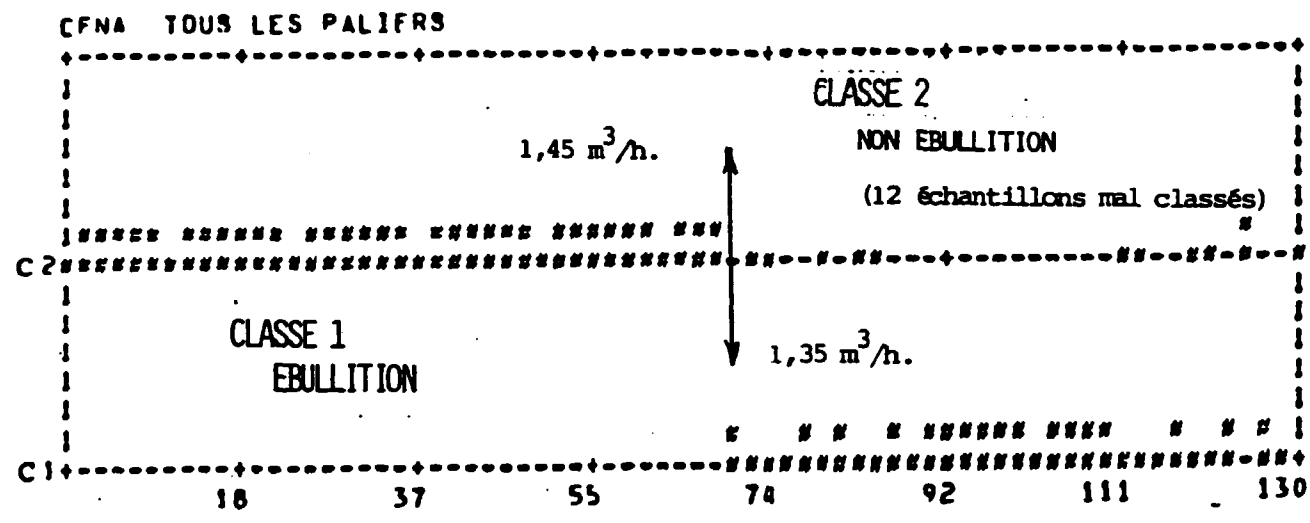


TABLEAU 1 - RESULTATS ISODATA - dimension 20 -

Fig. 1. BOUCLE D'ESSAI CF Na

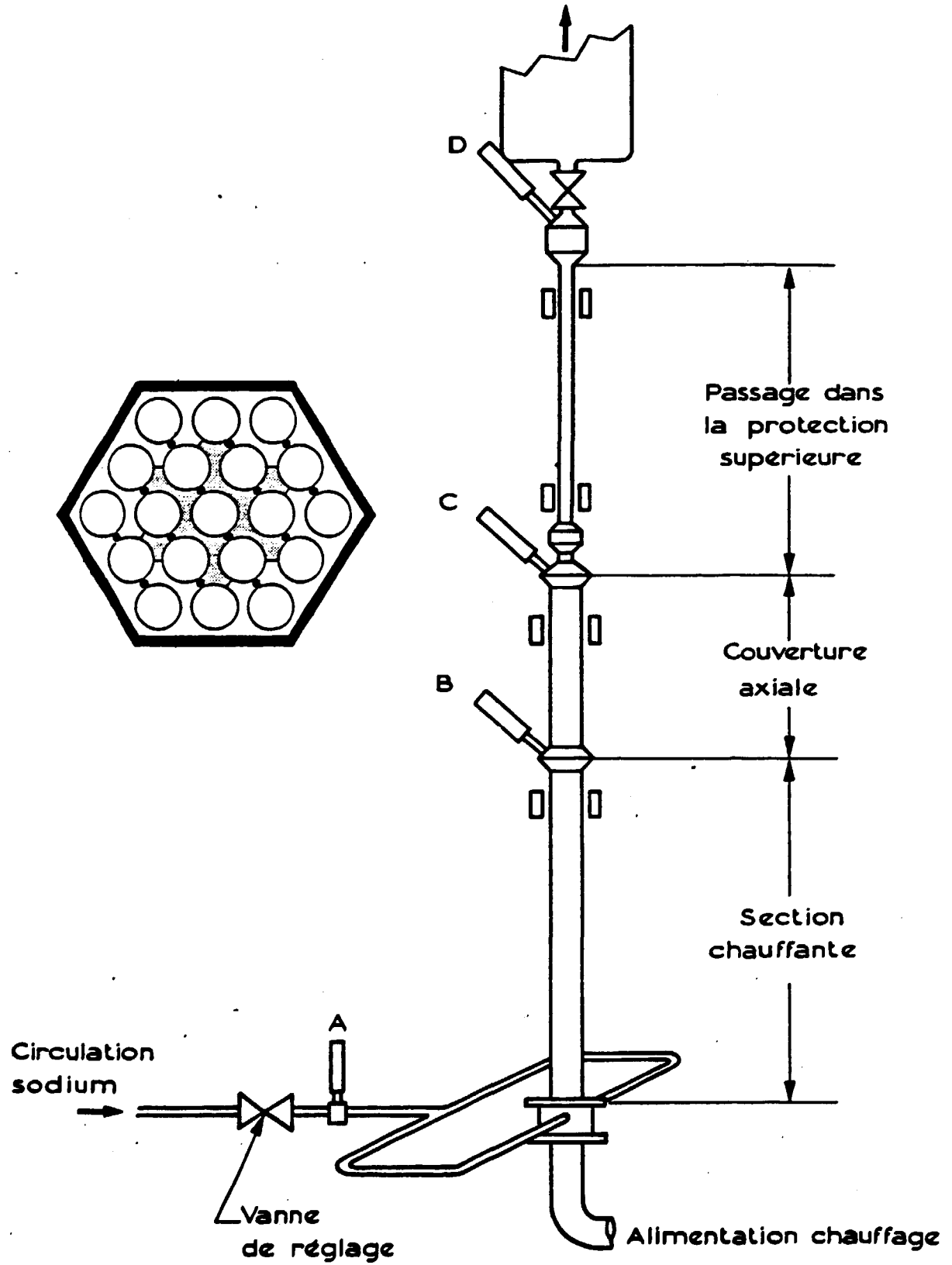
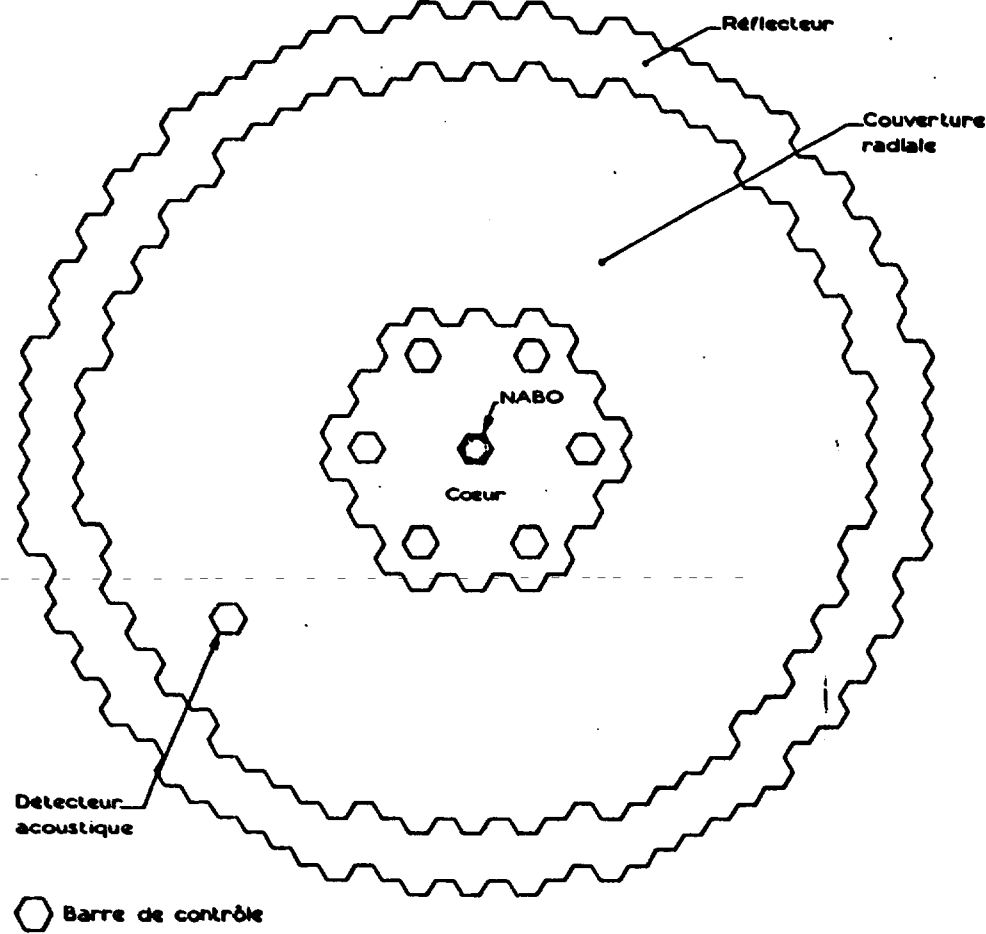
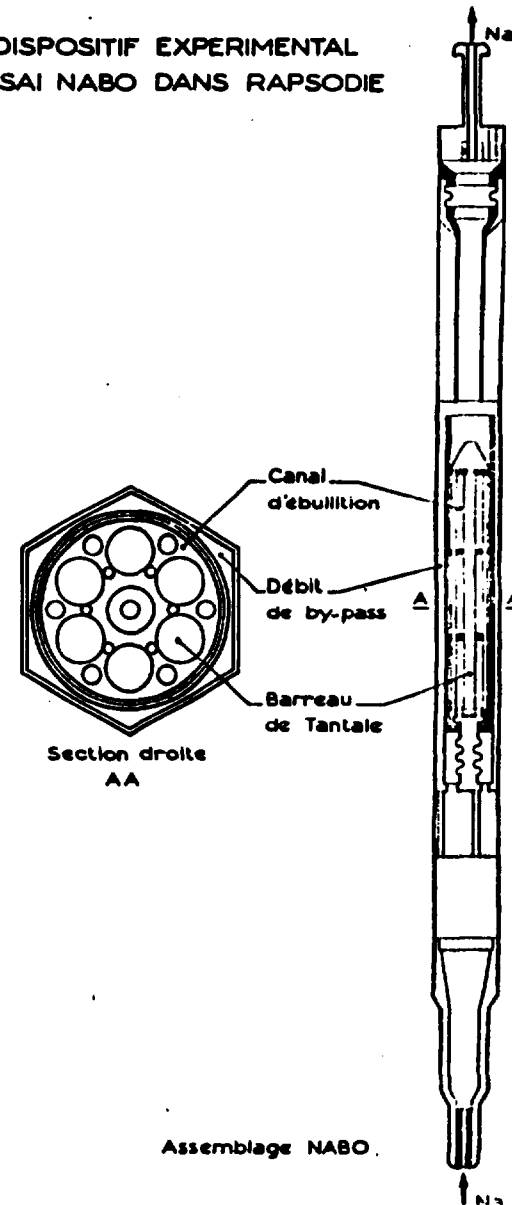


Fig. 2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL
POUR L'ESSAI NABO DANS RAPSODIE

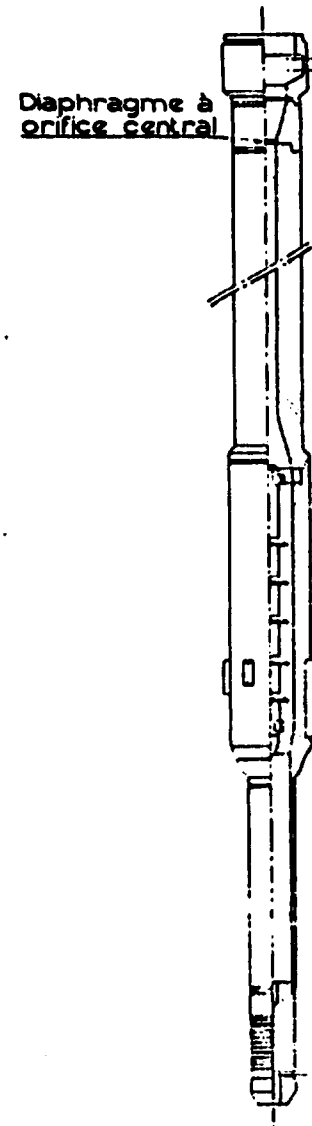
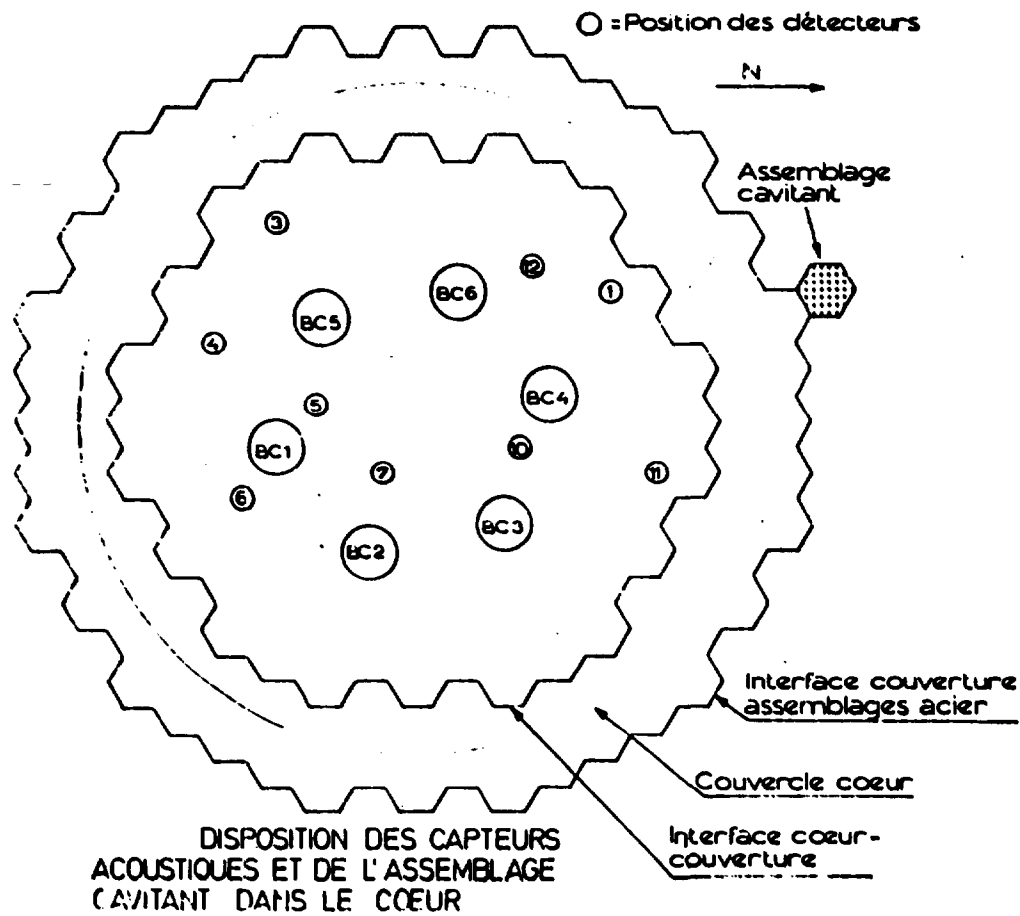


Disposition du capteur
acoustique et de l'assemblage
NABO dans le coeur



Assemblage NABO

FIG 3 DISPOSITIF EXPERIMENTAL POUR
L'ESSAI DE L'ASSEMBLAGE CAVITANT



ASSEMBLAGE CAVITANT D.A.S.

Fig. 4. SPECTRE DE CF Na
ET DECOUPAGE EN FREQUENCE

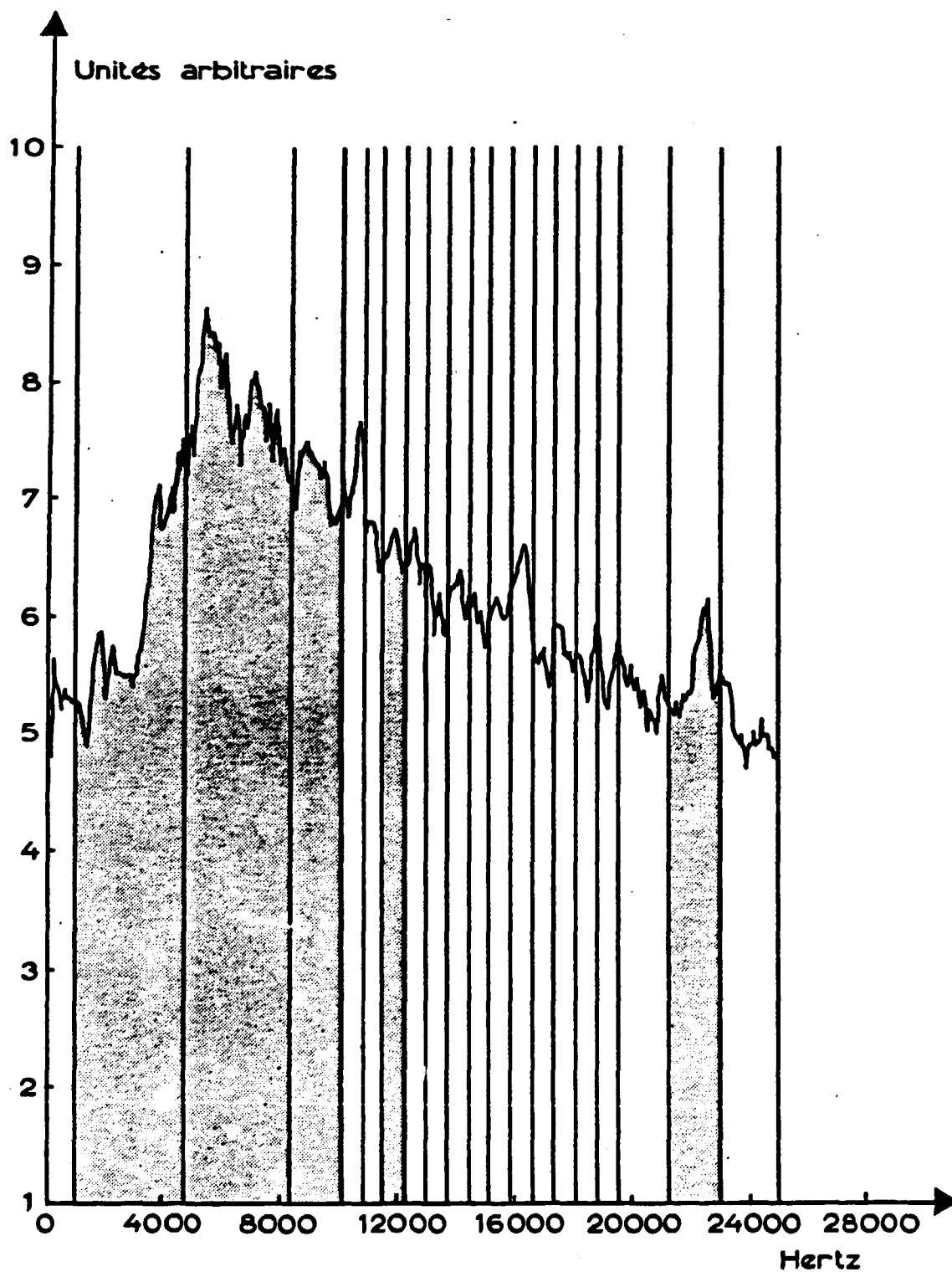


Fig. 5. SPECTRE DE NABO
ET DECOUPAGE EN FREQUENCE

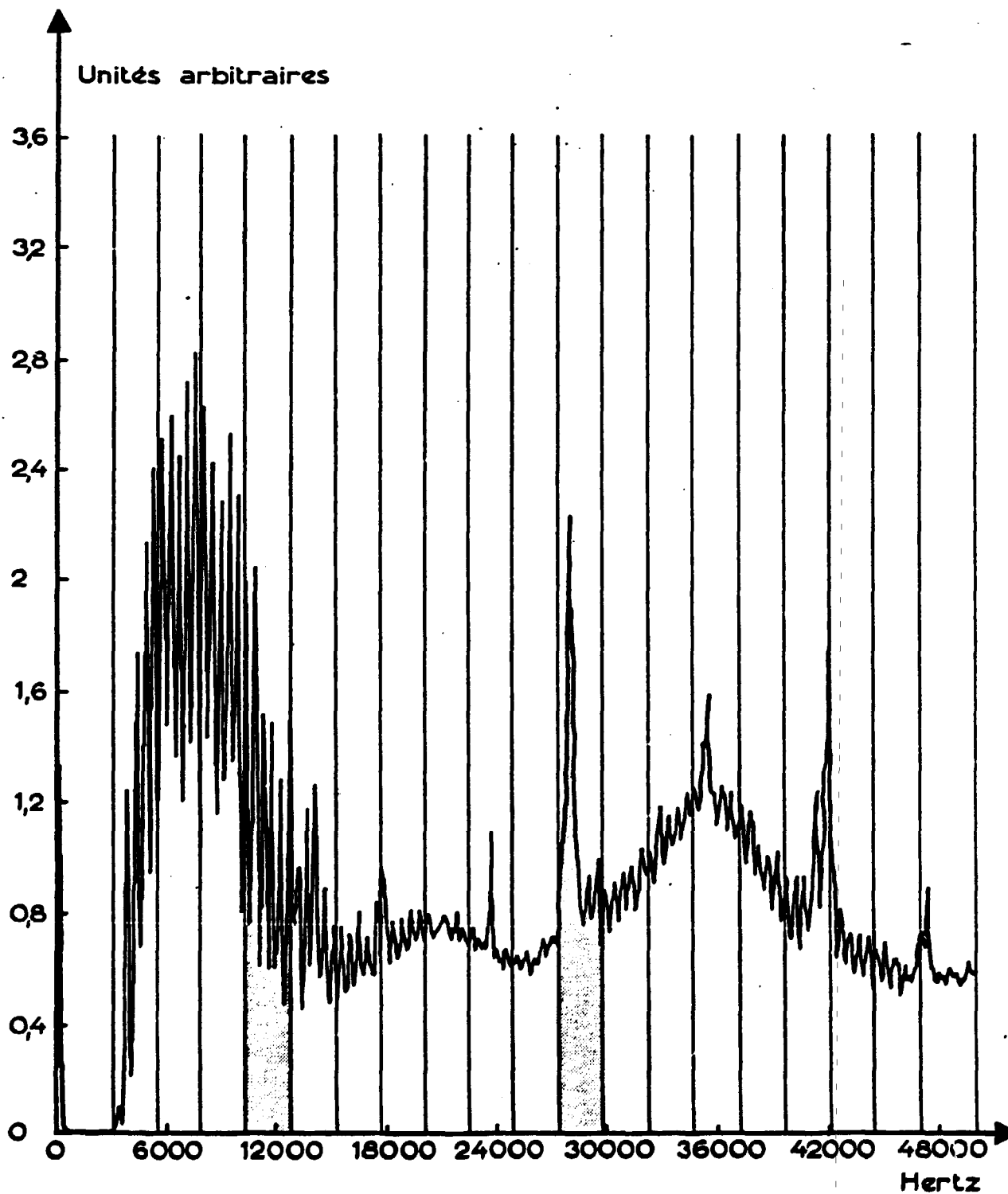
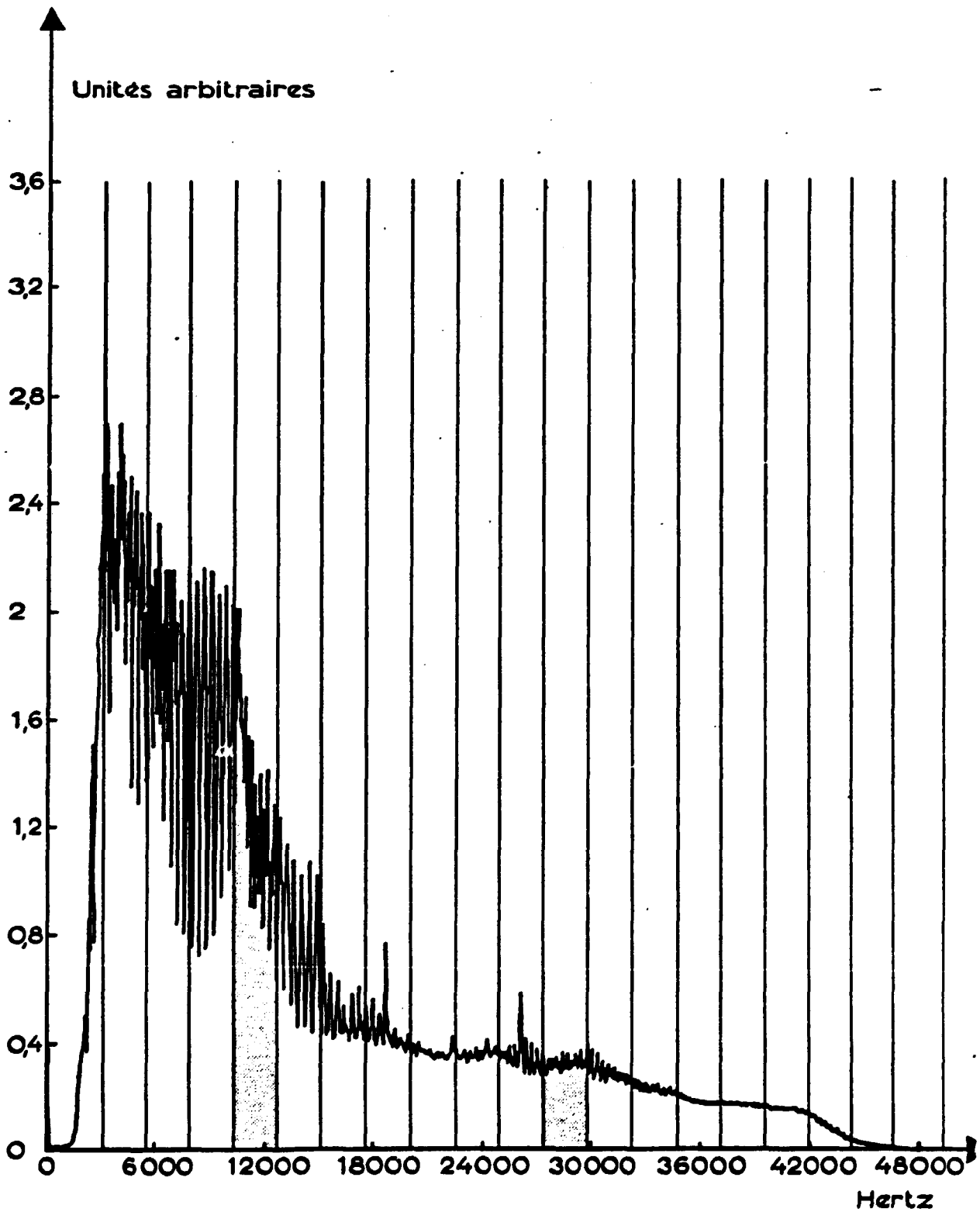


Fig. 6. SPECTRE DU SIFFLEUR DANS PHENIX
ET DECOUPAGE EN FREQUENCE



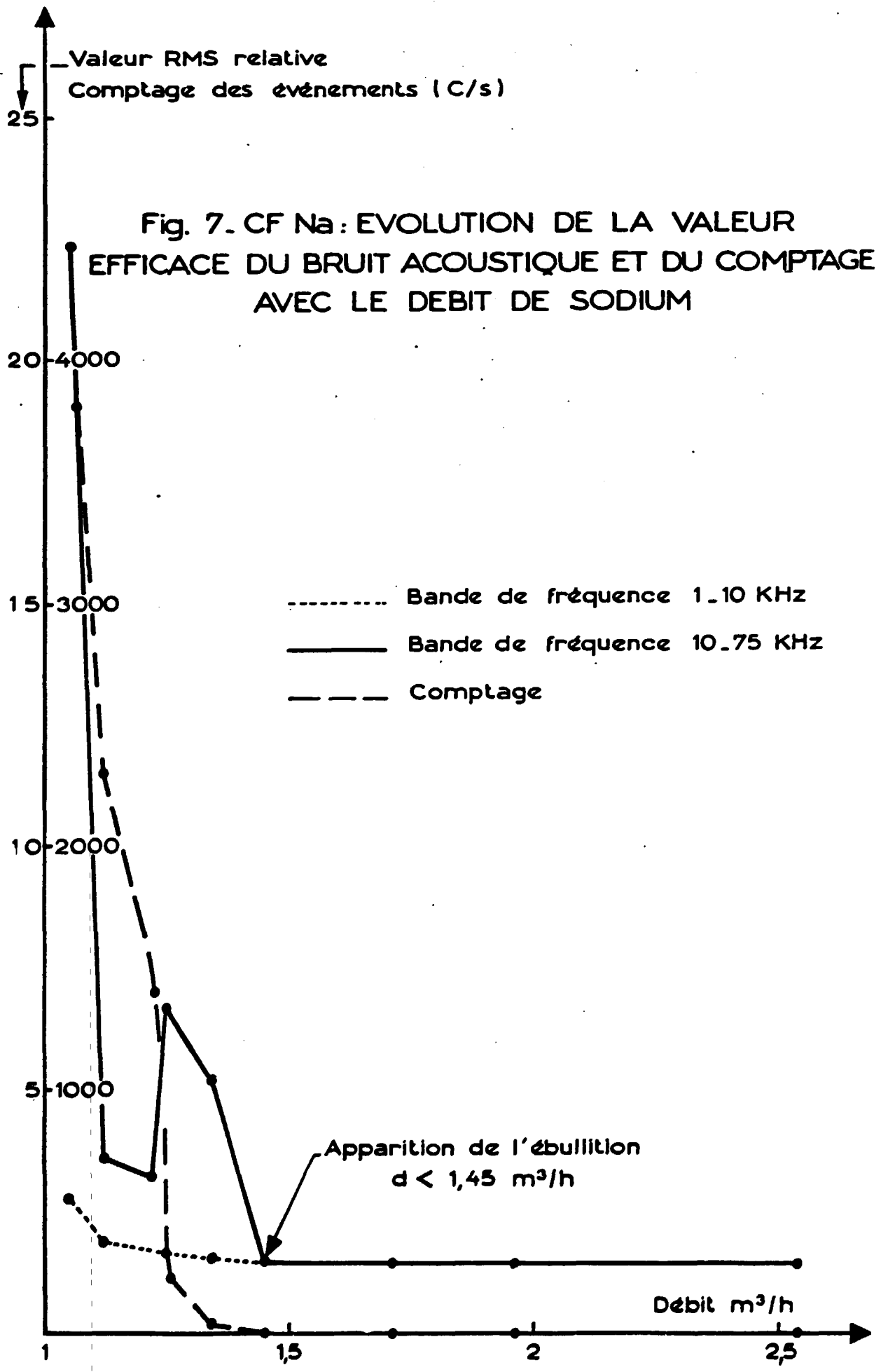
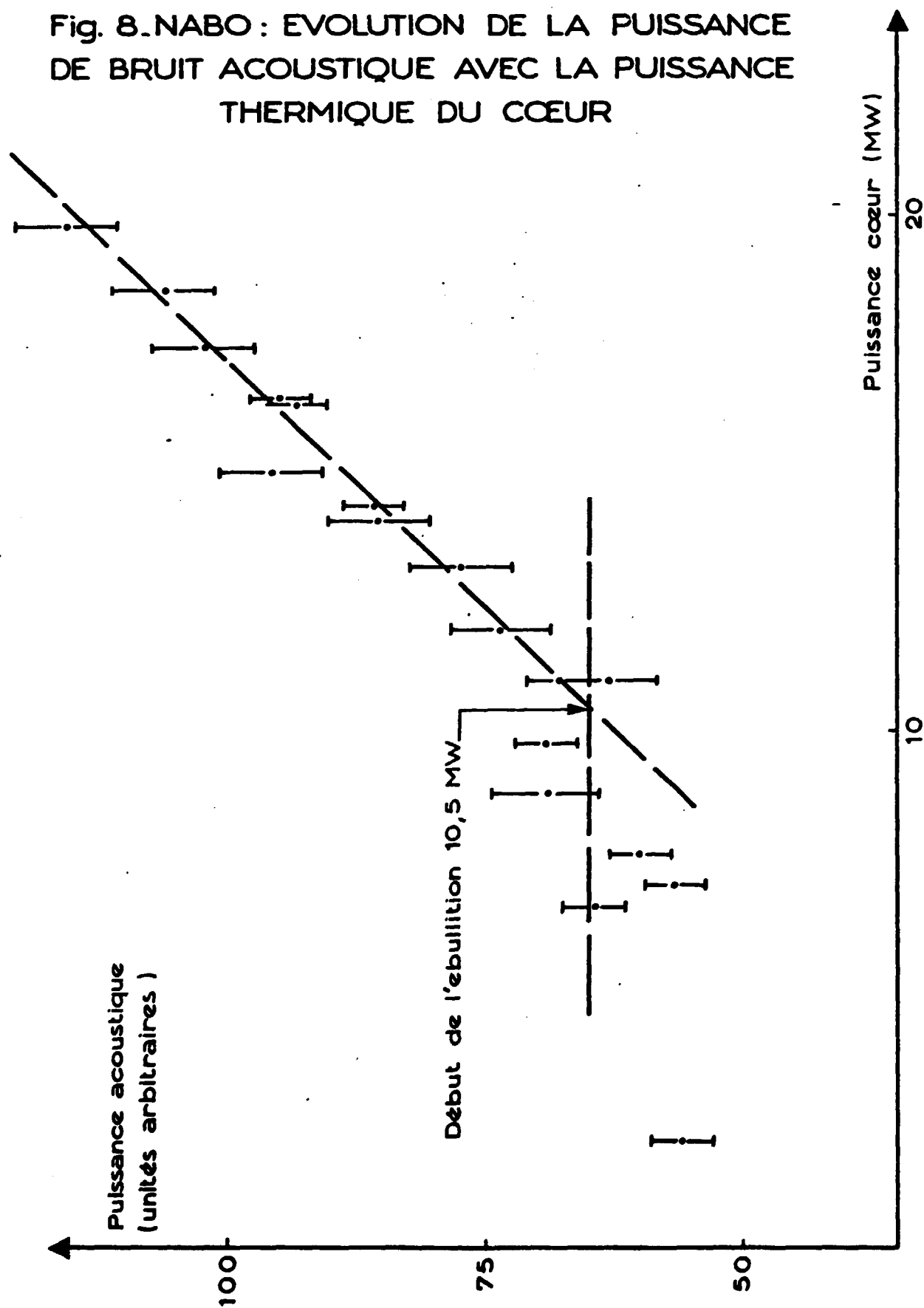


Fig. 7. CF Na: EVOLUTION DE LA VALEUR EFFICACE DU BRUIT ACOUSTIQUE ET DU COMPTAGE AVEC LE DEBIT DE SODIUM

Fig. 8. NABO : EVOLUTION DE LA PUISSANCE DE BRUIT ACOUSTIQUE AVEC LA PUISSANCE THERMIQUE DU COEUR



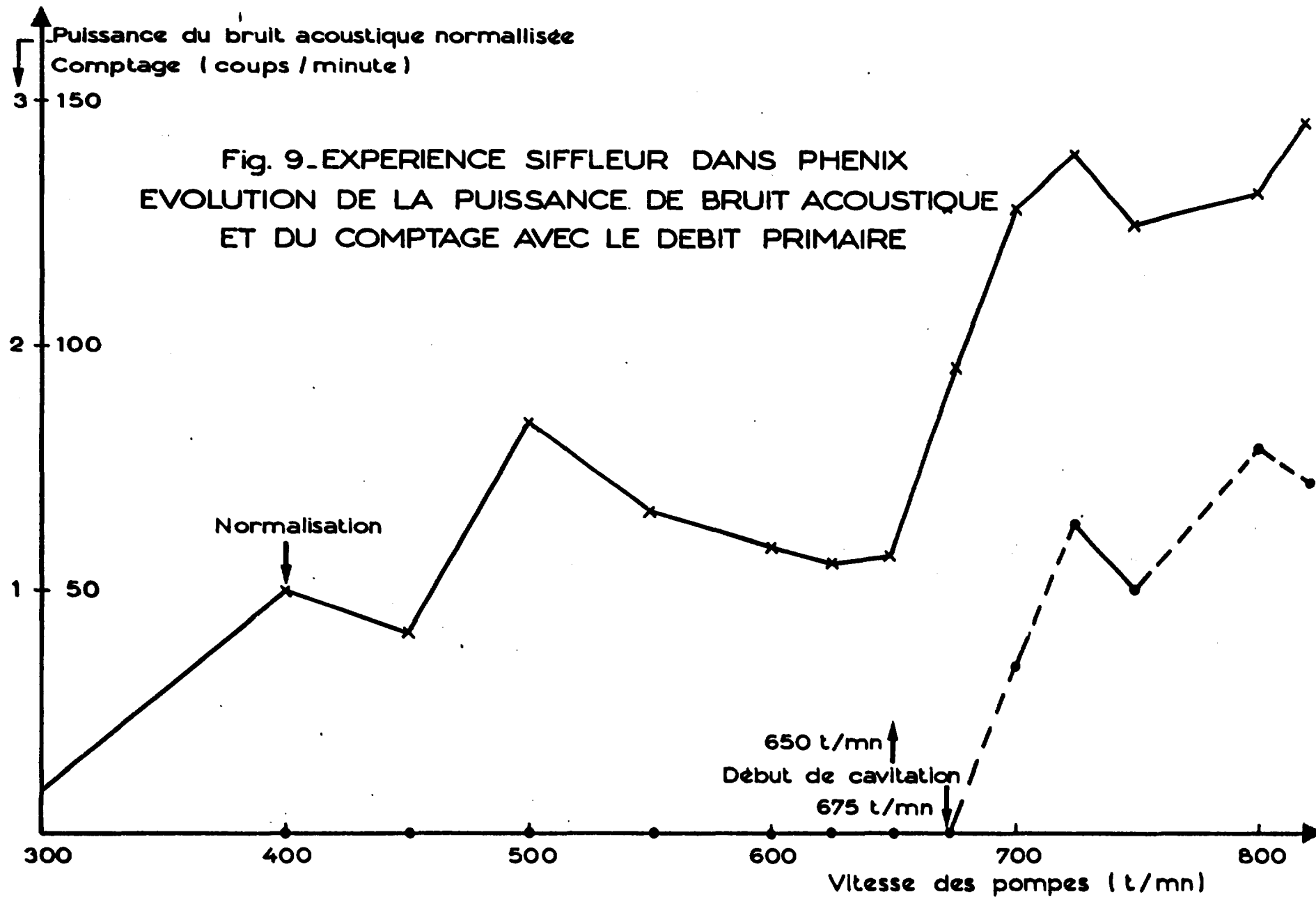


Fig. 10. DISCRIMINATION LINEAIRE
POUR L'EXPERIENCE NABO

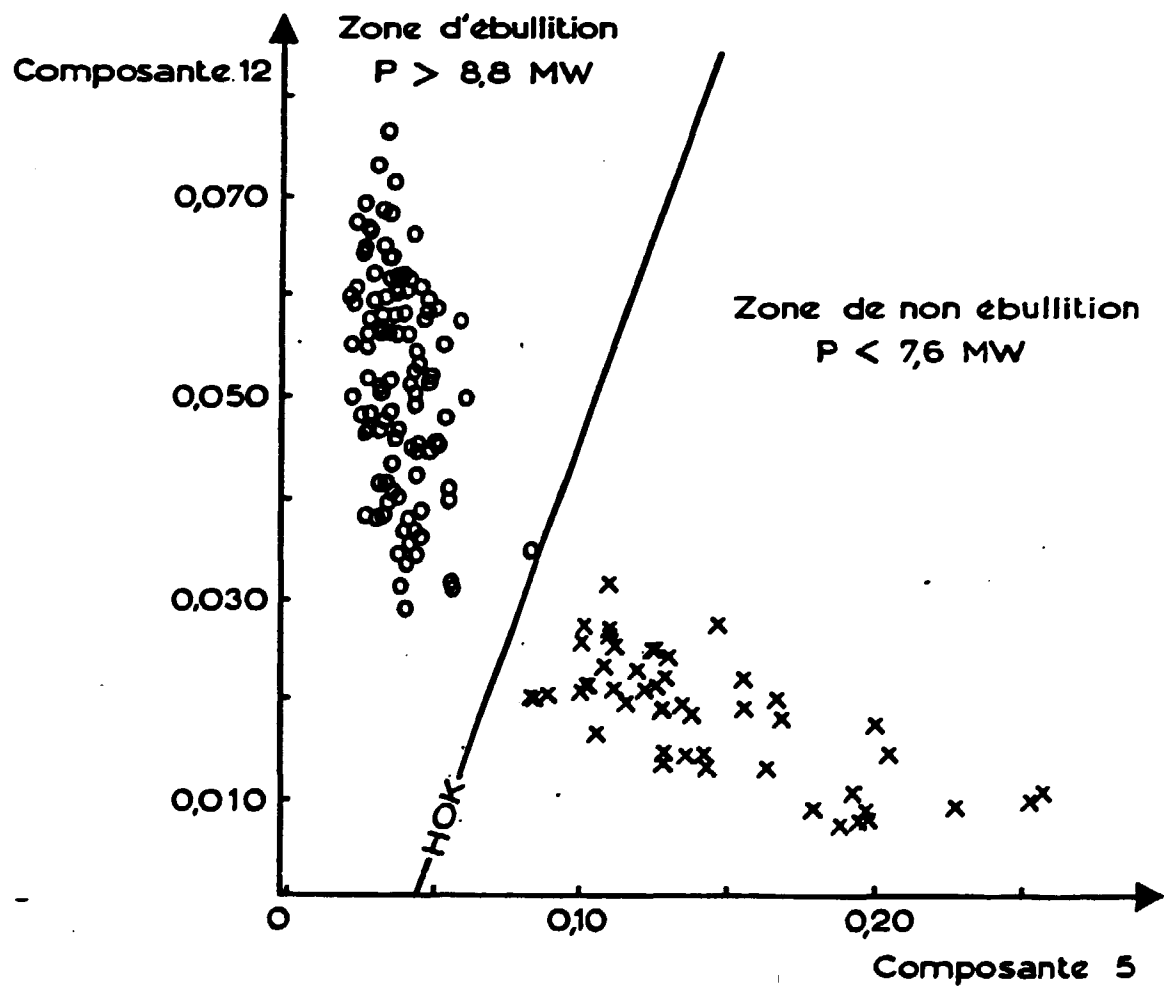


Fig. 11. DISCRIMINATION LINEAIRE
POUR L'EXPERIENCE SIFFLEUR

