

Michèle CASTELLENGO , Benoît FABRE , Eric VIVIE

ETUDE ACOUSTIQUE
POUR LA SITUATION D'UN NOUVEL ORGUE
A NOTRE-DAME DE PARIS

Contrat d'étude - Ministère de la Culture, Direction du Patrimoine.

Novembre 1987

PLAN DU TRAVAIL

1 - GENERALITES

- 1.1 Introduction.
- 1.2 Réflexions générales sur la situation des orgues dans les églises.
- 1.3 Les cathédrales de N.D. de Paris et N.D. de Chartres.
- 1.4 Etudes antérieures.

2 - ETUDE ACOUSTIQUE MENEES A NOTRE-DAME DE PARIS

- 1.1 Déroulement global de l'expérience.
- 1.2 Définition de la source.
- 1.3 Messages diffusés.
- 1.4 Emplacements de diffusion
- 1.5 Points de réception.
- 1.6 Expérience préliminaire à Chartres.

3 - TECHNIQUE ET MATERIEL DE MESURE

- 2.1 Signaux acoustiques émis.
- 2.2 Chaîne d'émission.
- 2.3 Chaîne de réception.

4 - DEPOUILLEMENT DES DOCUMENTS

- 4.1 Introduction
- 4.2 Mesures techniques effectuées

5 - PRINCIPES DES MESURES

- 5.1 Mesures spectrales
- 5.2 Mesures du temps de réverbération.
- 5.3 Mesures du temps de montée.
- 5.4 Niveau sonore global.

6 - VALIDITE DE L'EXPERIENCE

7 - PRESENTATION DES RESULTATS

- 7.1 Analyses spectrales
- 7.2 Temps de réverbération
- 7.3 Temps de montée.

8 - DEPOUILLEMENT DES QUESTIONNAIRES

9 - INTERPRETATION DES RESULTATS

10 - CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES.

1 - GENERALITES

1.1 INTRODUCTION

L'étude que nous avons menée à Notre-Dame de Paris a pour but d'examiner les conditions acoustiques favorables à l'implantation d'un nouvel orgue. Une telle étude soulève de nombreuses difficultés. En effet si nous disposons aujourd'hui de nombreux outils de mesure en acoustique leur interprétation est toujours aussi difficile puisque l'oreille, qui reste seul juge en dernier ressort est loin d'avoir une réponse aussi simple que celle de nos appareils. De plus, les auditeurs ont des modes d'écoute et des oreilles fort variables. L'expérience réalisée à Notre Dame de Paris nous l'a montré une fois de plus. (cf § 7.3)

Une deuxième difficulté provient du lieu lui-même, la cathédrale. Pratiquement toutes les études d'acoustique des salles qui ont été menées depuis les travaux de W.C. Sabine au début du siècle, et grâce auxquelles s'est constitué un corpus de données portent sur des salles de concert, des opéra, des auditoriums. Or, dans ces lieux l'auditeur reçoit une partie importante de sons provenant directement de la source mélangés aux réflexions sur les parois latérales le plafond, le sol. La situation est inversée dans une cathédrale où pratiquement l'organiste est la seule personne à entendre le son direct de son instrument. Au delà de 5 à 10 m, le champ sonore dans le vaisseau est un champ complexe réverbéré. On comprend donc que les méthodes de test doivent être repensées, et surtout que les critères de qualité issus de l'étude des autres lieux ne puissent être appliqués ici.

Enfin l'orgue est une source sonore très complexe en raison de l'étendue de son spectre, de sa puissance et de la multiplicité de ses points de rayonnement.

Toutes ces conditions nous ont amené à concevoir un protocole expérimental adapté au cas considéré, protocole que nous avons rôdé au préalable à la cathédrale de Chartres où se trouve un orgue situé en nid d'hirondelle dans la nef.

1.2 REFLEXIONS GENERALES SUR LA SITUATION DES ORGUES

Aucune étude systématique n'a été faite sur l'incidence acoustique de la situation des orgues dans les églises. Pourtant il n'est pas rare d'entendre des opinions tranchées sur le sujet, au cours d'une conversation ou dans la littérature. Du point de vue acoustique, la

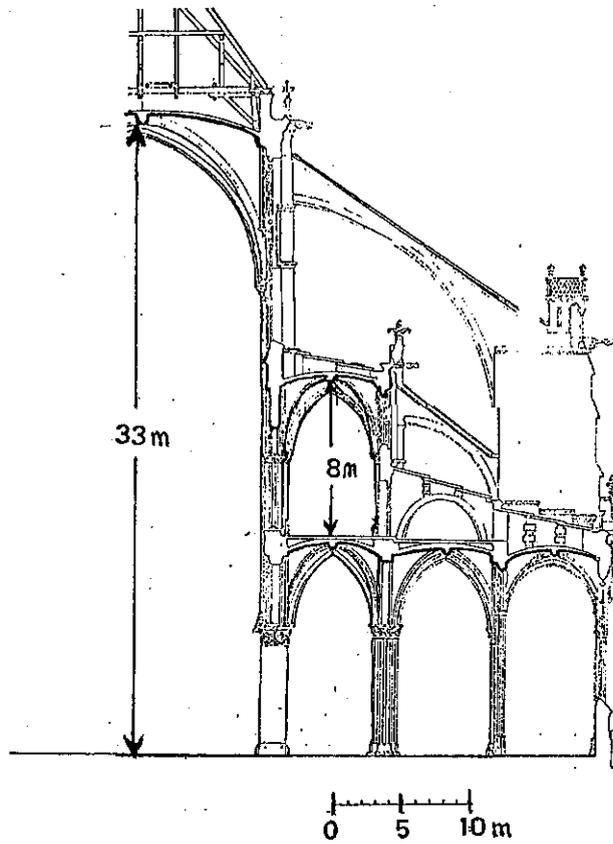
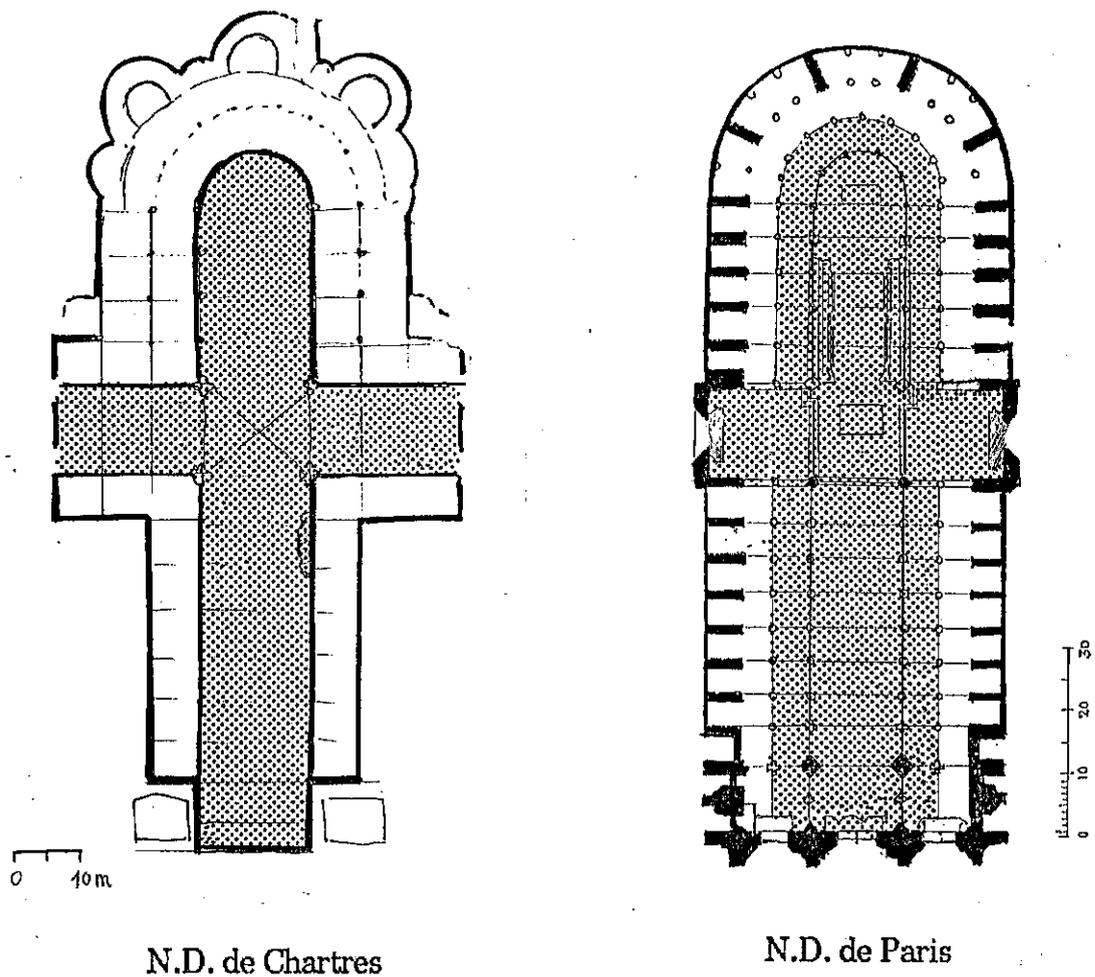


fig. 1 - Notre-Dame de Paris : Elévation.



N.D. de Chartres

N.D. de Paris

fig. 2 - Plan au sol et (en grisé) espace acoustique au niveau de l'orgue (env. 12 m au dessus du sol)

question qui se pose est celle du "couplage" de l'instrument avec le lieu dans lequel il émet, ce qui suppose que l'on connaît à la fois le mode de rayonnement de l'instrument et les caractéristiques acoustiques du local.

En ce qui concerne l'instrument intervient tout d'abord la composition architecturale de l'instrument :

- disposition en hauteur , en largeur, en profondeur
 - présence d'un buffet, avec ou sans fond, avec ou sans plafond,
 - positions relatives des différents sommiers,
- puis sa situation locale par rapport aux parois de l'édifice :
- hauteur au dessus du sol, sous la voûte, distance aux murs arrières et aux murs latéraux, recul par rapport à une tribune,
- et finalement la situation d'ensemble de l'instrument par rapport au plan général de l'édifice :
- centré dans l'axe principal : au début de la nef, au fond du chœur, au milieu de la nef,
 - dans un axe transversal : transept,
 - dans l'axe principal mais latéralisé : en nid d'hirondelle dans la nef , à la croisée du transept.

L'observation des orgues existant en France, mis à part les orgues de chœur plus petits et généralement à même le sol montre que la plupart des instruments sont posés sur une tribune, soit au fond de la nef soit au transept. Beaucoup d'instruments occupent totalement l'espace latéralement et vers l'arrière; quand aux plus petits d'entre eux ils ne sont guère éloignés du mur arrière (env. 5m). Enfin un petit nombre d'instruments plus anciens sont accrochés directement au mur "en nid d'hirondelle" dans la nef. Citons principalement Chartres, Metz, Aix en Provence, Strasbourg.

Or dans tous les cas qui nous sont connus l'orgue "en nid d'hirondelle" est plaqué contre le mur de l'édifice. Quand il y a un triforium celui-ci est très étroit (moins d'1mètre).

1.3 LES CATHEDRALES DE N.D. DE PARIS ET DE CHARTRES

Les deux édifices sont comparables en dimensions. A Paris et à Chartres nous trouvons respectivement :

longueur de la nef : 108 m et 110 m

largeur de la nef : 14 m et 17 m

hauteur de la nef : 33 m et 37 m

De plus la cathédrale N.D. de Chartres possède un orgue situé en nid d'hirondelle, à la 2ème travée, comme celui qui est envisagé à N.D. de

Paris. Il était donc intéressant de mener une première expérience à Chartres pour avoir un élément de comparaison (cf § 2.6) . Cependant il est rapidement apparu qu'une différence fondamentale séparait les deux édifices . En effet, au niveau de l'orgue N.D. de Paris ne possède pas un triforium mais une tribune (**fig.1**). En d'autres termes on trouve à Notre-Dame un volume acoustique important derrière l'orgue et en face de lui. Cette situation limite sérieusement les comparaisons acoustiques que l'on voudrait faire entre les deux cathédrales. (**fig. 2**).

1.4 ETUDES ANTERIEURES

La quasi totalité des travaux antérieurs rendent compte d'études faites dans des lieux dont l'acoustique est fort éloignée de celle d'une église. (studio d'enregistrement, salle de concert, opéra). Seuls les travaux remarquables de M. LEIPP auraient permis d'affiner nos conclusions en comparant nos résultats avec ceux qu'il a obtenus en d'autres lieux comme Souvigny ou St Pierre de la Villette. Cependant les dimensions de Notre-Dame de Paris et l'importance de l'orgue envisagé nous ont conduit à repenser le matériel de diffusion pour émettre des sons ayant la puissance, l'ampleur de rayonnement et l'étendue spectrale d'un orgue de 32 pieds. De plus il nous a semblé important de mener, parallèlement aux mesures des expériences d'écoute sur de la musique d'orgue.

2 - L'ETUDE ACOUSTIQUE MENEES A N.D. DE PARIS

2.1 DEROULEMENT GLOBAL DE L'EXPERIENCE.

Les grandes lignes de l'expérience sont les suivantes :

- mesures :

A partir du lieu choisi pour l'implantation de l'orgue nous émettons des signaux acoustiques connus et normalisés : bruit "rose" (contenant toutes les fréquences à part égale, avec la même quantité d'énergie par bandes d'octaves), clics etc. . . et nous enregistrons simultanément en divers points de la salle. La comparaison entre les signaux émis et ceux que l'on recueille permet de mesurer au point considéré les diverses distorsions que le son a subies entre le point de départ et le point d'arrivée. Ces distorsions affectent le mode d'établissement du son : temps de montée ("inertie "de Leipp), le mode d'extinction ou de cessation du son : réverbération ("trainage" de Leipp) et le contenu spectral du son : analyses spectrales ("densité" spectrale de Leipp)

En comparant entre elles les mesures effectuées aux divers points d'enregistrement on peut porter un avis sur l'homogénéité acoustique du lieu pour une position d'émission donnée.

Pour interpréter les mesures il était indispensable d'effectuer également des écoutes.

- écoutes :

A partir des trois points d'émission étudiés nous avons émis un enregistrement d'orgue d'une durée de 20 mn. Les auditeurs devaient, en se promenant dans l'édifice, noter, à des emplacements choisis, leurs impression auditives sur la qualité sonore . Malgré la diversité des modes d'écoute des sujets et la complexité du vocabulaire , le dépouillement des questionnaires a permis de fructueux rapprochements entre les résultats des mesures et l'avis des auditeurs.

2.2 DEFINITION DE LA SOURCE.

Un orgue n'est pas une source ponctuelle comme celles utilisées en acoustique classique mais plutôt un " volume résonant ".

C'est d'autre part l'instrument à la tessiture la plus étendue : les autres instruments de musique n'ont pratiquement pas d'énergie au dessous de 50 Hz alors que les tuyaux les plus graves de l'orgue (32') vont jusqu'à 20 Hz C'est aussi l'instrument acoustique le plus puissant : le niveau à la tribune peut atteindre 110 dB(A)!

Enfin, et là encore, contrairement à l'analyse classique où de nombreux critères sont indépendants de la position de la source, il nous a semblé capital de positionner notre source à l'emplacement même du futur buffet d'orgues.

Nous avons donc pris le parti de créer une source électro-acoustique (cf § 3.2) qui, dans les limites matérielles, pourrait s'approcher des caractéristiques acoustiques des orgues:

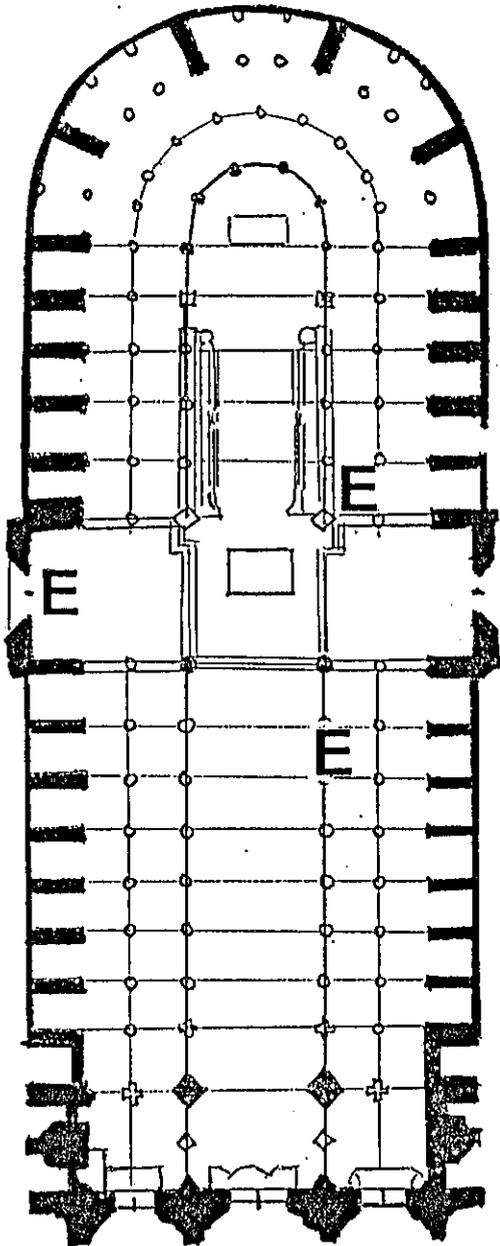
- Bande passante : de 20 Hz à 20000 Hz, la linéarité de la source n'étant pas le premier objectif.
- Puissance : pouvoir obtenir à 1 m, et ce sur toute la bande passante, des niveaux supérieurs à 105 dB(A).
- Directivité : rayonner sur une demi-sphère, et occuper, du moins frontalement, un espace de même grandeur que celui d'un orgue.

Afin de tenir compte de l'écran acoustique constitué par le futur buffet nous avons bouché complètement la deuxième arcade des tribunes et une partie des arcades latérales avec de lourdes tentures recouvertes d'un enduit lisse. La source électro-acoustique a été ensuite disposée devant ces tentures.

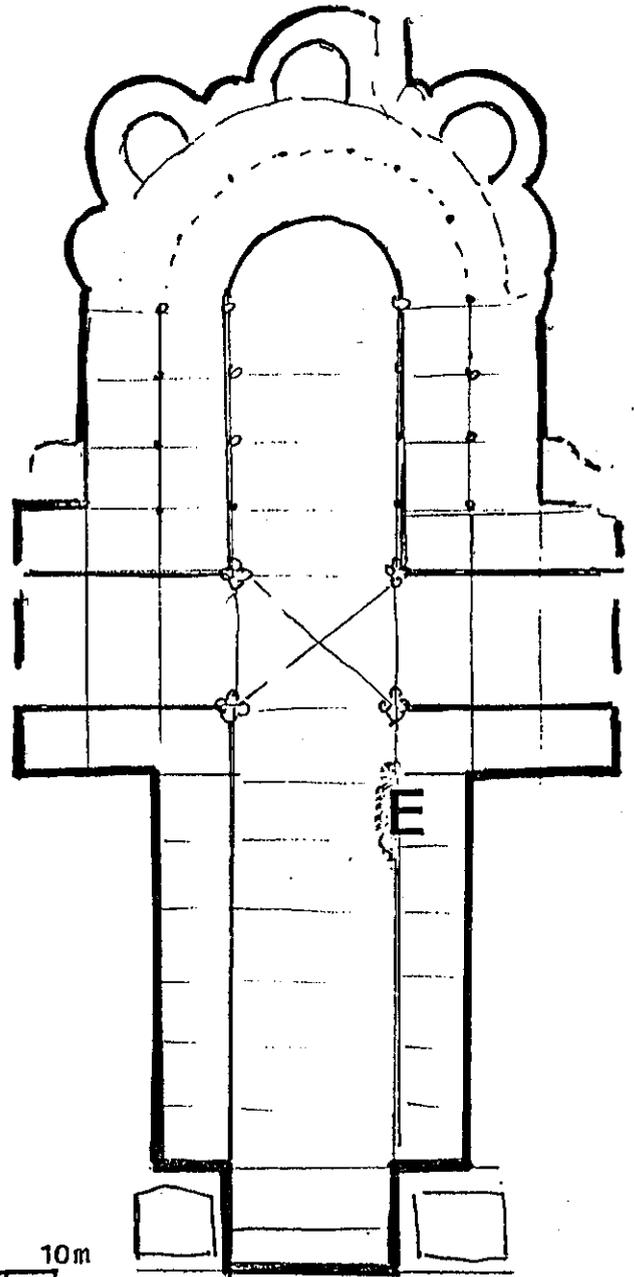
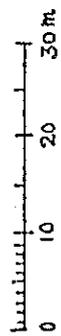
2.3 MESSAGES DIFFUSES.

Le fait de disposer d'une source pouvant "modéliser" (nous utilisons ce terme avec beaucoup d'humilité) l'orgue, nous a permis de diffuser deux types de messages:

- Des messages acoustiques normalisés en vue de l'analyse en laboratoire, comme les clics ou le bruit rose.
- Des messages musicaux constitués de sons d'orgue réels. Bien sûr, il n'était pas question d'enregistrer un orgue existant et de le rediffuser, l'acoustique du lieu d'enregistrement se superposant alors à celle de la cathédrale et rendant le message inutilisable. Il fallait donc se procurer des sons d'orgue enregistrés en champ libre (en chambre sourde), et pouvoir jouer avec. Ce travail ayant déjà été réalisé par une société fabricant un orgue numérique nous avons pu enregistrer, sur un instrument de qualité, diverses pièces pour orgue grâce à la collaboration de l'organiste Marc PINARDEL.



N.D. de Paris



N.D. de Chartres

fig. 3 et 4 - Position des points d'émission

2.4 EMBLEMES DE DIFFUSION.- cf fig.3

L'étude nous était demandée pour un emplacement donné de l'orgue :
- sur la facade sud de la nef, entre les 2 ème et 3 ème pilier.

Nous avons effectivement testé cette position, mais il nous a semblé utile, compte-tenu des implications esthétiques et des suggestions de représentants du clergé, de tester également deux autres positions:

- l'une située au dessus de la porte d'entrée nord du transept.

- l'autre située au niveau des tribunes, à la croisée du choeur et du transept sud.

2.5 POINTS DE RECEPTION.

Comme le prouve l'expérience pratique, la qualité d'écoute dans une salle dépendant de la position du point de réception, les messages diffusés ont été enregistrés, en vue de leur analyse et de leur dépouillement, en treize points de la cathédrale.

De plus, la possibilité de diffuser de la musique pour orgue nous a permis de réaliser des tests subjectifs sur un auditoire restreint de connaisseurs.

Nous ajouterons enfin, que pour des raisons matérielles aisément compréhensibles, il ne nous a pas été possible de mener cette campagne de mesures dans la cathédrale en présence du public; par contre, si il est certain que la présence du public modifierait certaines caractéristiques acoustiques de la cathédrale (temps de réverbération par exemple), les résultats qui nous semblent les plus importants tels que contenu spectral, caractéristiques temporelles, resteraient pratiquement inchangés car ils sont basés sur des comparaisons : si telle position est supérieure à telle autre sans public, elle le restera en présence du public.

2.6 . L'EXPERIENCE DE CHARTRES.

Avant de procéder aux mesures dans NOTRE-DAME de Paris, nous avons réalisé une campagne de mesures dans la cathédrale de CHARTRES, ceci dans un double but :

- Faire une répétition des mesures.
- Vérifier que les résultats obtenus avec la simulation étaient en bonne concordance avec la réalité, l'orgue de CHARTRES étant situé en " nid d'hirondelle ".

Pour ce faire, nous avons disposé nos sources électro-acoustiques entre les tuyaux de la facade du buffet et nous avons pu ainsi constater que les caractéristiques obtenues avec les sources électro-acoustiques à l'emplacement de l'orgue étaient similaires à celles obtenues en utilisant l'instrument comme source. (cf § 6)

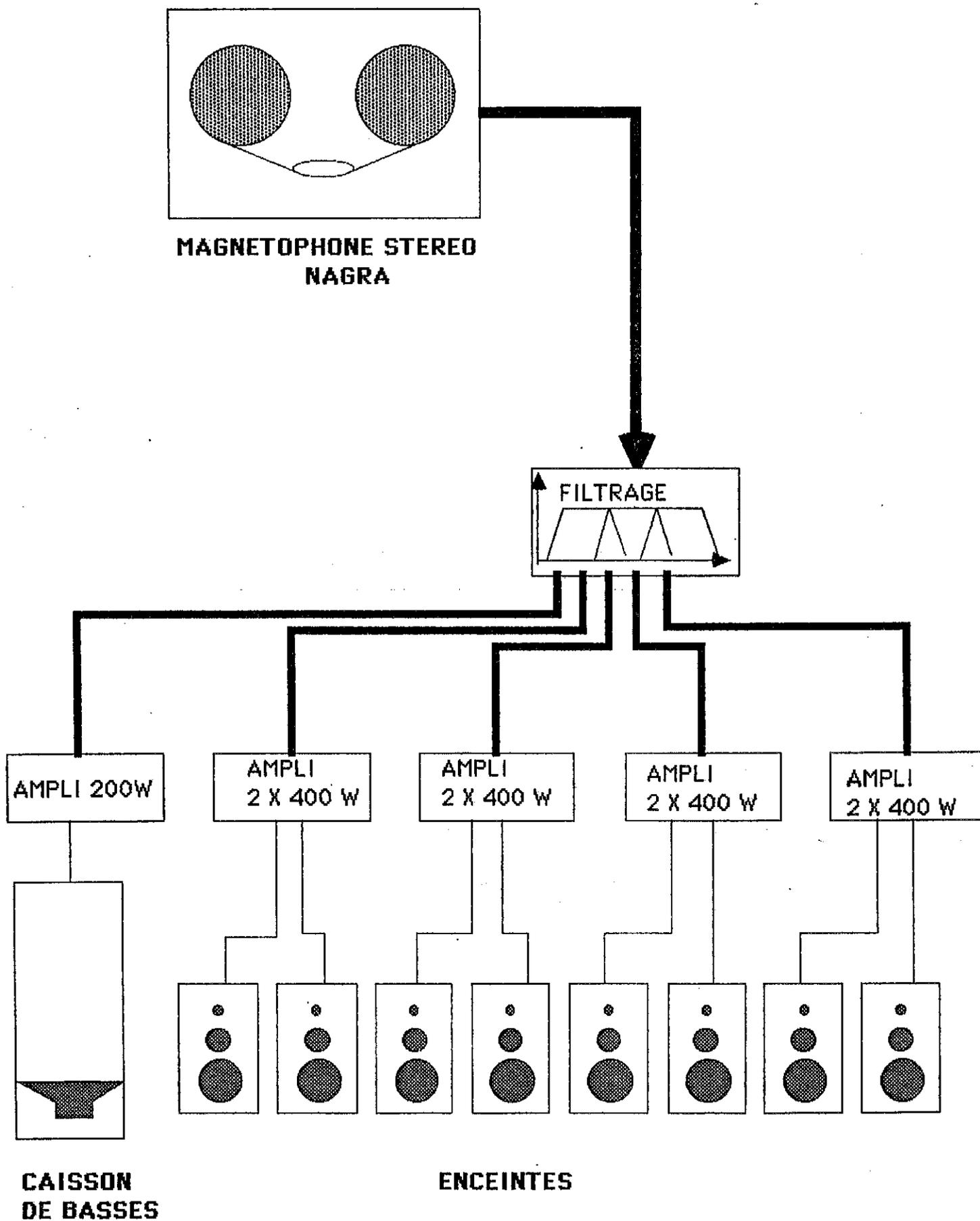


fig. 5 - Synoptique de la chaîne d'émission

3 - TECHNIQUE ET MATERIEL DE MESURE

On pourra se reporter aux diagrammes des **fig 5** et **6** .

3.1. SIGNAUX ACOUSTIQUES EMIS

Plusieurs sources ont été utilisées:

- Un générateur de bruit rose normalisé.
- des clics, de différentes fréquences.
- des parties d'œuvres pour orgue, jouées sur l'orgue numérique .

Pour simplifier les manipulations en cours d'expérience, tous ces signaux ont été enregistrés au préalable sur un magnétophone NAGRA.

3.2. CHAÎNE D'EMISSION.

La chaîne d'émission comprenait :

- 4 amplificateurs de puissance stéréo 2 X 400 W.
- 8 enceintes de marque ADELINÉ de type JENSEN couvrant la bande passante 50-16 kHz, à + ou - 2 dB.
- Un caisson de basse spécialement réalisé pour l'expérience, couvrant la bande passante 20-50 Hz.

3.3. CHAÎNE DE RECEPTION.

Les microphones de mesure 1/4" utilisés aux points de réception étaient raccordés à un magnétophone enregistreur TASCAM 16 pistes, dûment réglé et étalonné.

Un des microphones de mesure était situé devant l'ensemble d'émission, afin d'enregistrer un signal de référence, ne dépendant que peu de l'acoustique du lieu.

Certains paramètres, tels que niveaux sonores, contenu spectral, ont été mesurés et surveillés sur place à l'aide à l'aide d'un analyseur 1/3 d'octave temps réel, équipé d'un microphone de mesure 1/2".

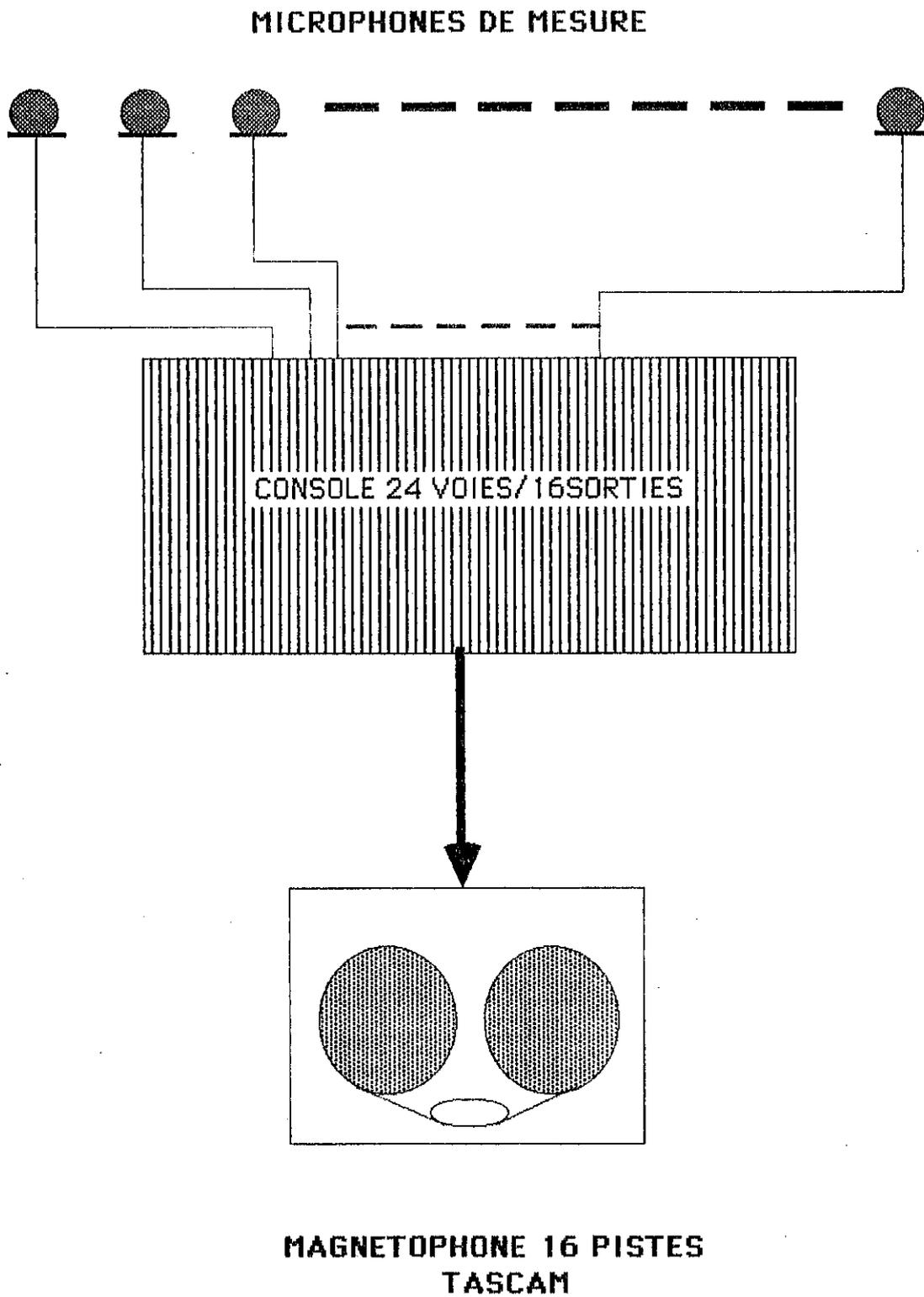
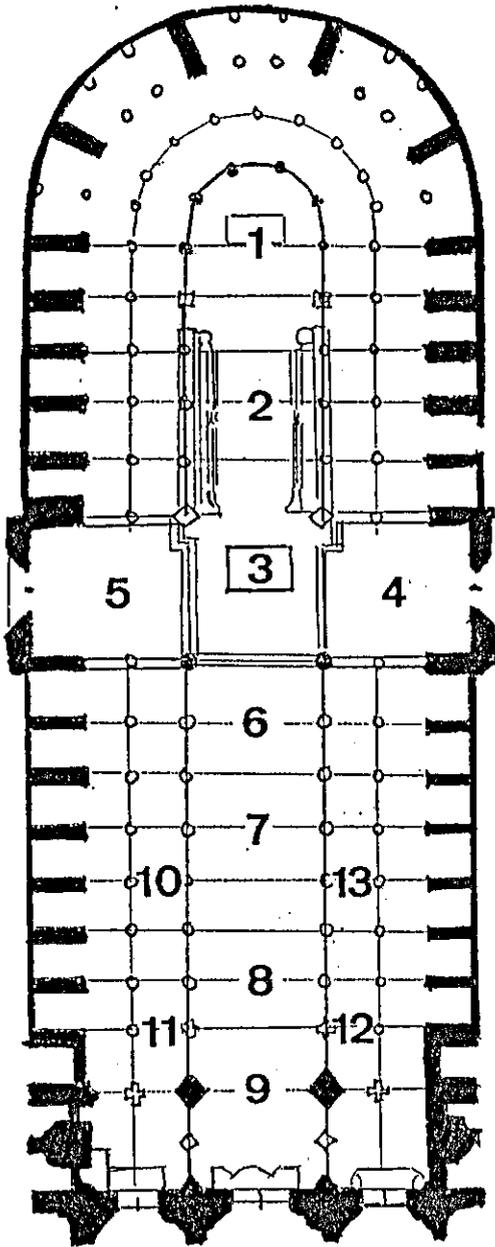
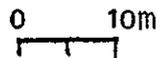
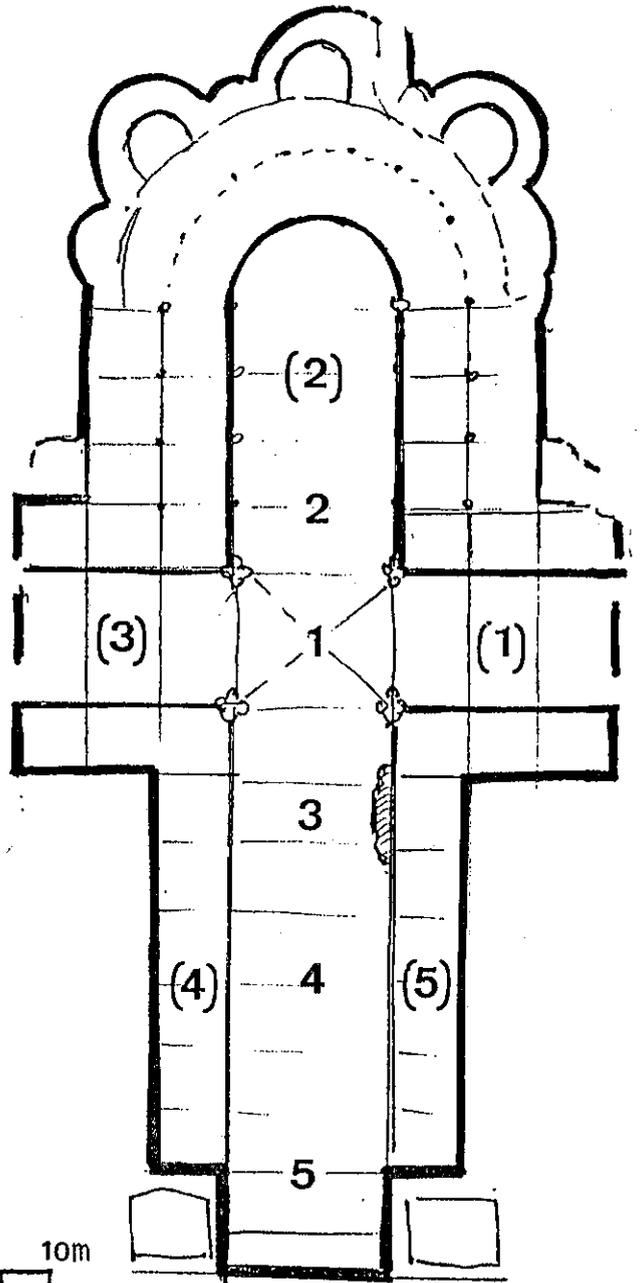
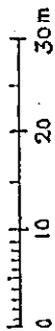


fig. 6 - Synoptique de la chaîne de réception



N.D. de Paris



N.D. de Chartres

fig. 7 et 8 - Position des microphones de réception

4 - DEPOUILLEMENT DES DOCUMENTS

4.1 INTRODUCTION

Les documents à partir desquels nous avons travaillé sont de deux types:

- une série d'environ 30 questionnaires remplis par les personnes présentes lors de l'expérience à Notre-Dame de Paris le 24 mars 1987.
- un enregistrement sur bande magnétique multipistes des expériences des 23 & 24 mars 1987.

On y trouve, pour chacune des positions d'émission étudiée, l'enregistrement de:

- *13 microphones répartis dans la cathédrale (**figure 7**)
- *1 microphone "de référence" placé devant le groupe d'enceintes simulant l'instrument
- *1 microphone d'annonces.

Les signaux enregistrés sont :

- *des signaux "tests": du bruit rose (signal aléatoire contenant la même quantité d'énergie dans toute bande de fréquence large d'une octave) et des "clics" (une période isolée d'un signal sinusoidal)
- *quelques extraits musicaux obtenus à partir de sons d'orgue échantillonnés enregistrés sans réverbération
- *des explosions de ballons.

Nous avons par ailleurs dépouillé l'enregistrement sur bande magnétique multipistes de l'expérience faite le 27 février 1987 en la cathédrale de Chartres. Cette expérience a permis de comparer le dispositif électroacoustique utilisé (le même qu'à Notre-Dame de Paris) à un instrument réel. En effet, les enceintes étaient placées juste devant l'orgue de la cathédrale de Chartres. (**figure 8**)

4.2 MESURES TECHNIQUES EFFECTUEES.

Après montage et copie des bandes multipistes, nous avons effectué les mesures suivantes :

- mesures spectrales : ces mesures ont pour but d'estimer en différents points la *coloration* du son apportée par la transmission du son dans la cathédrale entre une position d'émission et une position d'écoute données.

- mesures temporelles : elles sont de deux types. La mesure du temps de réverbération évalue *la manière dont le son s'éteint* en différents endroits de l'édifice. La mesure du temps de montée évalue *le temps que met le son à s'établir* en différents points de la cathédrale.

5 - PRINCIPE DES MESURES

5.1 MESURES SPECTRALES

Afin d'obtenir une estimation de la coloration apportée par la cathédrale, on s'intéresse à la différence entre le spectre (représentation de l'amplitude en fonction de la fréquence) du signal fourni par le microphone "de référence" et le spectre du signal fourni par le microphone placé à la position d'écoute étudiée. Différents modes d'analyses sont possibles : analyse en bandes de fréquences fine ou large.

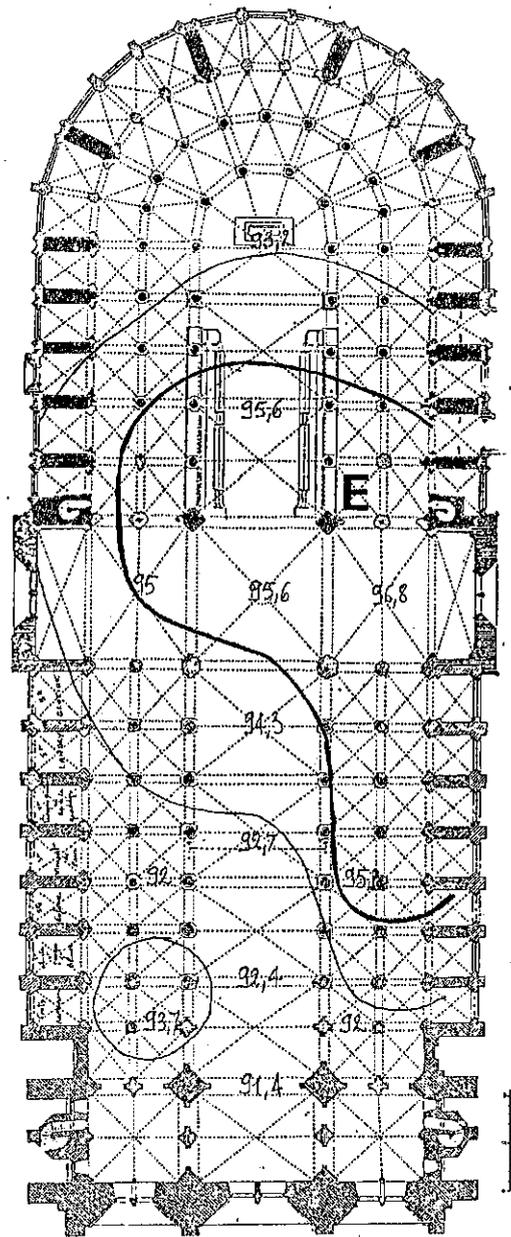
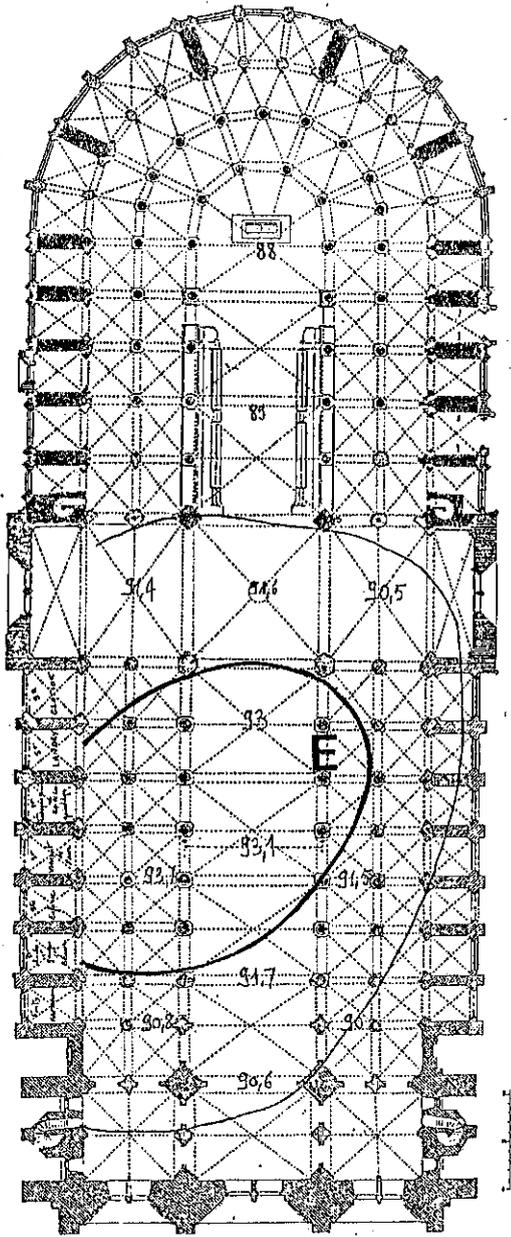
L'analyse en bande fine permet de mettre en évidence d'éventuels modes propres (résonance à une fréquence déterminée) ou tout autre phénomène très localisé en fréquence, mais elle ne permet pas une représentation globale de toute la plage des fréquences audibles.

L'analyse en bande large, un tiers d'octave ou une octave, permet aisément une représentation du spectre sur toute la plage des fréquences audibles mais ne donne aucun renseignement sur la répartition de l'énergie à l'intérieur d'une bande de fréquence.

Après avoir effectué quelques analyses en bande fine (cf **annexe I**) nous avons choisi d'effectuer l'ensemble des analyses spectrales en bande d'un tiers d'octave. Les courbes présentées en **annexe II** montrent, pour les trois positions d'émission étudiées, simultanément le spectre du signal fourni par le microphone de référence (trait pointillé) et le spectre du signal fourni par un des microphones placé dans la cathédrale (trait continu). Afin de s'affranchir des fluctuations temporelles inhérentes au signal utilisé pour effectuer cette mesure (bruit rose), chaque spectre représente une moyenne sur huit spectres calculés à différents instants pendant la durée d'émission du bruit rose. Pour chaque graphique, les niveaux moyens ont été modifiés pour permettre une meilleure lisibilité des écarts entre les deux courbes. Ces mesures ont été effectuées au L.N.E. sur calculateur Hewlett-Packard.

5.2 MESURES DU TEMPS DE REVERBERATION (TR)

Le temps de réverbération est défini comme étant le temps mis par le son pour chuter de 60 dB, c'est à dire le temps nécessaire à une diminution d'un facteur 1 000 000 de l'énergie sonore. Nous avons effectué cette mesure par bandes de tiers d'octaves, pour chacun des 13 microphones placés dans la cathédrale et pour chacune des trois positions d'émission étudiées. Ces mesures ont été effectuées au moyen d'un filtre tiers d'octave et d'un enregistreur logarithmique B &K. Les



——— 92 dB
 = = = 90

——— 95 dB
 = = = 93

fig. 9 - Courbes d'égal niveau sonore

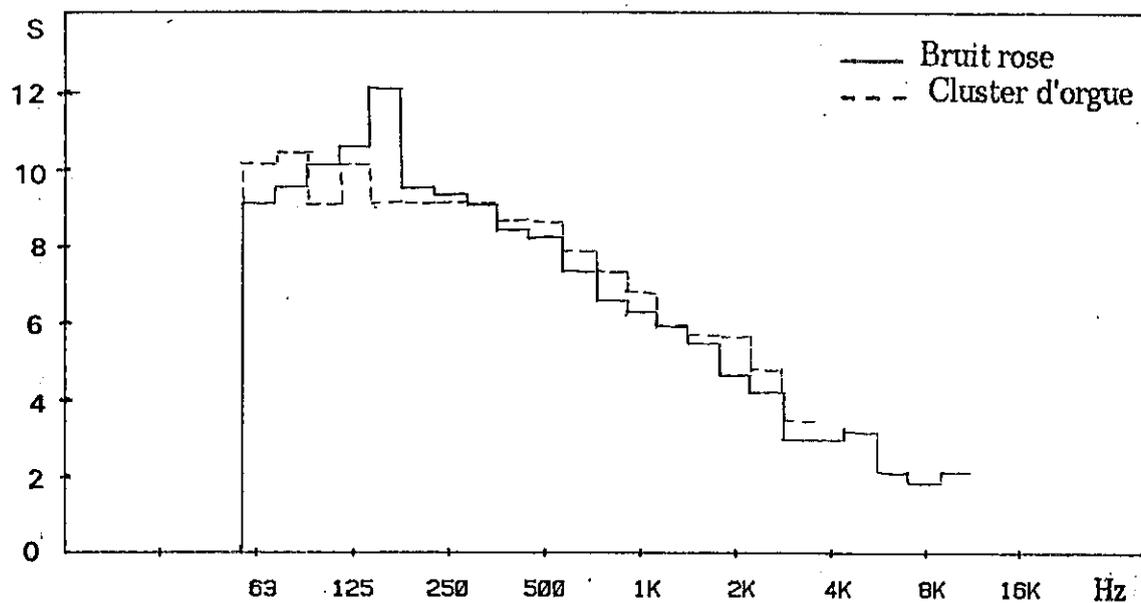
résultats sont présentés sous forme graphique (temps de réverbération en fonction de la fréquence) en **annexe III**.

5.3 MESURES DU TEMPS DE MONTEE (TM)

Le temps de montée est, par définition, le temps nécessaire pour que l'intensité du son atteigne la moitié de la valeur qu'elle prend en régime stationnaire. Nous avons mesuré le temps de montée pour chaque microphone et pour chaque position d'émission par bande d'octave . Pour cela, nous avons utilisé un filtre Krohn-Hite associé à un amplificateur de mesure B&K ainsi qu'un oscilloscope numérique Nicolet. Nous avons effectué, pour plus de précision, cette mesure à 50% de la valeur stationnaire du signal de pression. Il convient donc de multiplier les valeurs obtenues par un coefficient correctif de $\sqrt{2}$ pour obtenir les valeurs exactes (50 % de la valeur stationnaire en énergie). Les résultats sont présentés sous forme graphique (temps de montée en fonction de la fréquence) en **annexe IV** .

5.4 NIVEAU SONORE GLOBAL

Nous disposons aussi d'un relevé du niveau sonore global pour chaque position d'écoute étudiée, et ceci pour les émissions en nid d'hirondelle et à la croisée du transept. Ces mesures sont présentées **figure 9** sous forme de "cartes" des niveaux. Sur ces cartes, à partir de la connaissance que nous avons du niveau sonore en 13 points de la cathédrale, nous extrapolons des courbes reliant les points de même niveau. Cet artifice permet une présentation graphique des résultats. Il convient de noter cependant que cette mesure ne nous apporte rien de significatif *car les niveaux mesurés sont très voisins* . Ceci est dû au fait que le lieu étudié est très réverbérant.

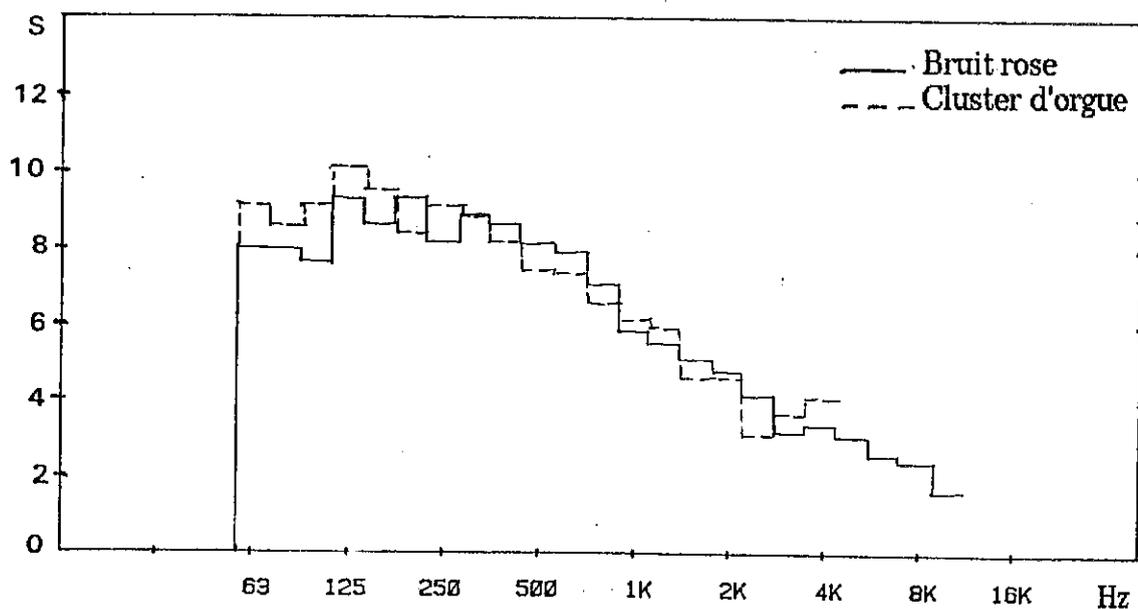


Notre-Dame de Chartres

Février 1987

Emission : TRIBUNE D'ORGUE

Micro : 1



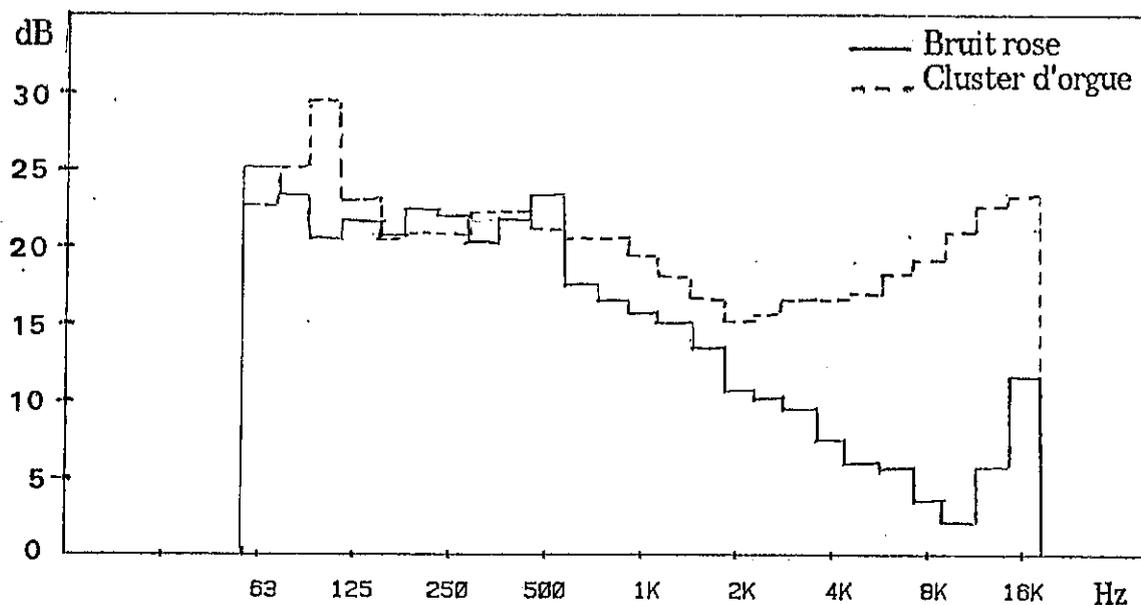
Notre-Dame de Chartres

Février 1987

Emission : TRIBUNE D'ORGUE

Micro : 5

fig. 10 - Comparaison entre les mesures de réverbération effectuées sur du bruit rose et sur un cluster d'orgue, à la cathédrale de Chartres.

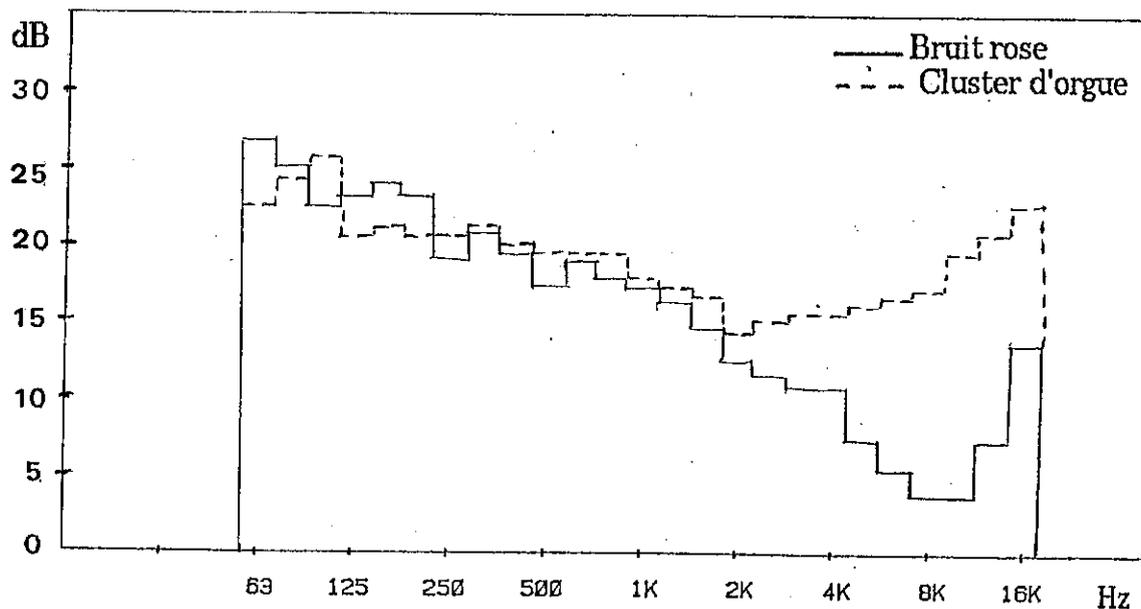


Notre-Dame de Chartres

Février 1987

Emission : TRIBUNE D'ORGUE

Micro : 1



Notre-Dame de Chartres

Février 1987

Emission : TRIBUNE D'ORGUE

Micro : 5

fig. 11 - Comparaison entre les mesures spectrales effectuées sur du bruit rose et sur un cluster d'orgue, à la cathédrale de Chartres.

6 - VALIDITE DE L'EXPERIENCE

Grâce à l'enregistrement effectué en la cathédrale de Chartres, nous pouvons comparer les mesures faites avec le dispositif électroacoustique utilisé avec celles faites à partir d'un cluster joué sur l'orgue de la cathédrale de Chartres.

Nous avons représenté **figure 10** les courbes de réverbération en fonction de la fréquence pour les deux sources à comparer (orgue et dispositif électroacoustique) aux microphones 1 et 5. On constate sur ces courbes que, pour les deux positions d'écoute étudiées, les mesures faites avec les deux sources sont très semblables.

En ce qui concerne la coloration spectrale, on trouvera **figure 11** les courbes représentant, pour les deux sources à comparer et aux mêmes positions d'écoute que précédemment, l'écart entre le spectre du signal fourni par le microphone de référence (placé devant l'orgue et les enceintes acoustiques) et celui du signal fourni par le microphone étudié. On peut voir sur ces courbes un écart qui semble être systématique entre les mesures effectuées avec les deux sources. Cet écart pourrait provenir des différences fondamentales qui peuvent exister entre le rayonnement d'un tuyau d'orgue et celui d'une enceinte. Nous verrons ci-après comment nous pouvons nous affranchir d'un tel biais.

Nous n'avons pas pu comparer les temps de montée des deux sources car les temps mesurés sont, dans certaines bandes de fréquences, proches du temps que mettent certains tuyaux d'orgue à parler après que la touche correspondante ait été enfoncée. Par ailleurs des difficultés d'alimentation (réservoir) de l'orgue rendaient toute mesure impossible sur l'attaque du cluster enregistré

7 - PRESENTATION DES RESULTATS

7.1 ANALYSES SPECTRALES.

Les spectres en tiers d'octave tels qu'ils sont présentés en annexe sont difficilement interprétables. C'est pourquoi nous avons été amenés, pour aboutir à une représentation plus aisément interprétable, à nous intéresser non plus au spectre lui-même, ni à la différence entre spectre émis (microphone de référence) et spectre reçu (microphone placé dans une position d'écoute), mais à l'"écart à la moyenne". Pour obtenir cette mesure on calcule, pour chaque position d'émission, une moyenne M (sur tous les microphones) des différences d'intensité DI entre spectre émis et spectre reçu dans chaque bande de fréquence; puis on exprime pour chaque microphone l'écart de DI à cette moyenne. *Nous obtenons donc une courbe d'"écart à la moyenne" par microphone et par position d'émission.*

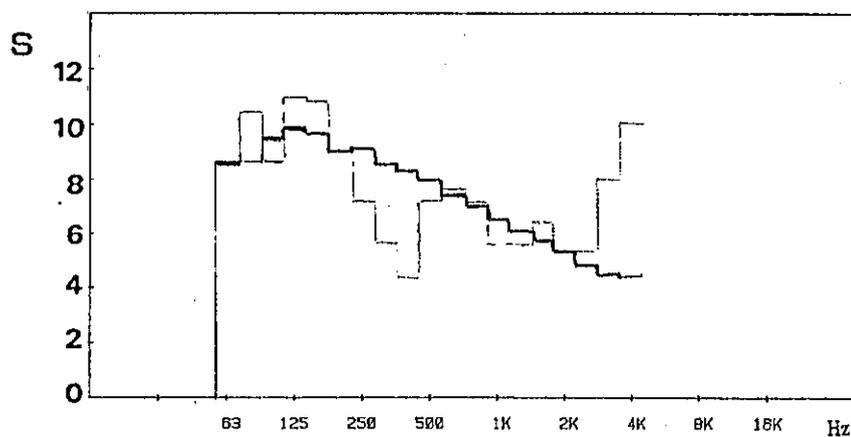
Cette méthode permet de présenter uniquement les différences entre les spectres des signaux fournis par les différents microphones en s'affranchissant de toute erreur. Ces erreurs peuvent être dues à des interférences entre les ondes sonores provenant des différentes enceintes acoustiques, à des différences de rayonnement comme nous avons pu le constater dans les mesures à Chartres ou à tout autre phénomène linéaire se produisant au niveau du micro de référence. Il faut insister sur le fait que *les résultats obtenus n'ont de valeur que relativement les uns par rapport aux autres , pour une même position d'émission .*

Ces résultats sont présentés sous forme graphique pour les positions d'écoute 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 et 11 en **annexe V**.

Comparons les résultats obtenus pour les différentes positions d'émission:

- émission transept Nord

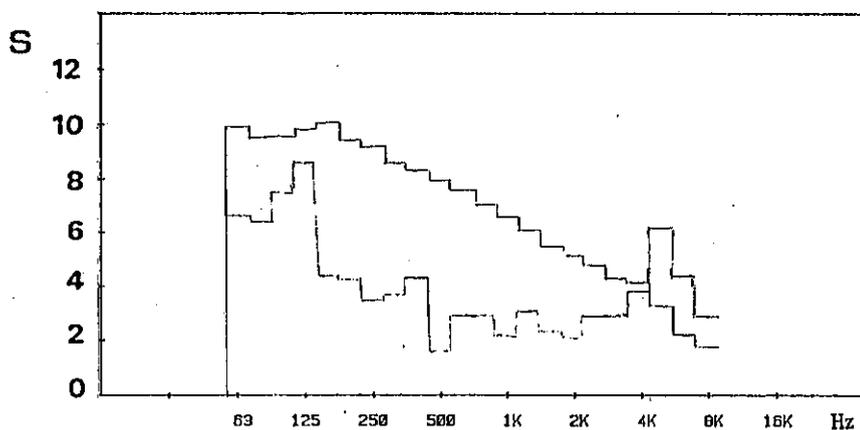
l'ensemble des courbes montre une très forte inhomogénéité entre les positions d'écoute considérées: on trouve des écarts pouvant aller de +15dB (position 4) à -5dB (position 8) dans les aigus (6kHz à 16kHz) .On peut interpréter ces inhomogénéités comme traduisant une coloration très différente du son selon les positions d'écoute.



Notre-Dame de Paris

23&24 Mars 1987

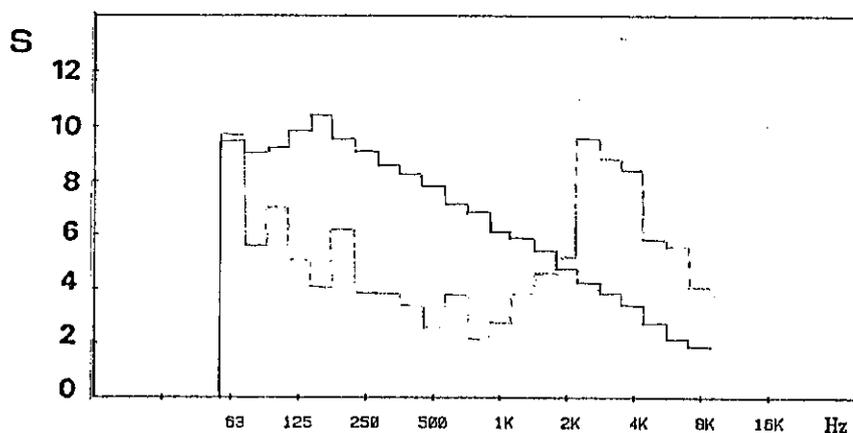
Emission : TRANSEPT



Notre-Dame de Paris

23&24 Mars 1987

Emission : CROISEE



Notre-Dame de Paris

23&24 Mars 1987

Emission : NID

— Moyenne sur tous les micros

- - - Ecart quadratique moyen

fig. 12 - Mesure du temps de réverbération : moyenne sur tous les micros et écart quadratique moyen

- émission en nid d'hirondelle

Les différences sont beaucoup moins marquées que pour l'émission au transept. On peut noter cependant une chute assez importante des aigus à l'avant du chœur (partie où le public ne pénètre pas).

- émission à la croisée du transept

L'ensemble est aussi assez homogène. Les aigus chutent moins dans le chœur que pour l'émission en nid d'hirondelle mais chutent légèrement dans la partie Nord-Ouest (position 8 et 11).

7.2 TEMPS DE REVERBERATION.

L'ensemble des mesures de temps de réverbération est présenté en **annexe III**. L'allure générale des courbes représentant le temps de réverbération en fonction de la fréquence est la même pour toutes les courbes : le temps de réverbération diminue assez régulièrement du grave à l'aigu, passant de 12s à 125 Hz à 2s à 16 kHz. Il diminue aussi dans l'extrême grave (en dessous de 125 Hz).

Ici aussi nous avons cherché à évaluer l'homogénéité. Pour cela nous avons calculé pour chaque bande de fréquence la moyenne des temps de réverbération mesurés aux différents microphones. Nous avons ainsi obtenu une courbe moyenne de temps de réverbération en fonction de la fréquence et ceci pour chaque position d'émission . Enfin, pour estimer l'homogénéité pour chaque position d'émission, nous avons calculé l'écart quadratique moyen dans chaque bande de fréquence. L'écart quadratique moyen est défini dans chaque bande de fréquence comme étant la racine carrée de la moyenne des carrés des écarts des courbes à la valeur moyenne précédemment calculée. *L'écart quadratique moyen caractérise donc la dispersion des mesures autour de la valeur moyenne* . Les moyennes et écarts quadratiques moyens dans chaque bande de fréquence et pour chaque position d'émission sont présentés graphiquement **figure 12**.

On constate que , pour les trois positions d'émission, les moyennes sont peu différentes les unes des autres (on retrouve bien l'allure générale précédemment citée). Par contre les écarts quadratiques moyens montrent une plus grande homogénéité pour l'émission à la croisée du transept que pour les autres positions d'émission. L'émission depuis le transept Nord est de loin celle qui induit des temps de réverbération les plus variés suivant la position d'écoute.

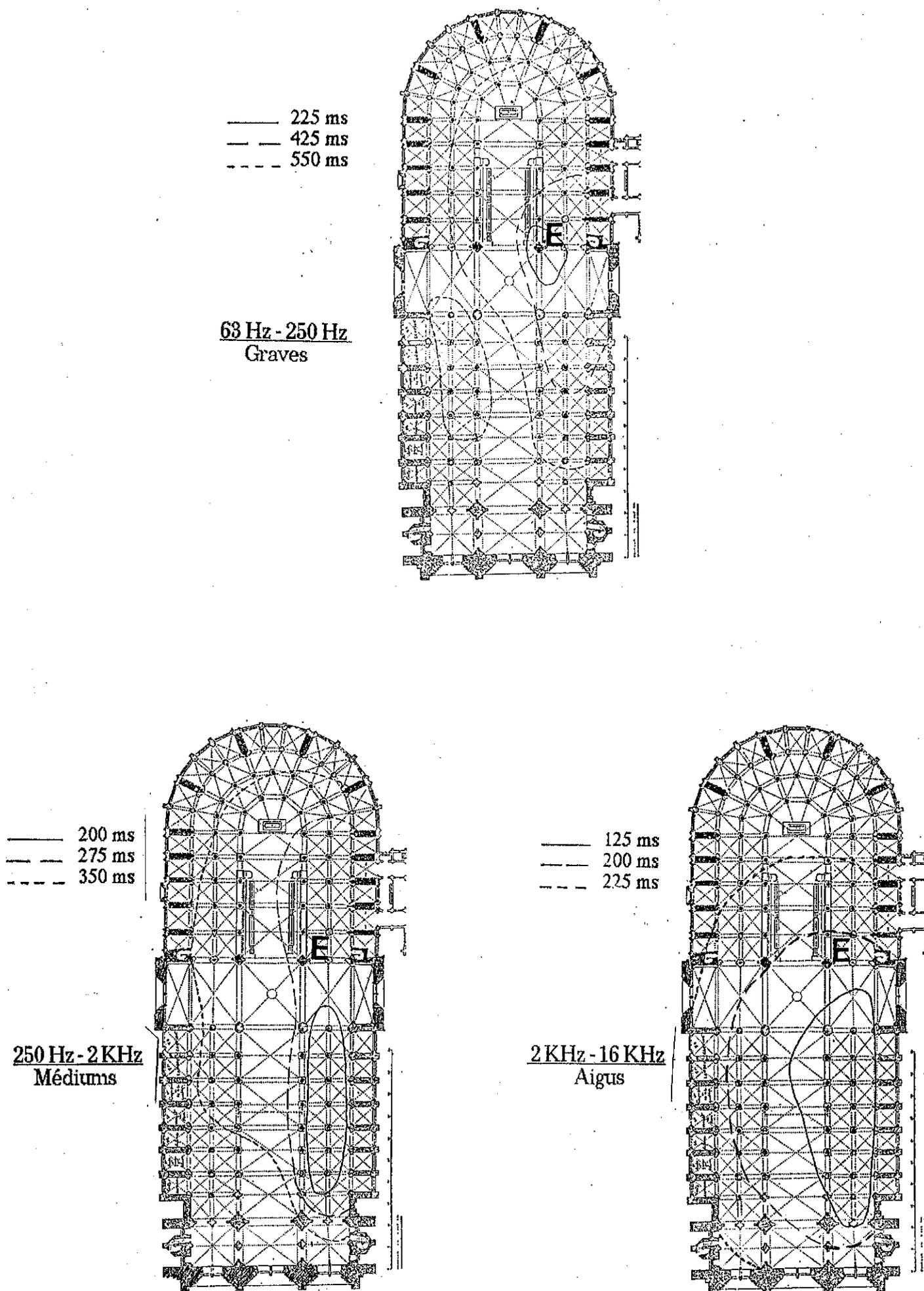


fig. 13 - Cartes des temps de montée ; émission : Croisée

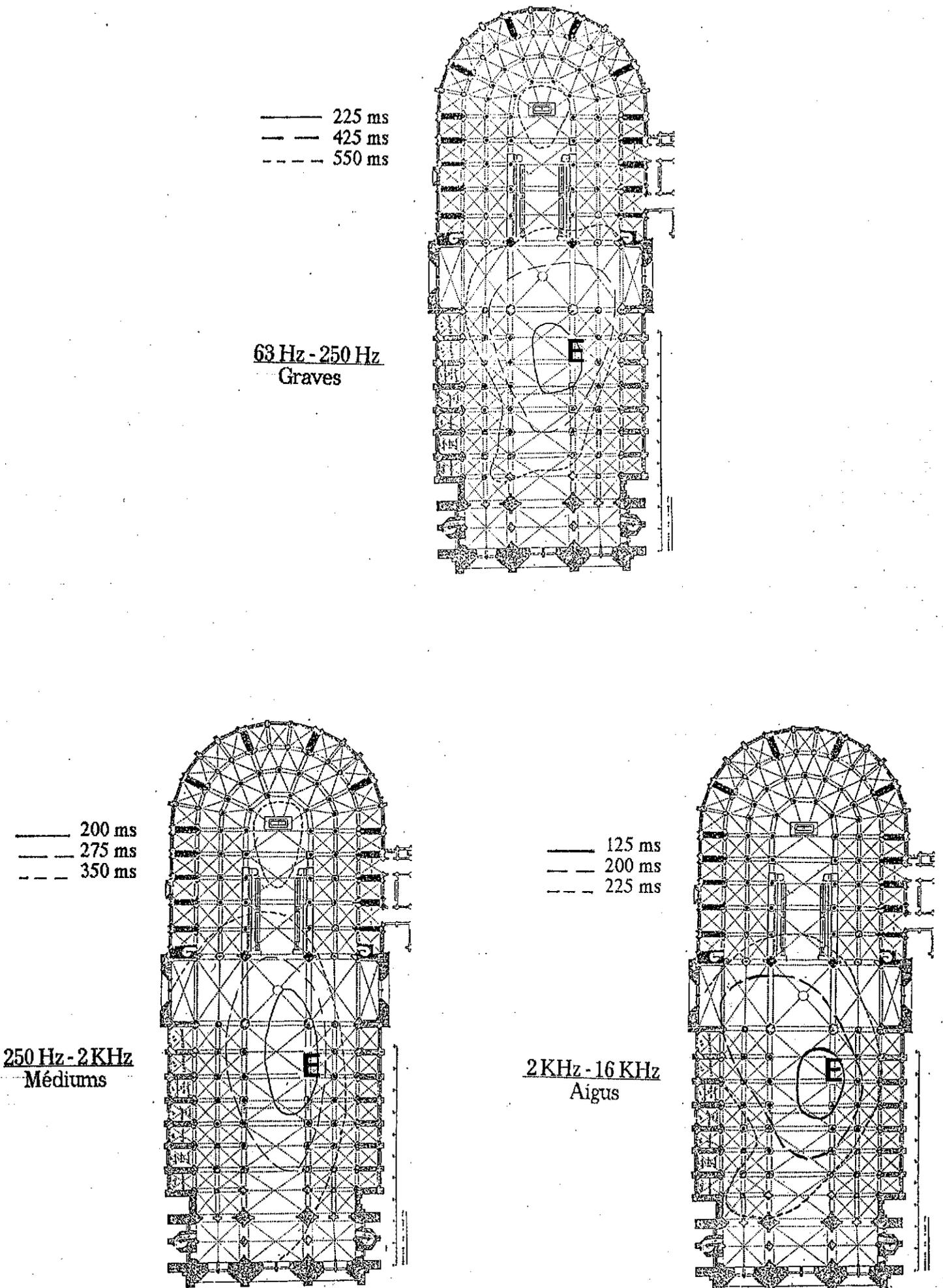


fig. 14 - Cartes des temps de montée ; émission : Nid

7.3 TEMPS DE MONTEE.

Les mesures de temps de montée ont été regroupées de manière synthétique sur des "cartes" des temps de montée **figures 13** et **14**. Pour établir ces cartes nous avons procédé, comme pour les "cartes" des niveaux, par extrapolation. Nous avons, à partir des mesures effectuées en un nombre nécessairement limité de points, extrapolé des courbes reliant tous les points ayant même temps de montée.

Pour cela nous avons divisé le spectre des fréquences audibles en trois bandes de fréquences qui correspondent approximativement au grave au médium et à l'aigu: 63 Hz à 250 Hz; 250 Hz à 2 kHz et 2 kHz à 16 kHz (le temps de montée retenu est, pour chaque bande de fréquence ainsi définie, la moyenne des valeurs mesurées pour les deux ou trois bandes d'octave correspondantes). Nous obtenons alors, pour chaque position d'émission, trois "cartes" (une par bande de fréquence) présentées **figures 13** et **14**. Nous ne nous sommes intéressés qu'aux positions d'émission en nid d'hirondelle et à la croisée du transept, l'émission depuis le transept Nord s'étant avérée la moins bonne à l'étude des temps de réverbération et des spectres.

On trouvera **figure 14** les trois cartes des temps de montée relatives à l'émission en nid d'hirondelle et **figure 13** les trois cartes relatives à l'émission à la croisée du transept.

Comparons, pour chacune des trois bandes de fréquence, les deux positions d'émission:

63 Hz à 250 Hz (graves)

*émission en nid d'hirondelle: le temps de montée varie beaucoup à l'intérieur de la nef (190 ms à 660 ms); par contre il varie assez peu dans le transept (350 ms à 480 ms)

*émission à la croisée: on trouve la situation inverse, le temps de montée varie peu dans la nef et beaucoup dans le transept.

Par ailleurs, la zone comprise entre les courbes 225 ms et 425 ms est moins susceptible d'être occupée par des auditeurs dans la position "croisée" que dans la position "nid".

250 Hz à 2kHz (mediums)

Le temps de montée dans la nef est globalement plus rapide pour l'émission en nid d'hirondelle. Dans le chœur et le bas coté Sud-Ouest, le temps de montée est très lent (supérieur à 350 ms) pour l'émission en nid d'hirondelle. Pour l'émission à la croisée, c'est dans la moitié Ouest du bas coté Nord-Ouest que le temps de montée est le plus lent.

2kHz à 16kHz (*aigus*)

Les trois zones délimitées par les courbes (inférieur à 125 ms, entre 125 ms et 200 ms, entre 200 ms et 225 ms) sont plus étendues pour l'émission à la croisée du transept que pour l'émission en nid d'hirondelle. Ceci montre que le temps de montée est globalement plus court dans le cas d'une émission à la croisée. Par ailleurs, la zone dans laquelle le temps de montée est compris entre 125 ms et 200 ms couvre une partie plus importante de la nef et du transept pour l'émission à la croisée.

8 - DEPOUILLEMENT DES QUESTIONNAIRES

Lors de l'expérience à Notre-Dame étaient présents une trentaine de personnes. Parmi elles on dénombre environ une dizaine d'organistes, les autres étant pour la plupart musiciens.

L'écoute musicale s'est déroulée comme suit. Pendant la diffusion à une position donnée de l'oeuvre enregistrée, les participants étaient invités (après être restés quelques instants position 6 de la **figure 7** afin de fixer une première référence commune à tous) à se déplacer questionnaire en main aux diverses positions proposées. Chacun était alors libre de choisir son propre parcours et de rester le temps qu'il souhaitait à chaque position pour noter ses impressions.

Plusieurs difficultés apparurent lors du dépouillement des questionnaires recueillis :

- les critères de confort d'écoute diffèrent d'un individu à l'autre.
- chacun utilise, pour décrire ses impressions, un vocabulaire qui lui est propre.
- comme le montrent les notes des participants, l'appréciation se fait par comparaison : on juge d'une position par rapport aux positions où l'on s'est rendu précédemment. On voit donc que le choix du parcours effectué n'est pas indifférent.

Il est clair que l'interprétation détaillée des questionnaires est un problème délicat qui nécessite de s'intéresser à chaque cas individuel alors qu'on ne peut tirer de conclusion que par recoupements entre les avis de plusieurs individus.

Malgré tout, après avoir rassemblé les avis de tous les auditeurs par positions d'écoute dans un tableau comparatif, nous avons pu en extraire des informations qui nous ont permis d'interpréter de façon plus réaliste certaines des analyses acoustiques.

9 - INTERPRETATION DES RESULTATS

Quelles valeurs des temps de réverbération, quelles valeurs des temps de montée procurent "la meilleure" écoute ? Nous retournerons la question en nous demandant: comment les différences que nous avons mesurées sont-elles perçues?

Pour répondre à cette question, reportons-nous aux questionnaires remplis par les personnes présentes lors de l'expérience. Une grande partie des remarques formulées sont de deux types: elles concernent soit l'équilibre tonal du son ("trop de basses" ou "trop d'aigus" . . .) soit la précision du son (les adjectifs utilisés sont par exemple: "sec", "flou", "précis", "confus", "net", "lisible", "intelligible" . . .).

Les remarques relatives à la précision du son nous permettent de mieux apprécier l'influence des temps de montée. Pour cela, il nous faut diviser l'ensemble des questionnaires en deux catégories: ceux remplis par des organistes et ceux remplis par les autres (les critères de confort d'écoute ne sont pas les mêmes lorsque l'on est habitué à entendre l'instrument depuis la console ou depuis "la salle").

Pour les deux catégories, on peut associer une bonne lisibilité (intelligibilité, netteté) du son à un temps de montée assez rapide dans la bande de 2kHz à 16kHz. Par contre, *les organistes se différencient des autres auditeurs lors de l'appréciation du temps de montée dans la bande de 63Hz à 250Hz : ils préfèrent un temps de montée assez rapide (environ 300ms) jugé trop "sec" par les autres auditeurs* . En d'autres termes, les organistes perçoivent une sorte de confusion là où les autres auditeurs perçoivent une rondeur plus confortable du son (de 400ms à 600ms). Enfin, pour les deux catégories, un temps de montée assez rapide (environ 250ms) dans la bande de 250Hz à 2kHz semble être satisfaisant.

En résumé, une bonne place du point de vue des temps de montée semble être une place où le temps de montée vaut environ:

pour les organistes

| | |
|---------------------|--------------|
| 300ms dans la bande | 63Hz à 250Hz |
| 200ms | 250Hz à 2kHz |
| moins de 100ms | 2kHz à 16kHz |

pour les autres auditeurs

| | |
|-----------------------------|--------------|
| 400ms à 600ms dans la bande | 63Hz à 250Hz |
| 200ms à 300ms | 250Hz à 2kHz |
| moins de 100ms | 2kHz à 16kHz |

Il ressort de l'étude des mesures spectrales que les émissions à la croisée du transept et en nid d'hirondelle sont à peu près équivalentes du point de vue de l'homogénéité spectrale. La différence entre ces deux positions d'émission est que l'une (nid d'hirondelle) favorise légèrement plus la partie Ouest de la nef alors que l'autre (croisée du transept) favorise légèrement plus le choeur.

10 - CONCLUSIONS

Pour les trois situations qui nous ont été demandées nous avons effectué les mesures acoustiques donnant des renseignements sur, - la coloration spectrale, le niveau d'émission, la netteté et la lisibilité sonore (temps de montée et durée de réverbération). Des tests d'écoute ont permis en outre d'affiner l'interprétation des résultats.

La position d'émission situé dans le transept Nord n'a pas été retenue : elle induit de fortes inhomogénéités aussi bien du point de vue spectral que pour les durées de réverbération.

Les deux autres positions, à l'angle Nord-Est de la croisée du transept et en nid d'hirondelle 2ème travée Sud, sont intéressantes et offrent des qualités différentes. Remarquons d'emblée qu'étant situées latéralement par rapport à l'axe principal de l'édifice elles produisent des zones "d'ombre acoustique" particulières : bas côtés Nord pour l'émission à la croisée, bas côtés Sud et chœur pour l'émission en nid.

L'émission à la croisée du transept plus appréciée du point de vue de l'intelligibilité musicale par un public non spécialisé offre aussi la meilleure homogénéité pour le temps de réverbération.

L'émission depuis la position en nid d'hirondelle procure, du point de vue de la coloration spectrale apportée par la cathédrale, une meilleure répartition dans la zone Ouest traditionnellement occupée par le public. La très grande netteté d'écoute perçue au pied même de l'orgue est fortement appréciée des auditeurs organistes.

Il faut préciser ici que cette étude reflète l'acoustique de la cathédrale vide. Un public dense se comporte acoustiquement comme un tapis absorbant dont l'effet est très sensible : diminution du temps de réverbération, absorption des fréquences aiguës. L'étude reste valable car elle est avant tout comparative.

Bien que les dimensions au sol et que la hauteur sous voûte des cathédrales de Chartres et de Paris soient voisines il n'est pas possible de transposer les phénomènes acoustiques de l'une à l'autre. Si la position en nid d'hirondelle devait être retenue pour l'instrument de N.D. de Paris il faudrait accorder une attention toute particulière à la conception du buffet qui joue un rôle important sur le rayonnement, ainsi qu'à la disposition des plans sonores situés dans ces tribunes.

BIBLIOGRAPHIE

JORDAN W.L. - Acoustical Design of Concert Halls and The
Applied Science Publishers - Londres 1980

KNUDSEN V.O. - Architectural acoustics.
John Wiley and Sons ed. - New York 1932

KUTTRUFF H - Room Acoustics
Applied Science Publishers - Londres 1979

LEIPP E. - L'église de Souvigny et son orgue.
Actes du colloque de Souvigny - P. 37-54
Edité par l'Association St Marc - Souvigny 1985

LEIPP E. - Une méthode réaliste pour tester l'acoustique des lieux
d'écoute.
in Colloque C.N.R.S. Qualité acoustique des lieux d'écoute.
Ed. CNRS et ERA 537 - Paris 1981

SABINE W.C. - Architectural acoustics : Correction of acoustical
difficulties.
Architectural Quarterly of Harvard University, 1912 , et également
dans
Collected Papers on Acoustics - Cambridge Mass. USA 1922

VIVIE E. , CASSAN M. - Acoustique architecturale
Le livre des techniques du son, Tome 1 - Editions Fréquences - Paris
1987

* * * * *

* * *

*

Ce travail, réalisé sous la direction de Michèle CASTELLENGO a été mené par :

E. VIVIE (Acousticien) pour la définition et la mise en oeuvre technique des expériences (§ 2 et 3).

J.P. MORCKERKEN (créateur des enceintes Adeline) pour la conception et l'installation de la source d'émission.

B. FABRE (Ingénieur E.N.S.T.) pour le dépouillement des documents, l'interprétation des mesures et la rédaction du rapport (§ 4 à 10).

et tous les membres du laboratoire d'Acoustique qui ont participé sportivement au montage et au démontage des expériences à Chartres et à N.D. de Paris.

N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.

Annexe I

Mesures spectrales en bande fine : différences de spectres.

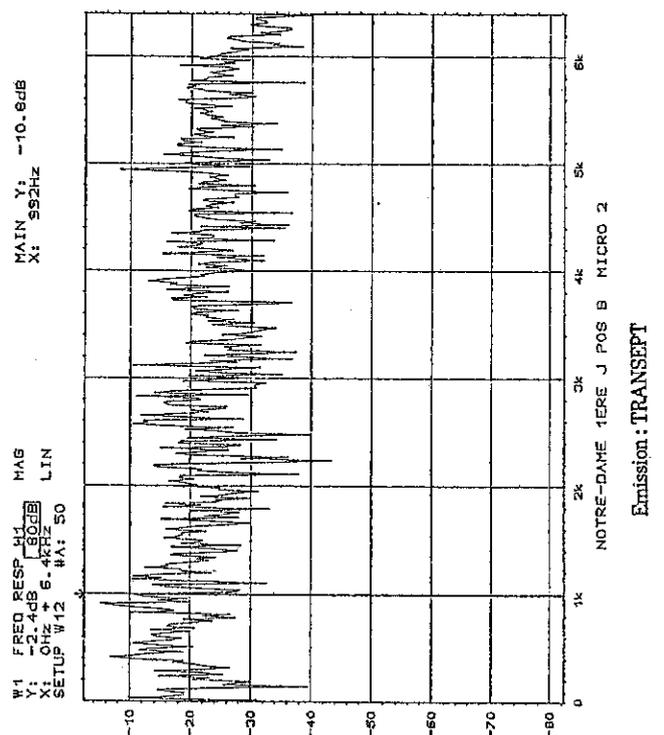
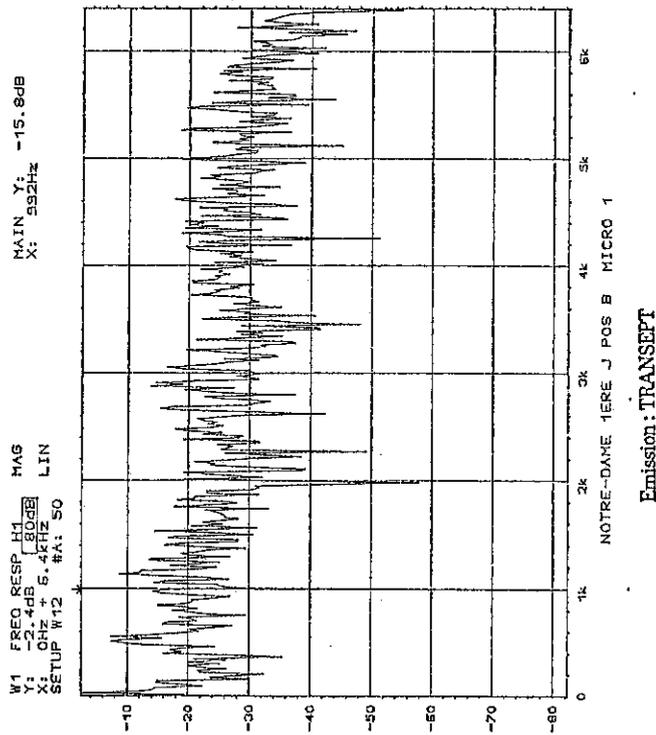
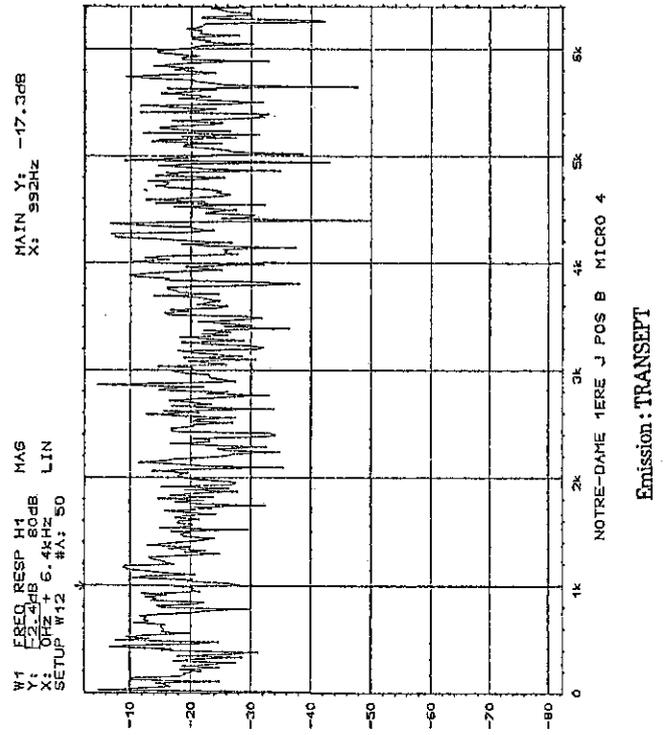
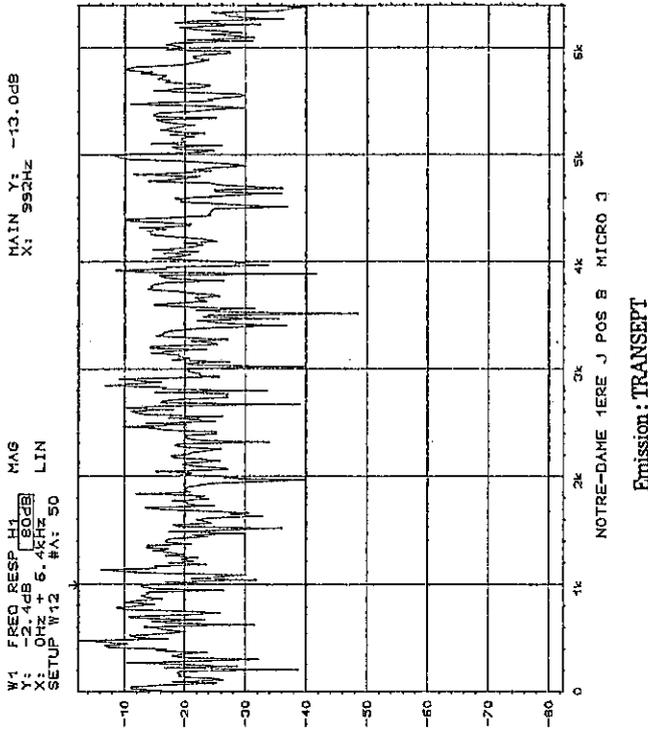
- Emission de bruit rose au "Transept Nord"
- Réception aux 12 positions indiquées figure 7
- largeur de bande : 4 Hz
- moyenne sur 50 acquisitions de 250 ms chacune

Chaque courbe montre l'écart entre le spectre du signal fourni par le microphone au point d'écoute considéré et le le spectre du signal fourni par le microphone "de référence" positionné devant le groupe d'enceintes.

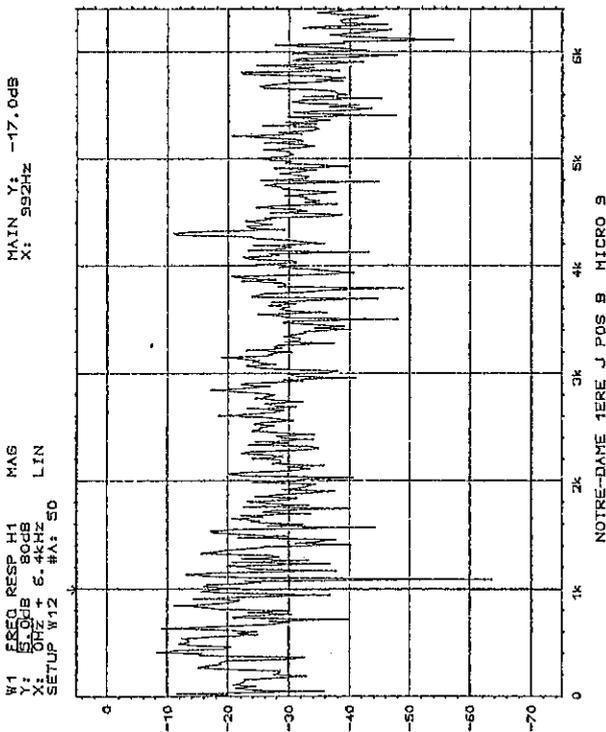
Ces mesures ont été effectuées à l'E.N.S.T. sur analyseur B & K 2032.

Ce type d'analyse, difficilement interprétable, n'a pas été retenu.

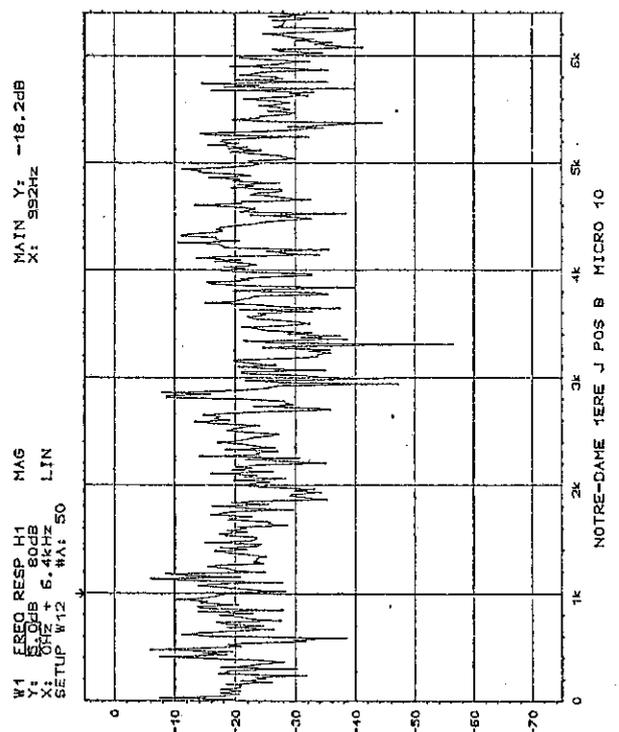
N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



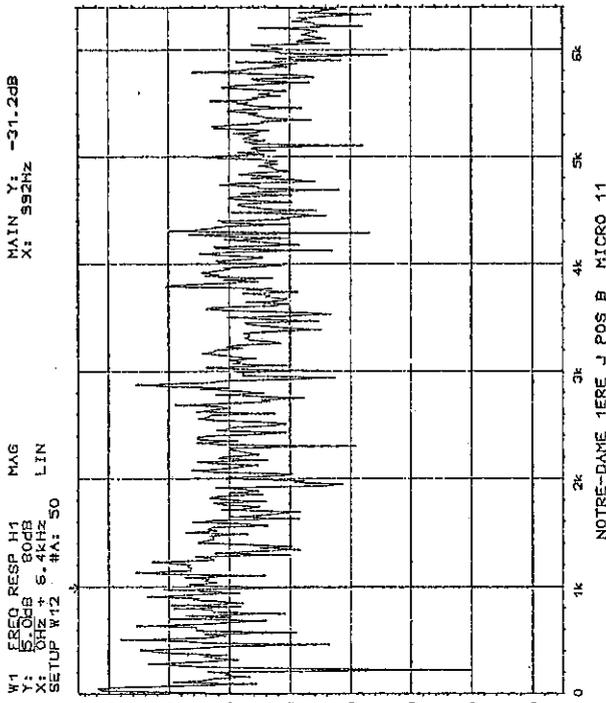
N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



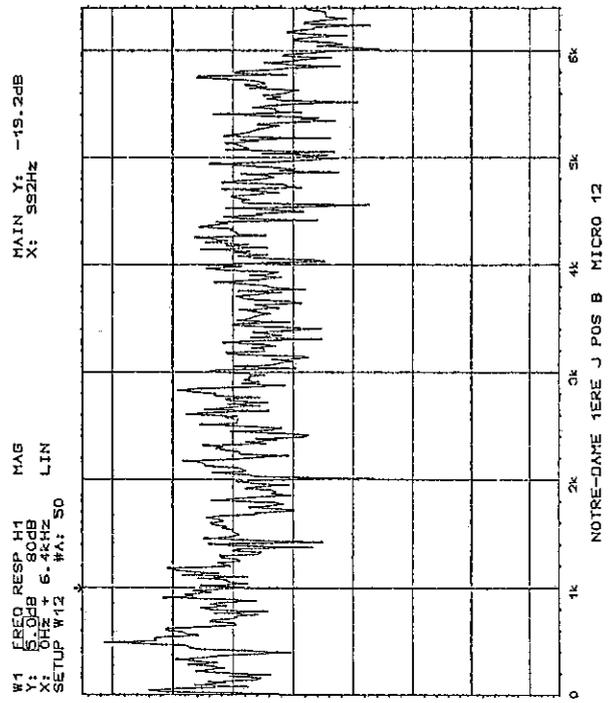
Emission : TRANSEPT



Emission : TRANSEPT

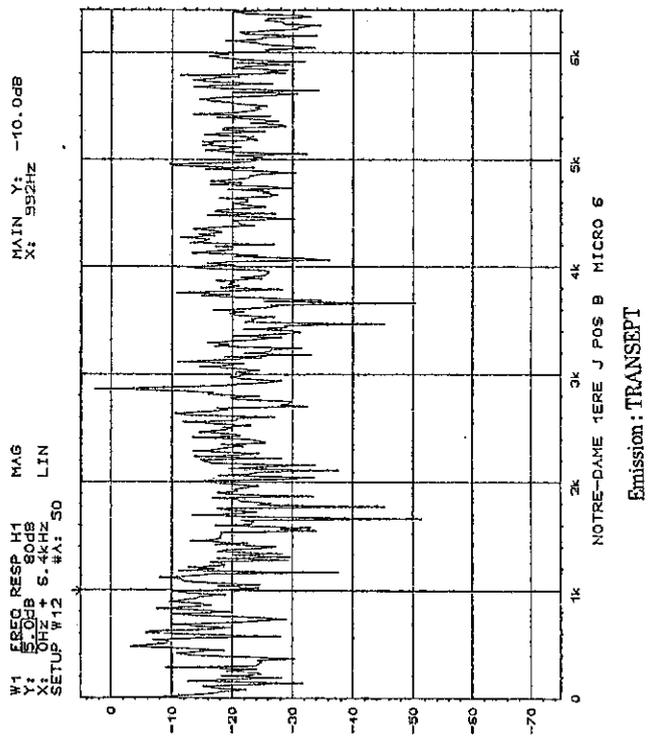
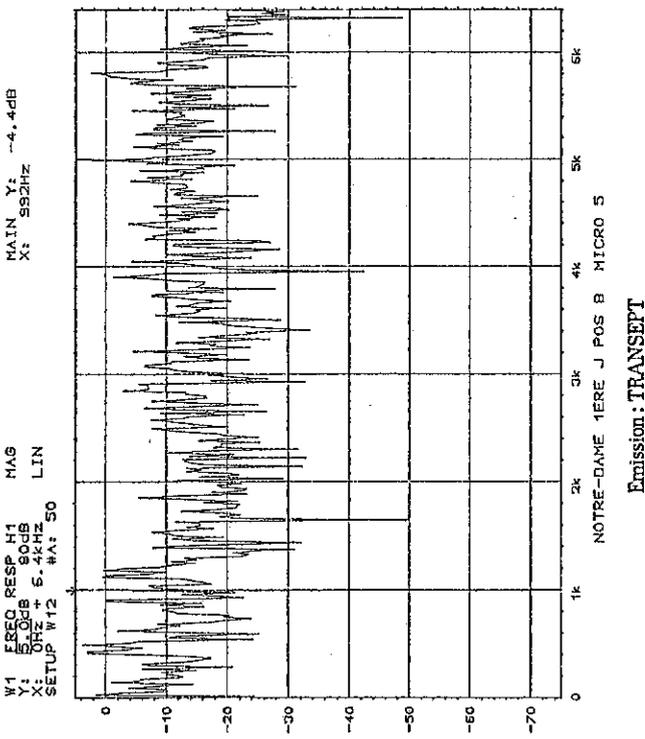
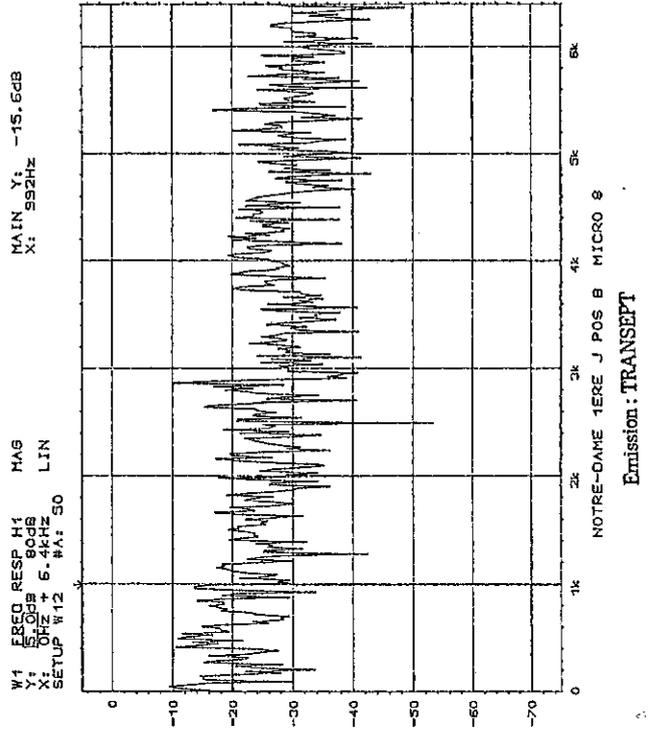
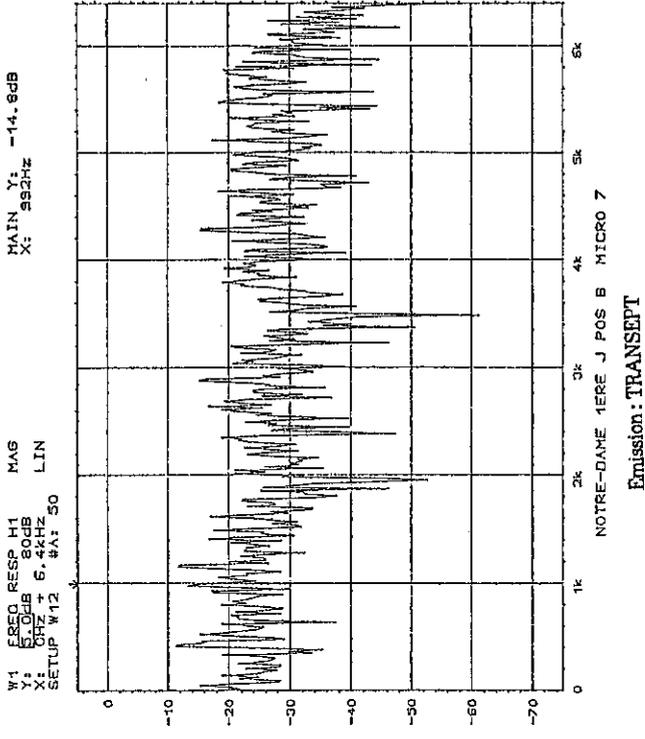


Emission : TRANSEPT



Emission : TRANSEPT

N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.

Annexe II

Mesures spectrales en bande large.

- émission de bruit rose successivement aux trois positions: "Transept", "Croisée" et "Nid".
- réception aux positions 1,2,3,4,5,6,8,11 précisées figure 7
- largeur de bande: 1/3 d'octave
- moyenne de 8 acquisitions d'environ 250 ms chacune

Sur chaque document on pourra voir:

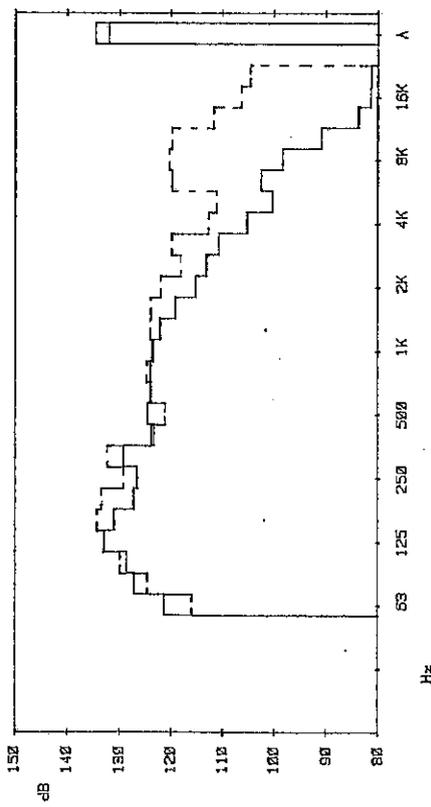
- en pointillé : le contenu spectral du bruit capté par le microphone "de référence"
- en trait plein : le contenu spectral du bruit capté par le microphone au point considéré

Seuls les niveaux relatifs entre les deux courbes sont à prendre en compte ici car les niveaux ont été ajustés afin de permettre une comparaison visuelle plus facile.

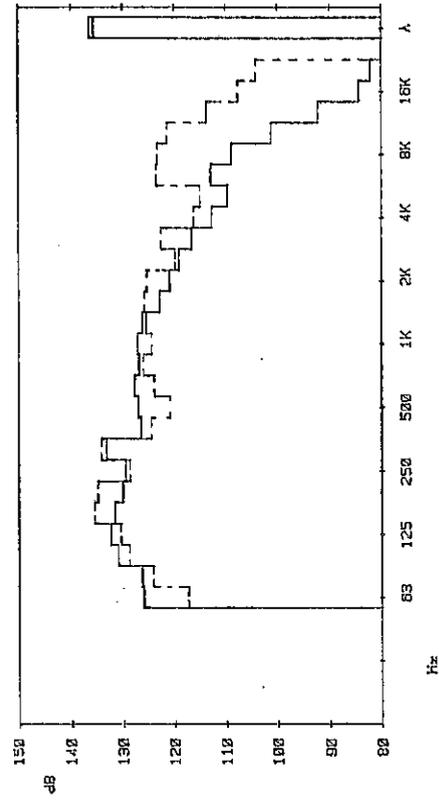
Ces mesures ont été effectuées au L.N.E. sur calculateur Hewlett-Packard.

C'est à partir de ces courbes qu'ont été calculées les courbes "d'écart à la moyenne" présentées en annexe V.

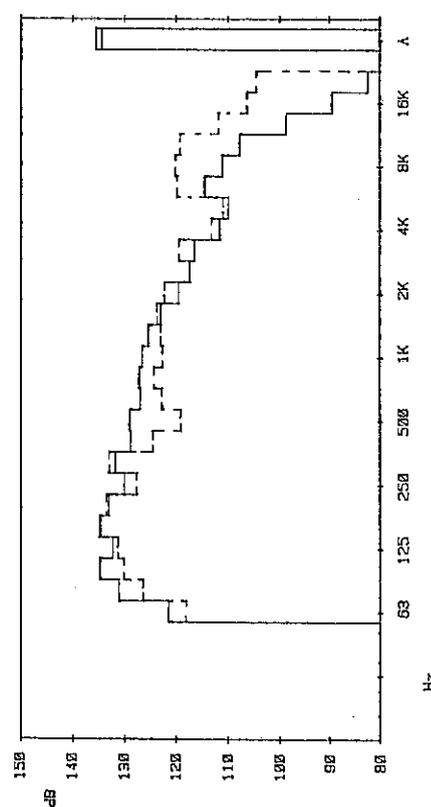
N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



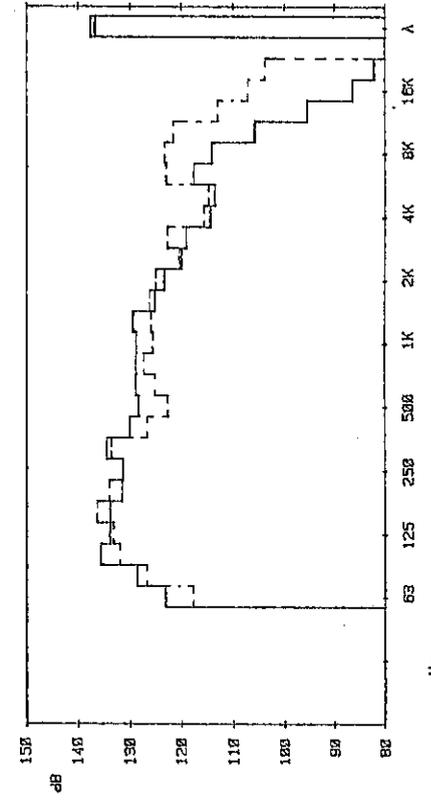
Notre-Dame de Paris
Emission : TRANSEPT Micro : 1
23&24 Mars 1987



Notre-Dame de Paris
Emission : TRANSEPT Micro : 2
23&24 Mars 1987

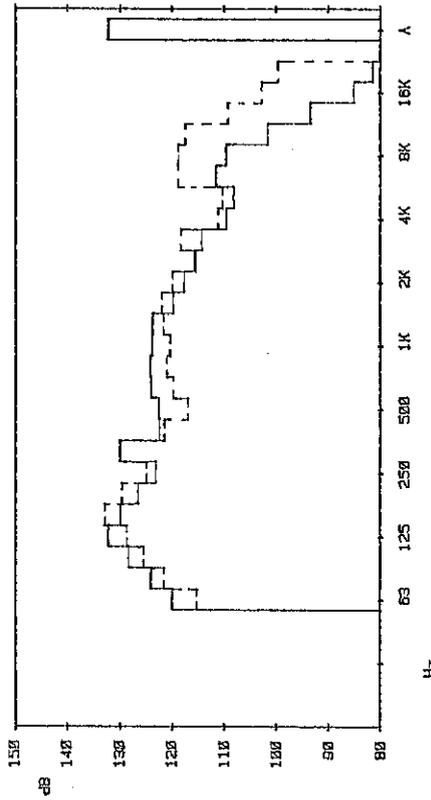


Notre-Dame de Paris
Emission : TRANSEPT Micro : 3
23&24 Mars 1987



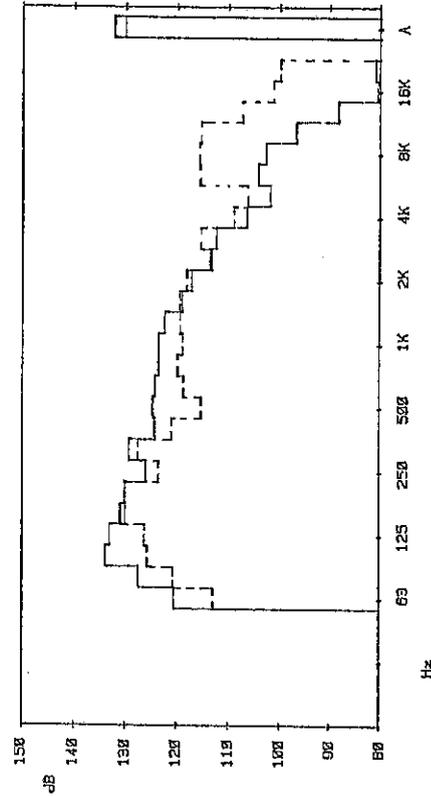
Notre-Dame de Paris
Emission : TRANSEPT Micro : 4
23&24 Mars 1987

N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



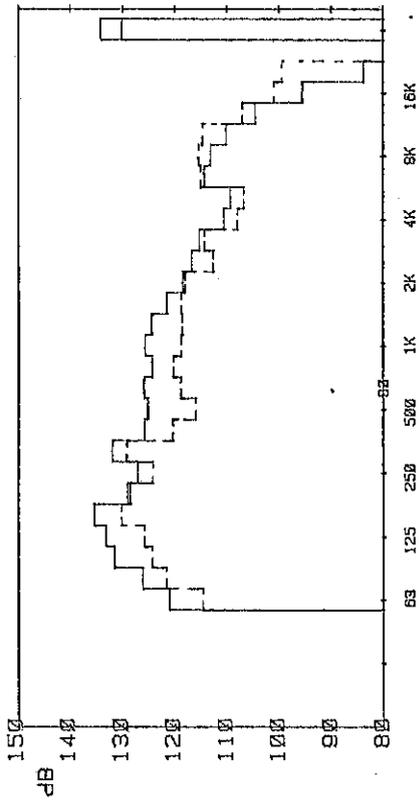
Notre-Dame de Paris
23&24 Mars 1987

Emission : TRANSEPT Micro : 6



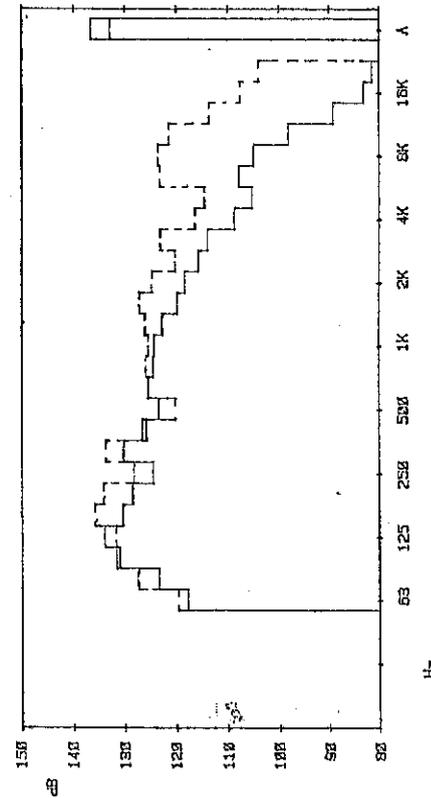
Notre-Dame de Paris
23&24 Mars 1987

Emission : TRANSEPT Micro : 11



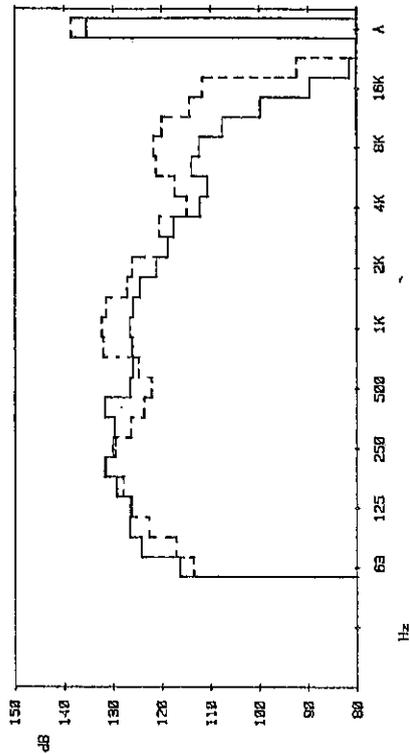
Notre-Dame de Paris
23&24 Mars 1987

Emission : TRANSEPT Micro : 5

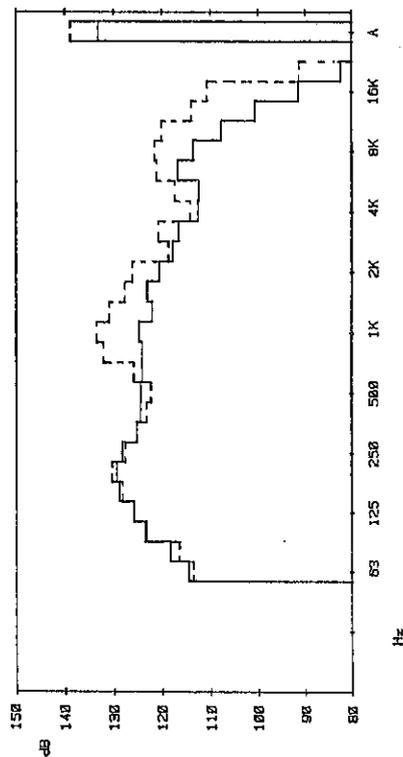


Notre-Dame de Paris
23&24 Mars 1987

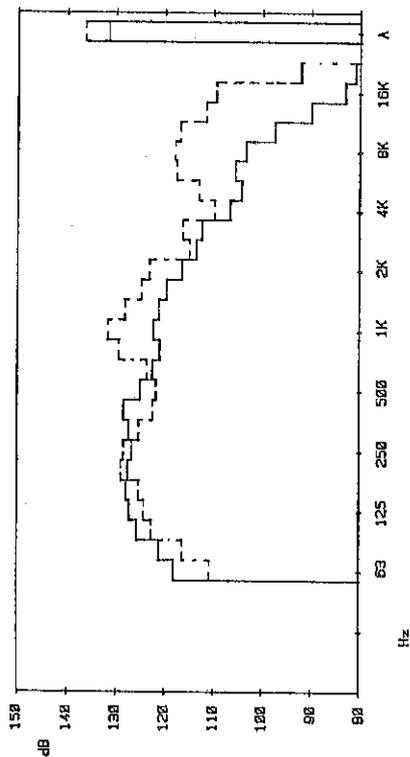
Emission : TRANSEPT Micro : 8



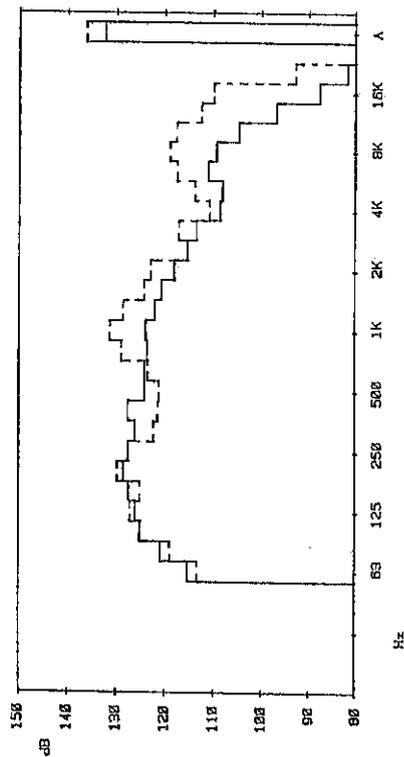
Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
23&24 Mars 1987
Micro : 2



Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
23&24 Mars 1987
Micro : 4

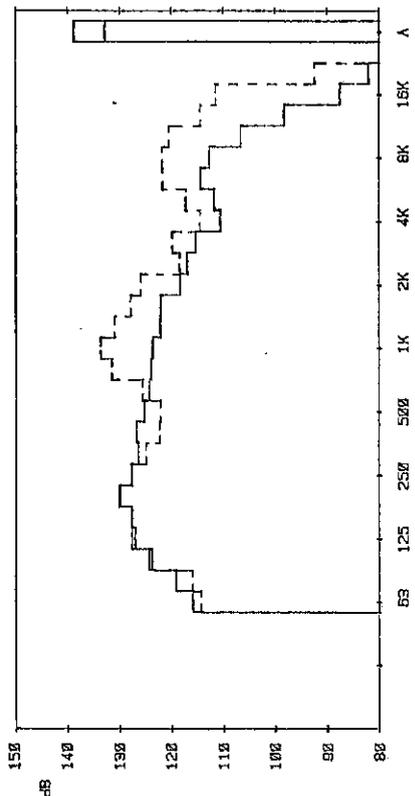


Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
23&24 Mars 1987
Micro : 1

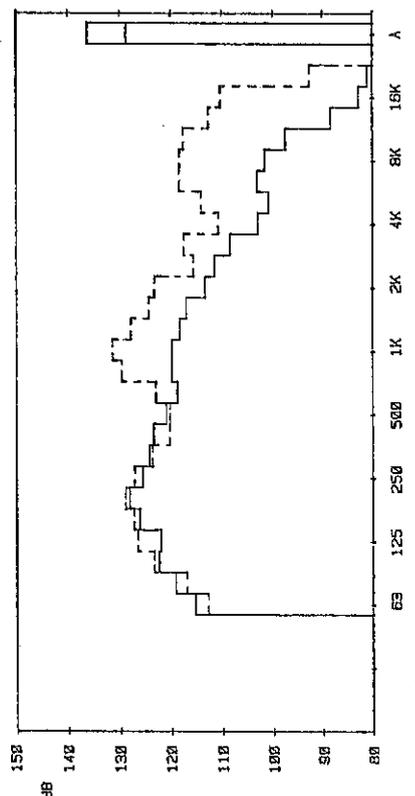


Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
23&24 Mars 1987
Micro : 3

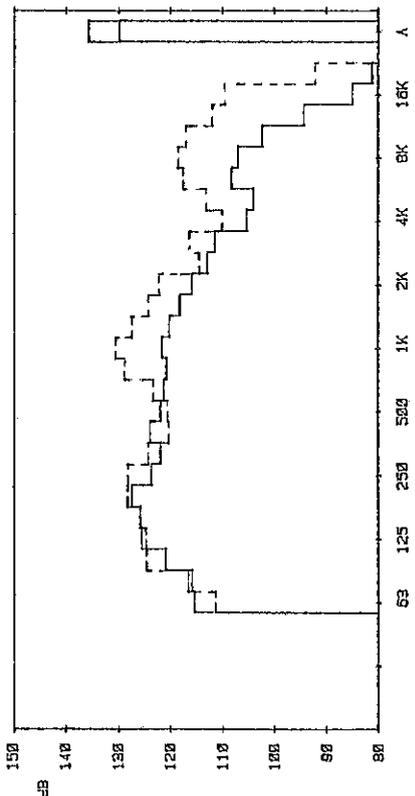
N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



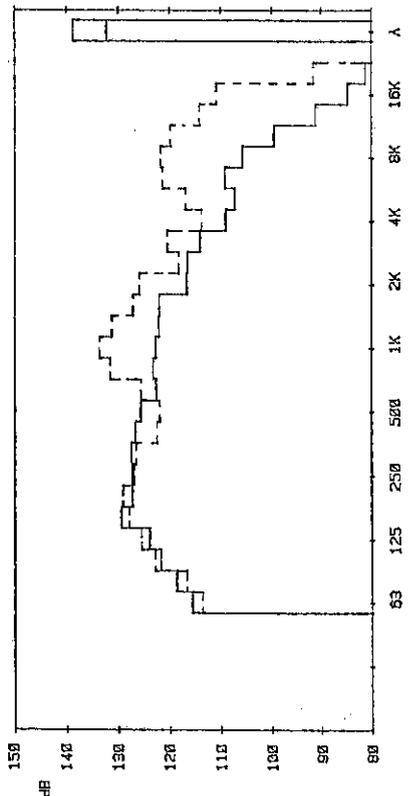
Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 6
23&24 Mars 1987



Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 11
23&24 Mars 1987

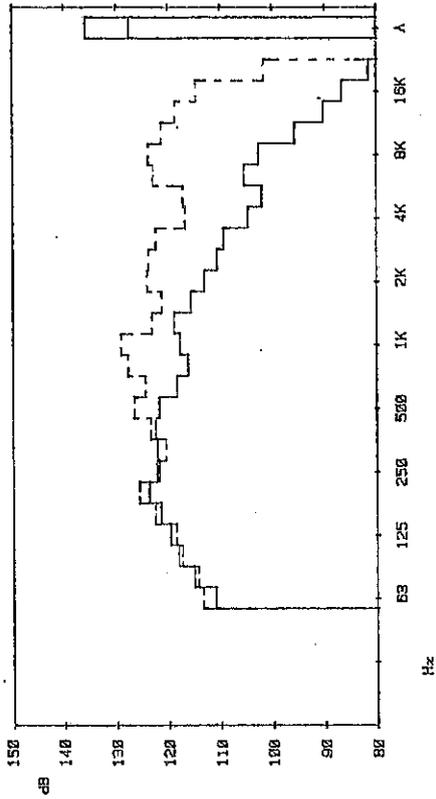


Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 5
23&24 Mars 1987

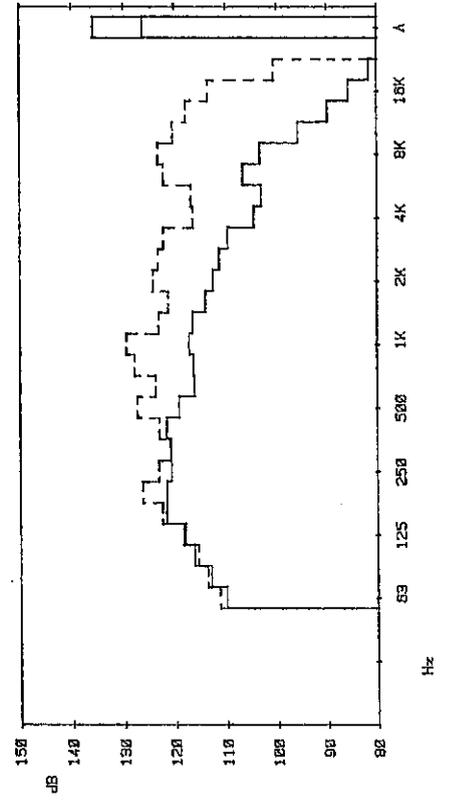


Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 8
23&24 Mars 1987

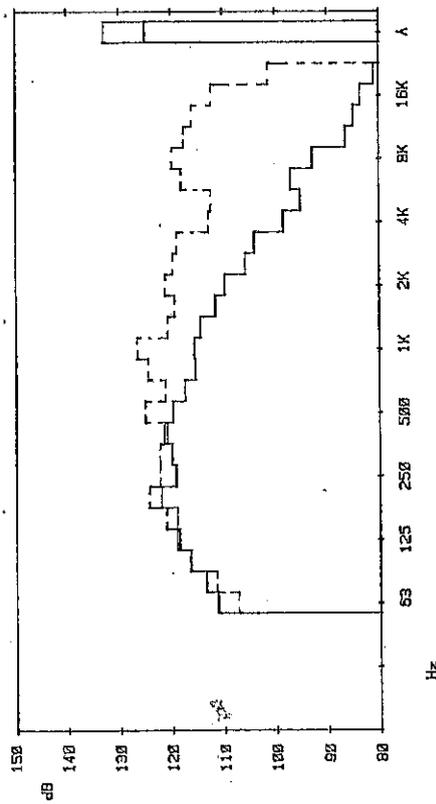
N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



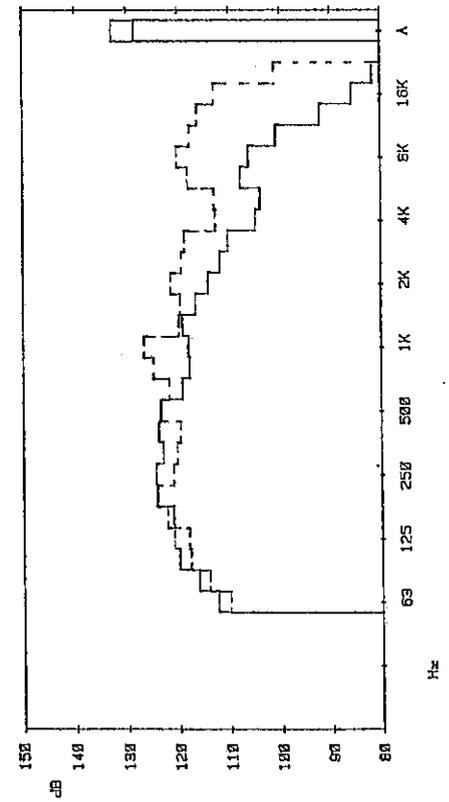
Notre-Dame de Paris
Emission : NID
23&24 Mars 1987
Micro : 2



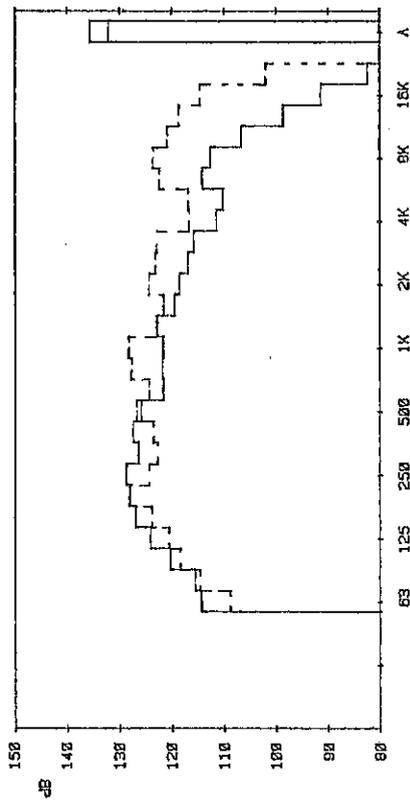
Notre-Dame de Paris
Emission : NID
23&24 Mars 1987
Micro : 4



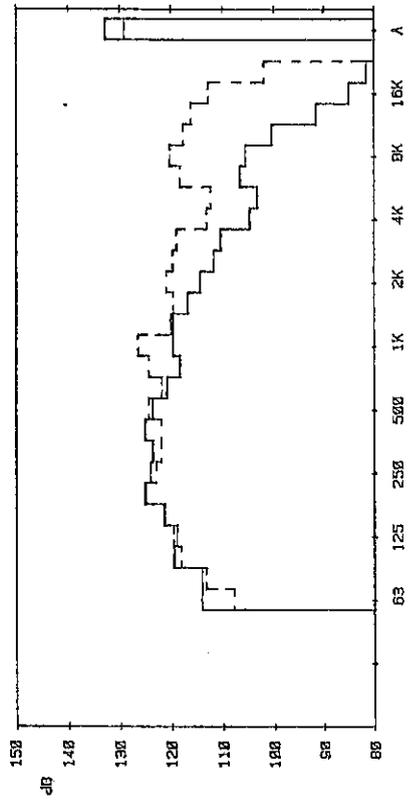
Notre-Dame de Paris
Emission : NID
23&24 Mars 1987
Micro : 1



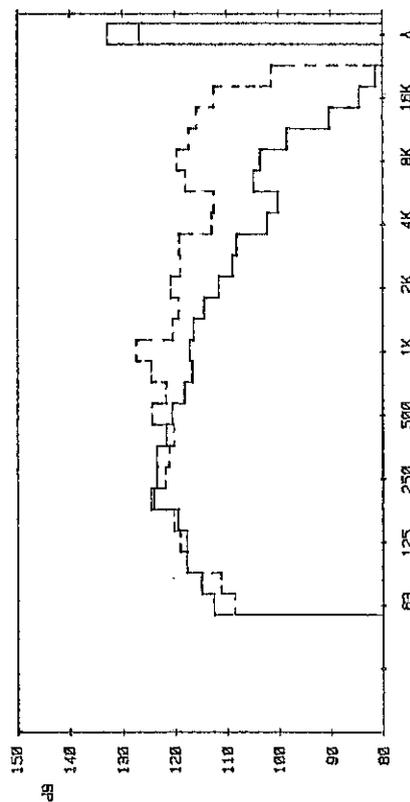
Notre-Dame de Paris
Emission : NID
23&24 Mars 1987
Micro : 3



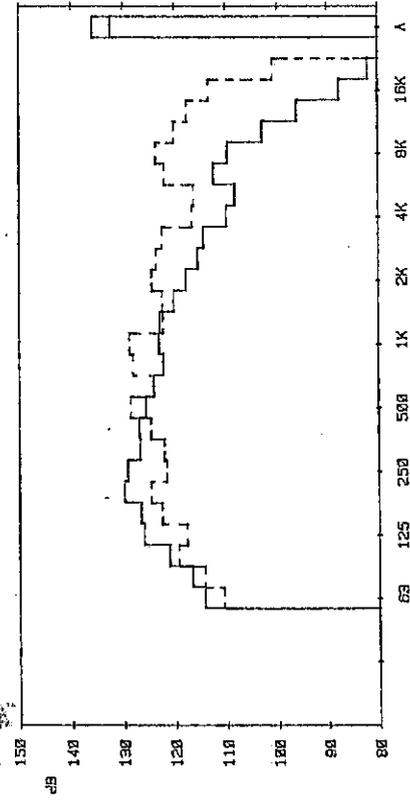
Notre-Dame de Paris
Emission : NID
23&24 Mars 1987
Micro : 6



Notre-Dame de Paris
Emission : NID
23&24 Mars 1987
Micro : 11



Notre-Dame de Paris
Emission : NID
23&24 Mars 1987
Micro : 5



Notre-Dame de Paris
Emission : NID
23&24 Mars 1987
Micro : 8

N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.

Annexe III

Temps de réverbération en fonction de la fréquence.

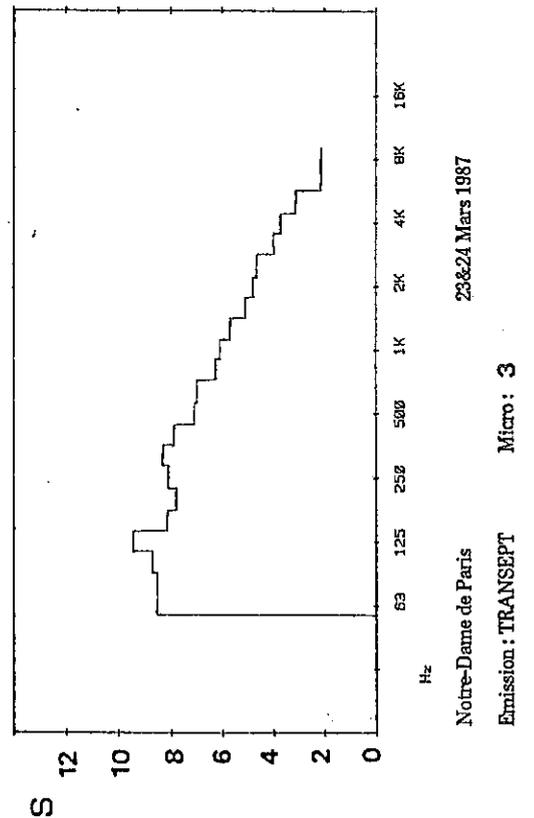
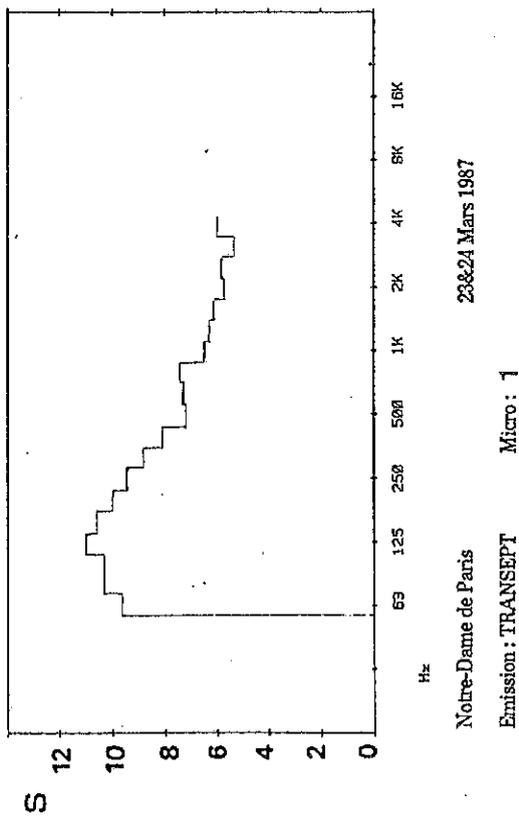
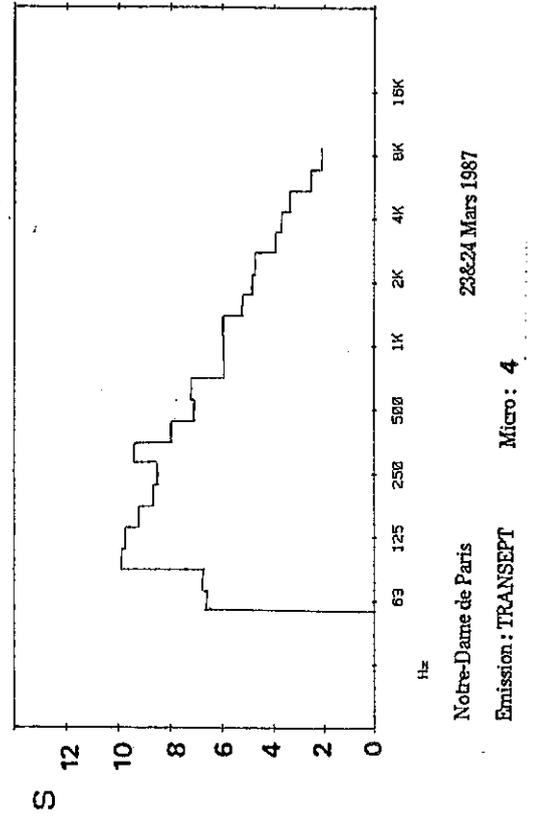
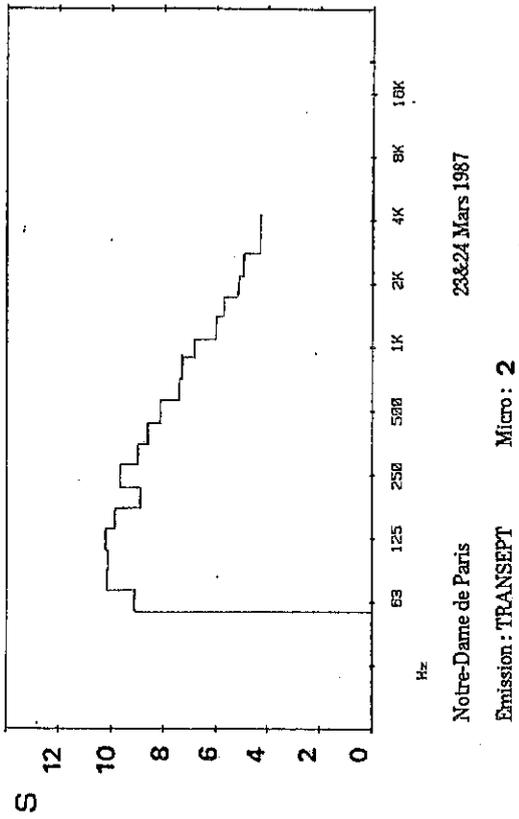
- émission de bruit rose successivement aux trois positions: "Transept", "Croisée" et "Nid".
- réception aux positions 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12 précisées figure 7
- largeur de bande: 1/3 d'octave

Chaque document représente la durée de réverbération en fonction de la fréquence pour un point de réception. Lorsque les mesures devenaient trop imprécises (du fait d'un niveau trop faible dans certaines bandes), nous avons arrêté la courbe à la dernière valeur mesurable dans l'aigu.

Ces mesures ont été effectuées grâce à un filtre B&K 2107 associé à un enregistreur de niveau B&K 2305.

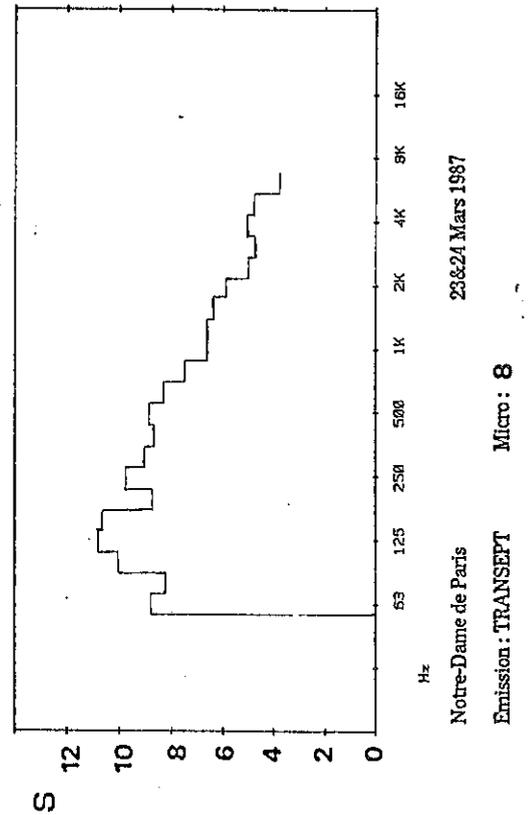
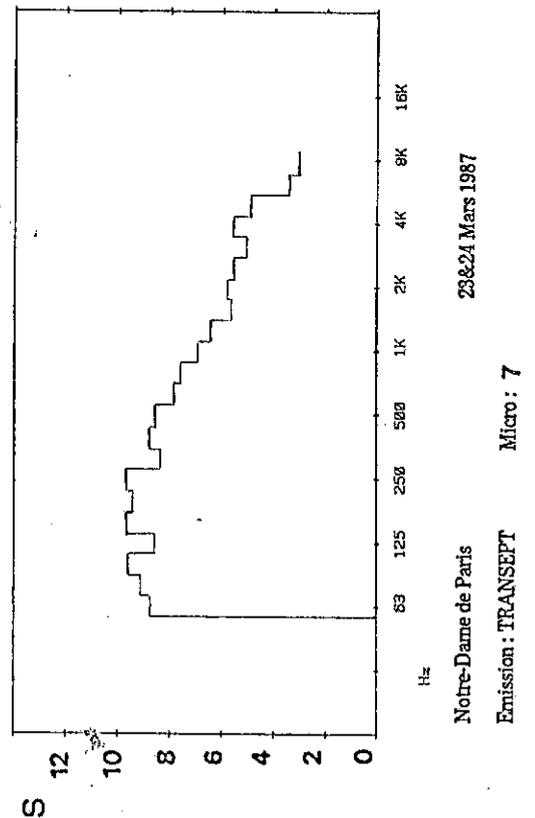
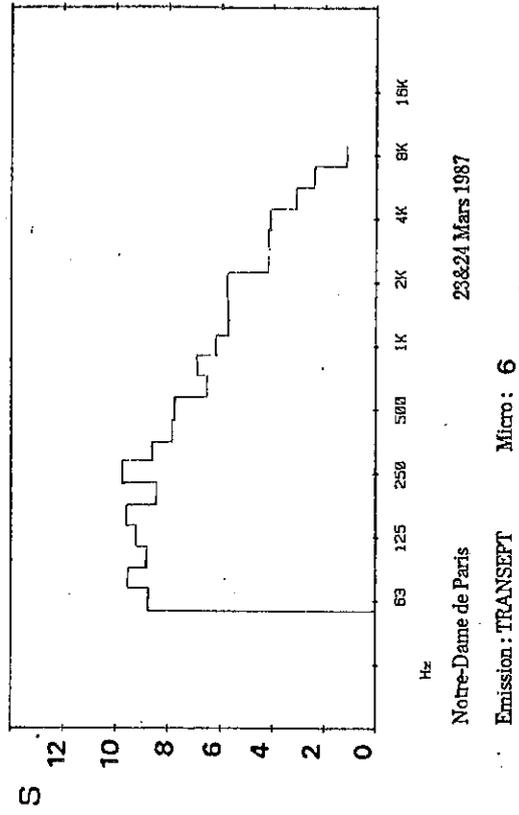
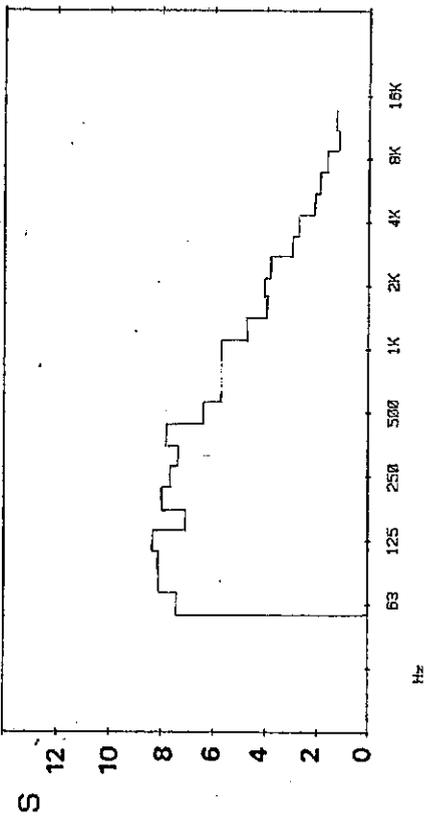
C'est à partir de ces courbes qu'ont été calculées les valeurs des moyennes et des écarts quadratiques moyens présentés figure 10.

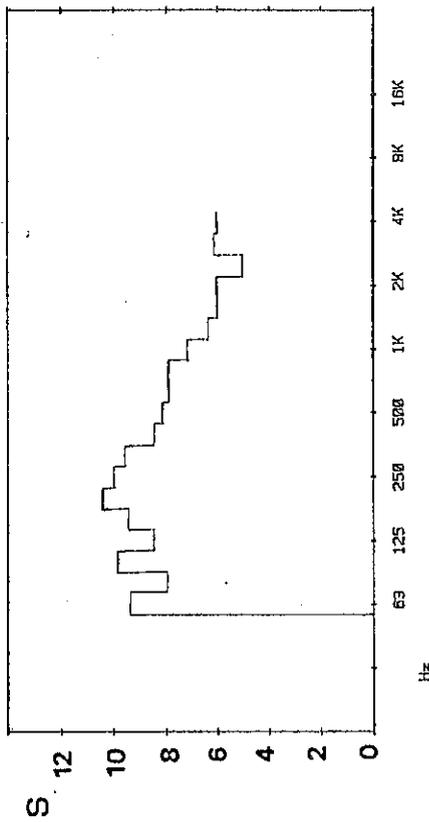
N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



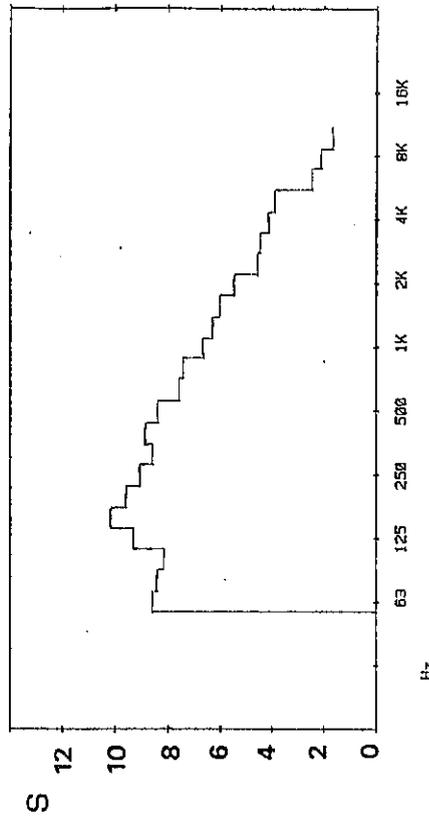
REVERBERATION

N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.

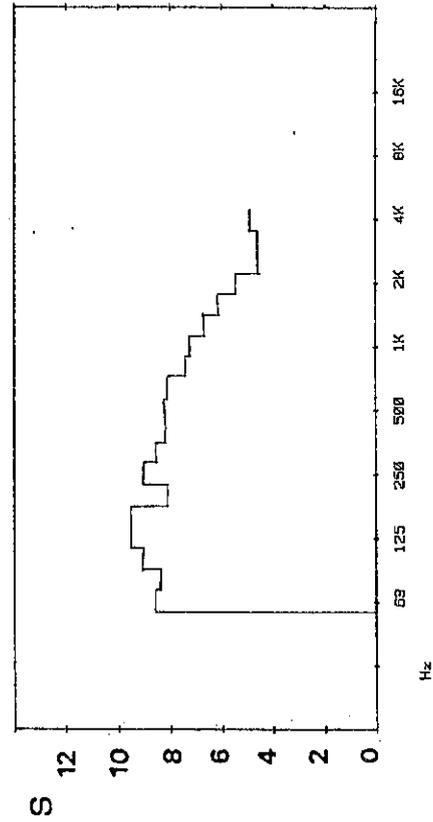




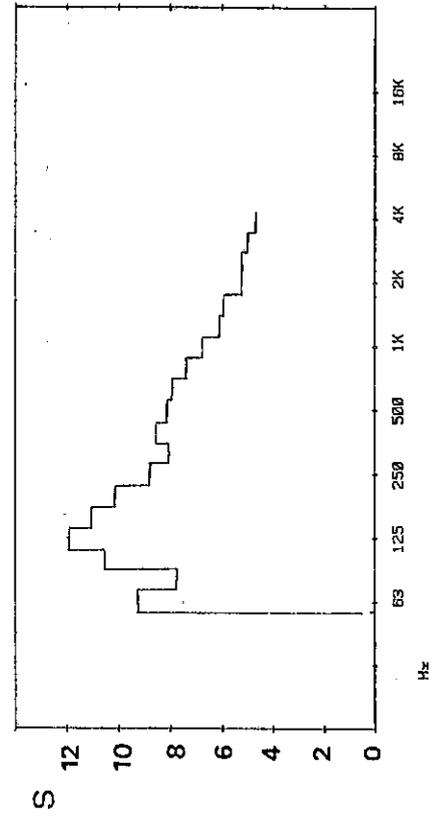
Notre-Dame de Paris
Emission : TRANSEPT
23&24 Mars 1987
Micro : 9



Notre-Dame de Paris
Emission : TRANSEPT
23&24 Mars 1987
Micro : 10

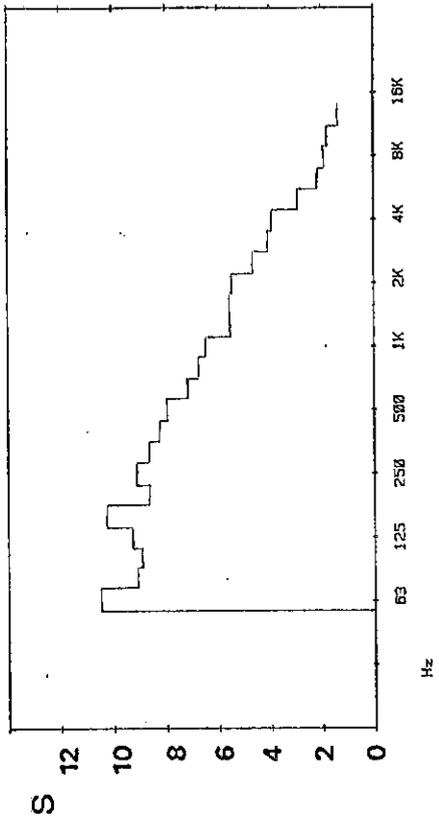


Notre-Dame de Paris
Emission : TRANSEPT
23&24 Mars 1987
Micro : 11

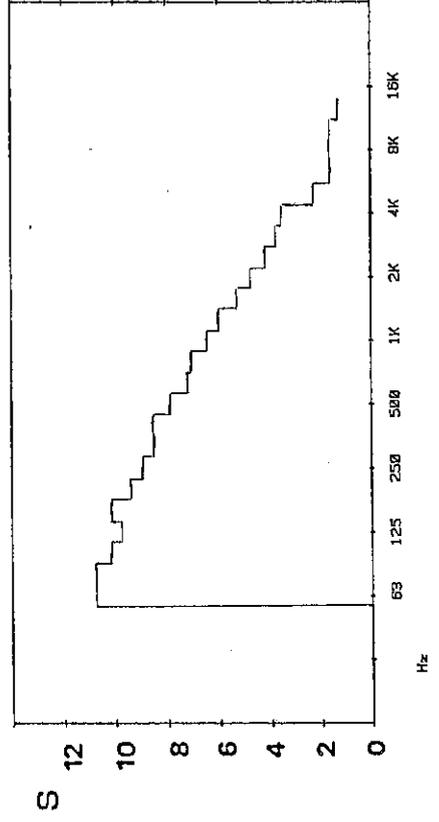


Notre-Dame de Paris
Emission : TRANSEPT
23&24 Mars 1987
Micro : 12

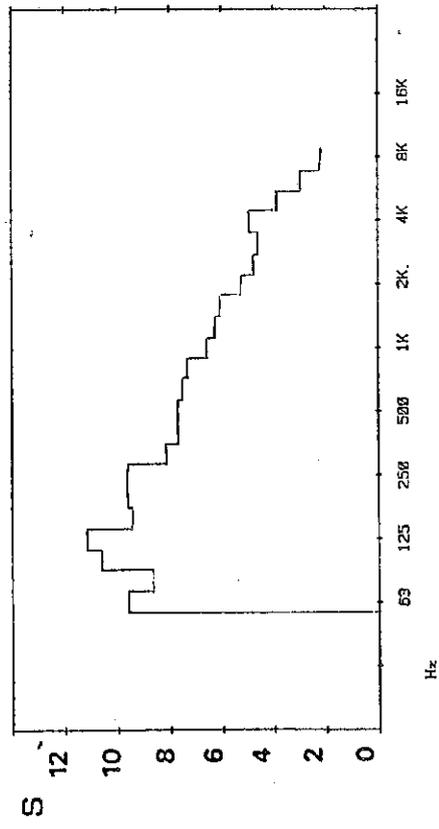
N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



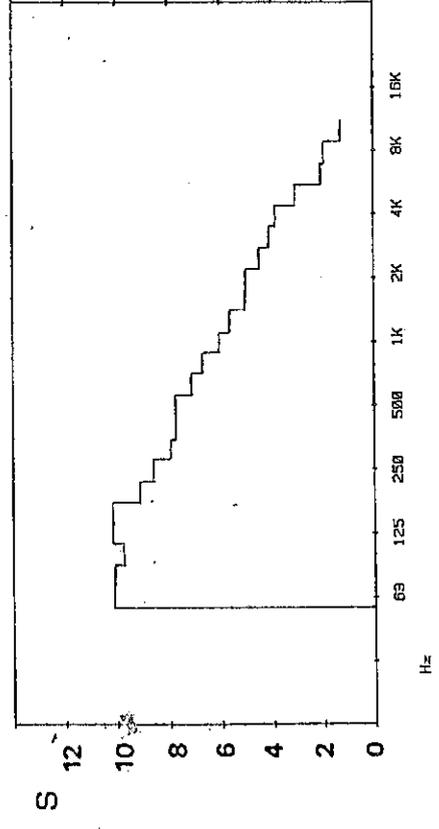
Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 2
23&24 Mars 1987



Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 4
23&24 Mars 1987

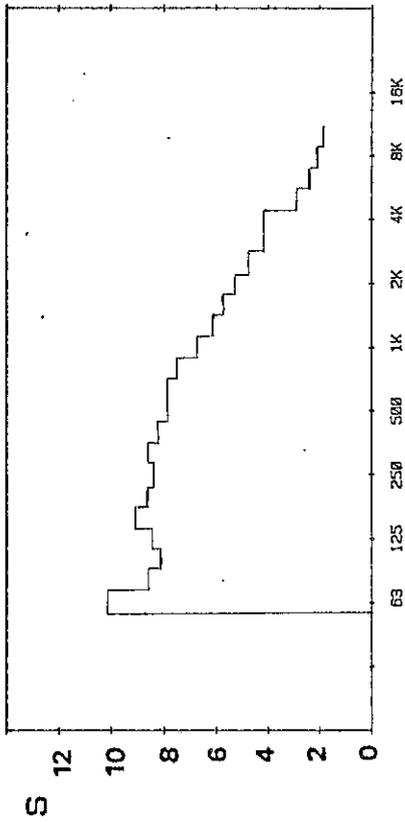


Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 1
23&24 Mars 1987

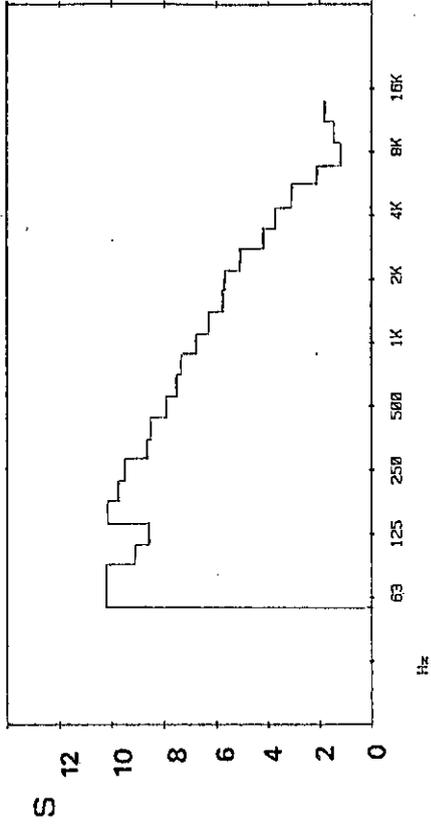


Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 3
23&24 Mars 1987

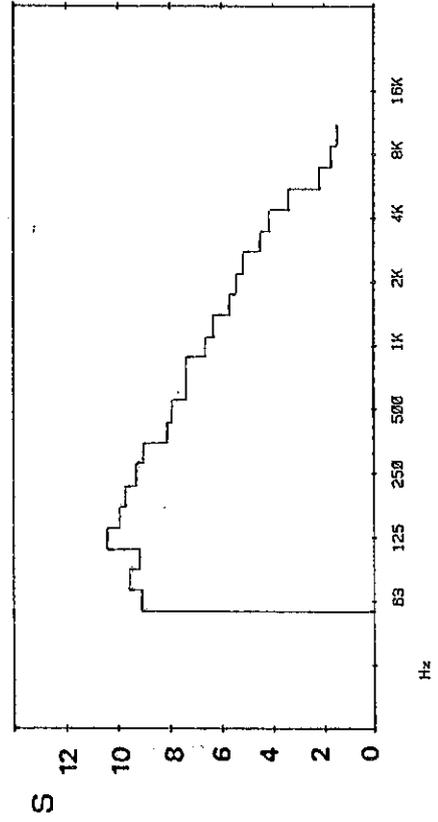
N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



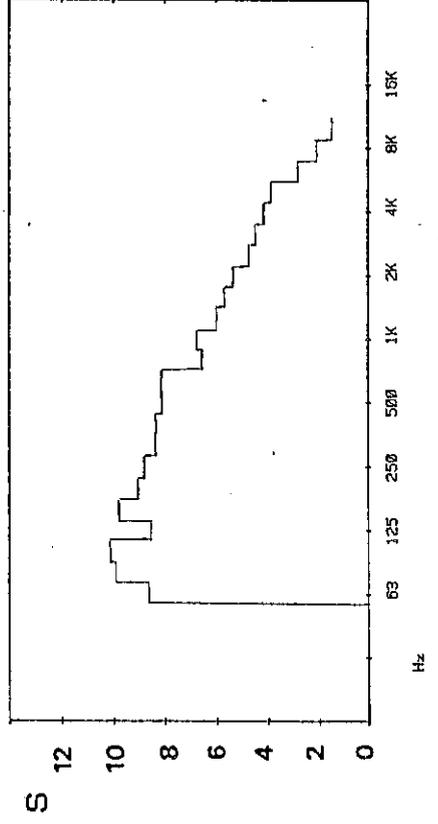
Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 5
23&24 Mars 1987



Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 6
23&24 Mars 1987

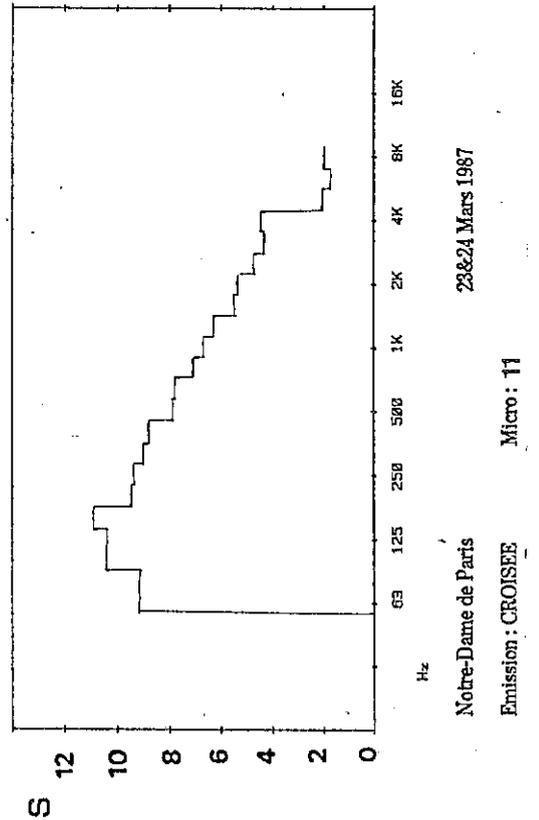
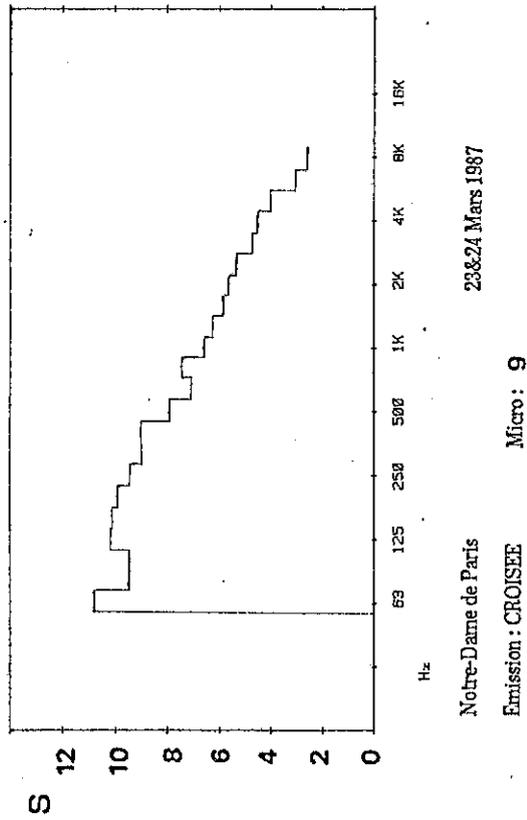
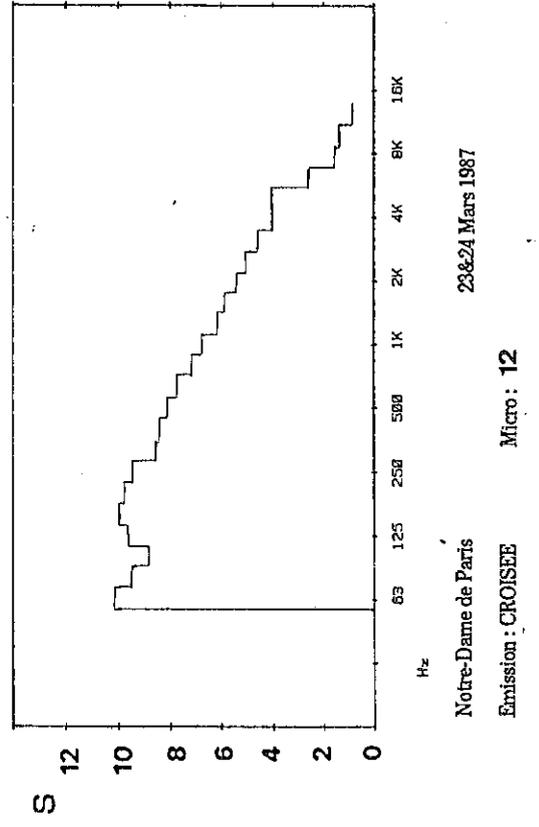
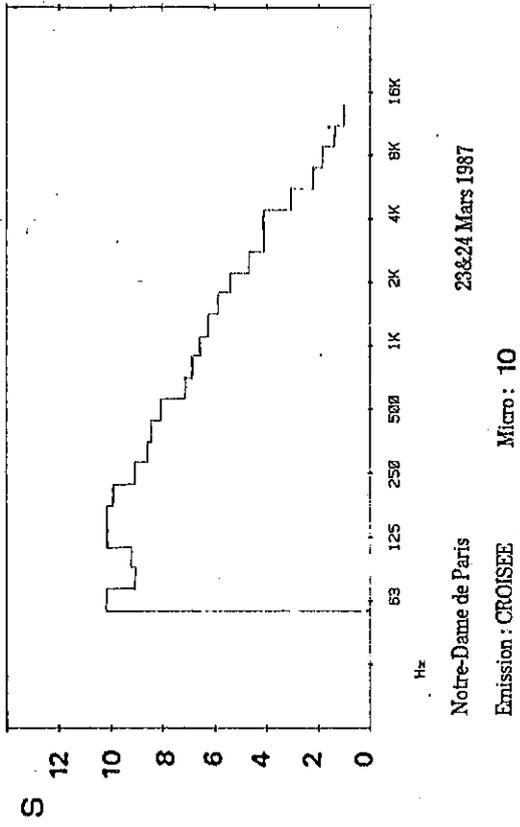


Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 7
23&24 Mars 1987

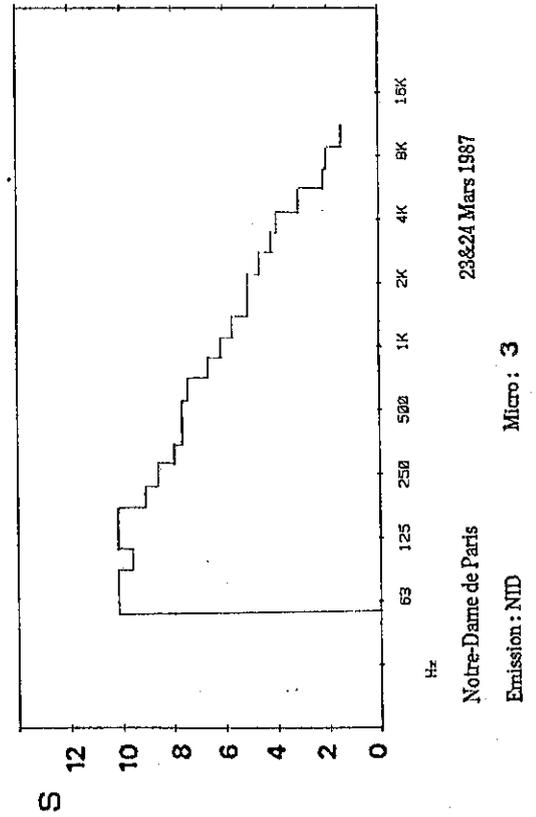
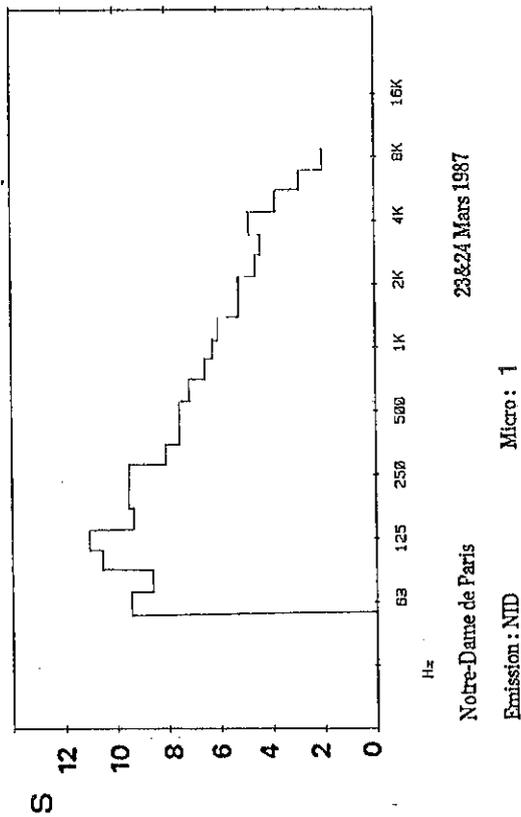
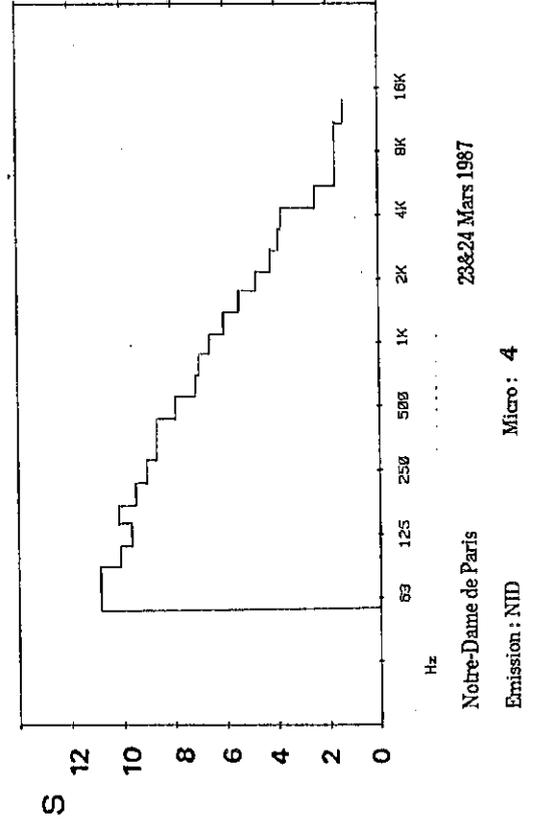
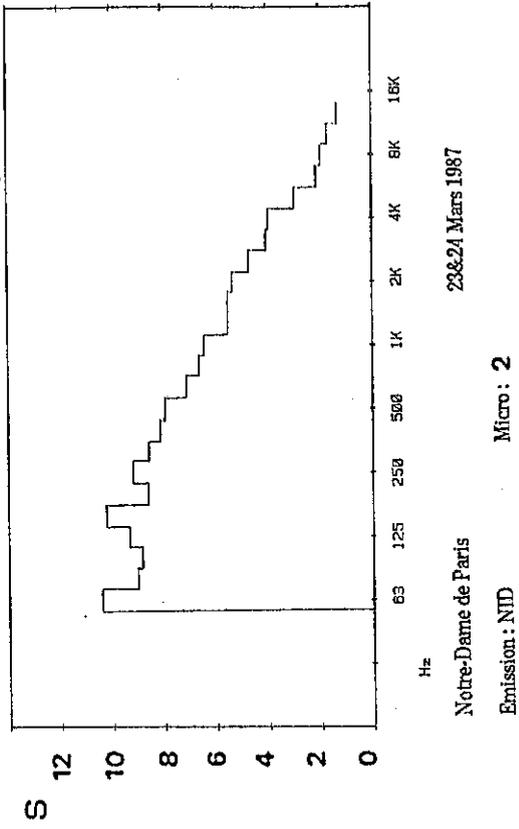


Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 8
23&24 Mars 1987

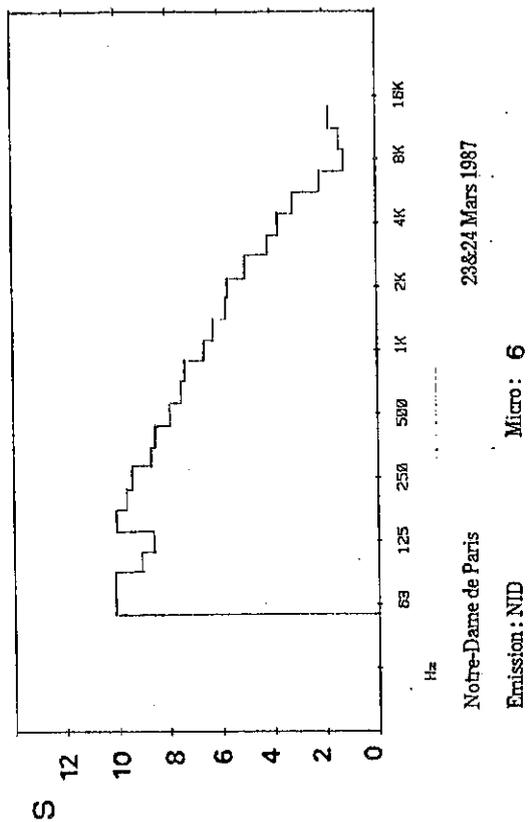
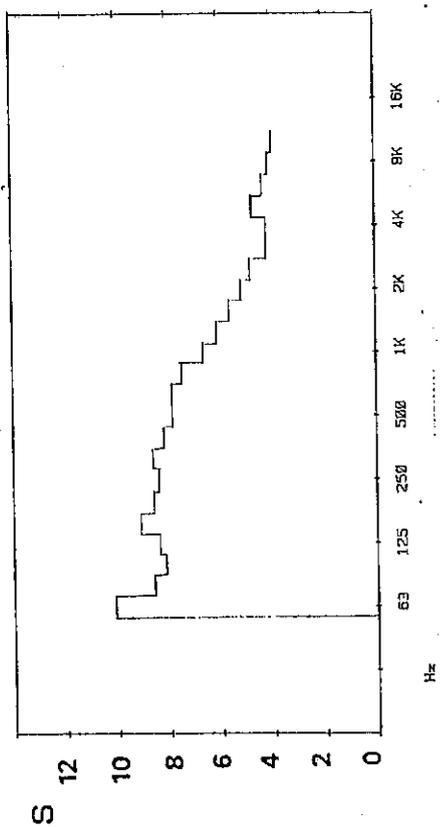
N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



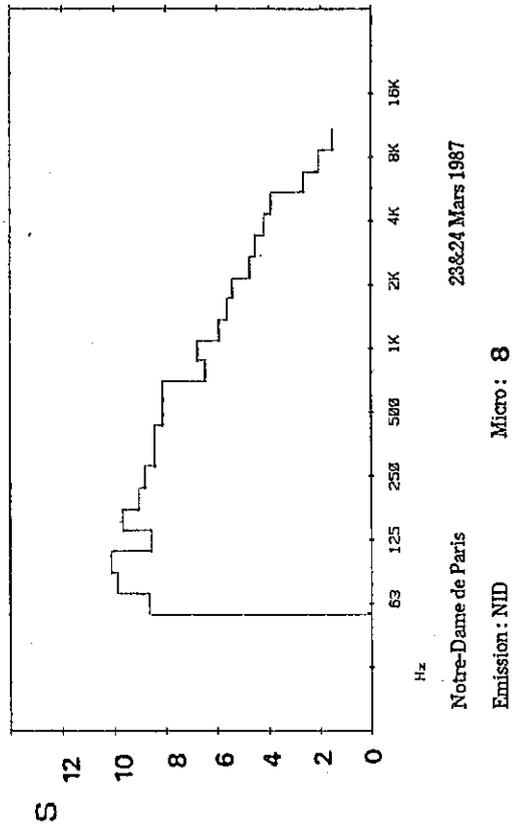
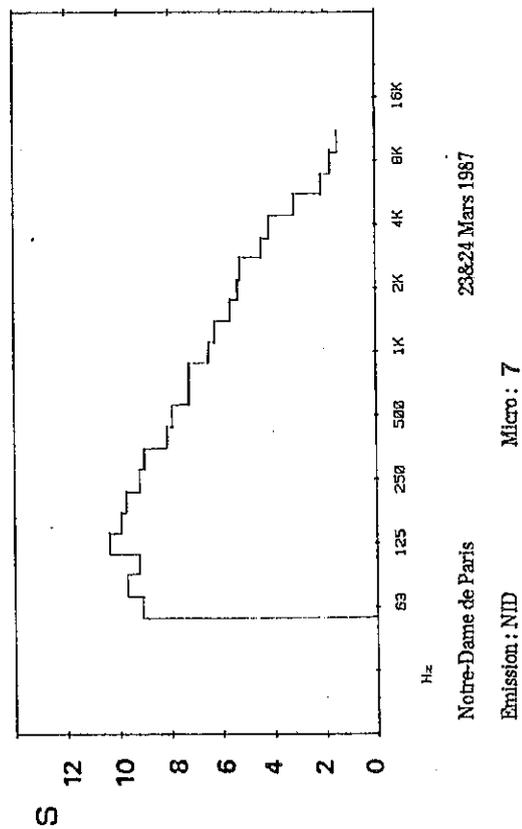
REVERBERATION

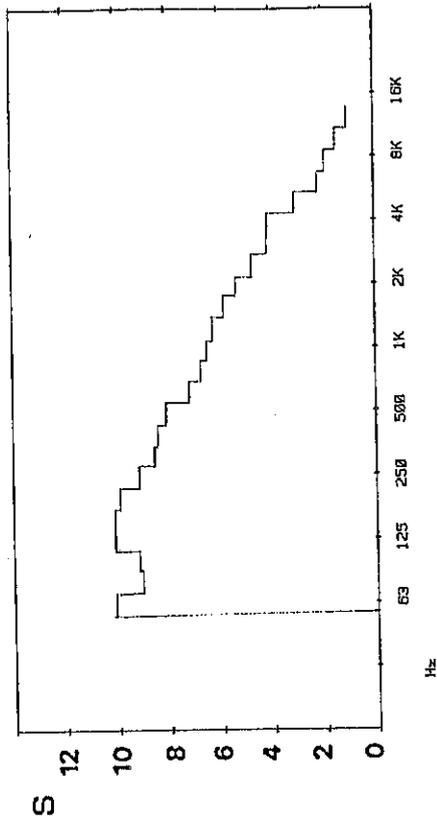


REVERBERATION



REVERBERATION



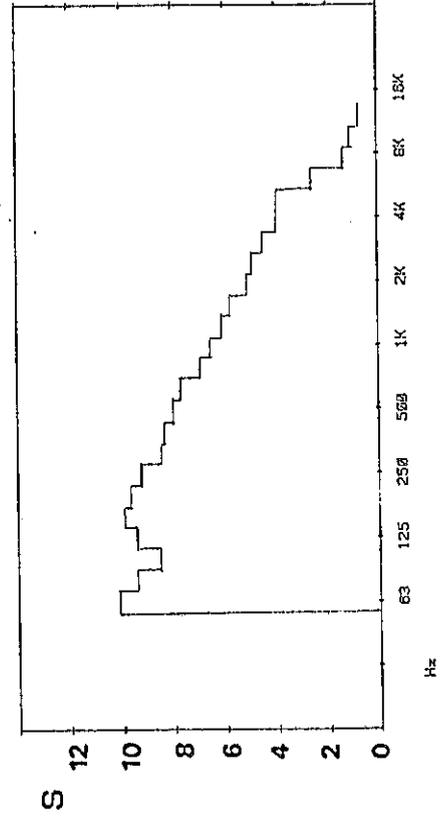


23&24 Mars 1987

Notre-Dame de Paris

Emission : NID

Micro : 10

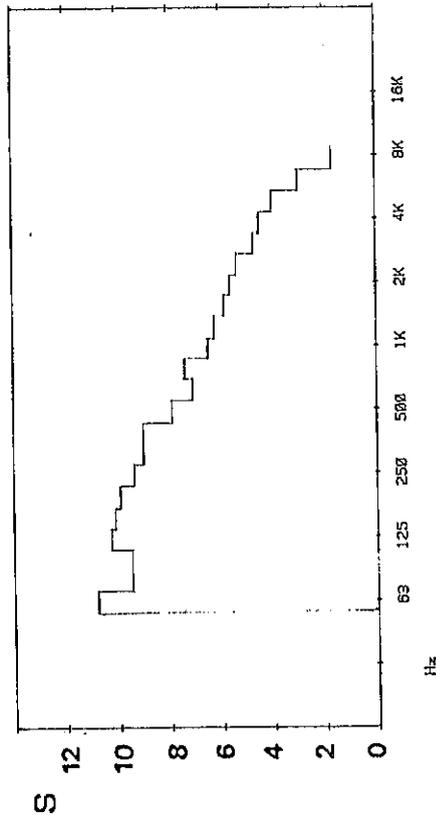


23&24 Mars 1987

Notre-Dame de Paris

Emission : NID

Micro : 12

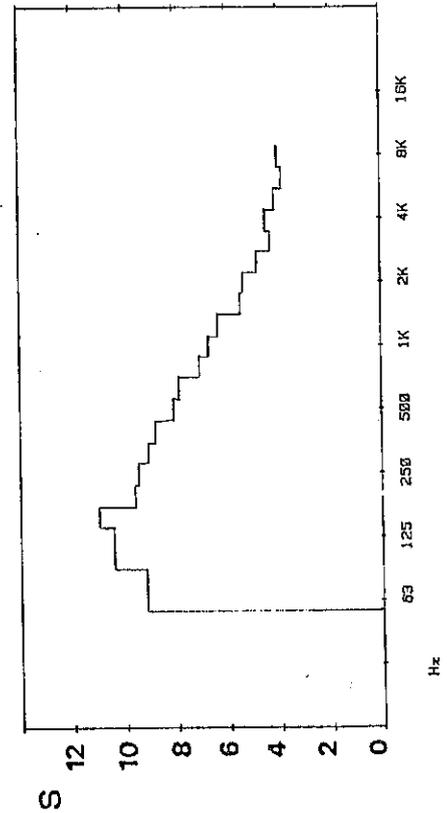


23&24 Mars 1987

Notre-Dame de Paris

Emission : NID

Micro : 9



23&24 Mars 1987

Notre-Dame de Paris

Emission : NID

Micro : 11

Annexe IV

Temps de montée par bandes d'octave.

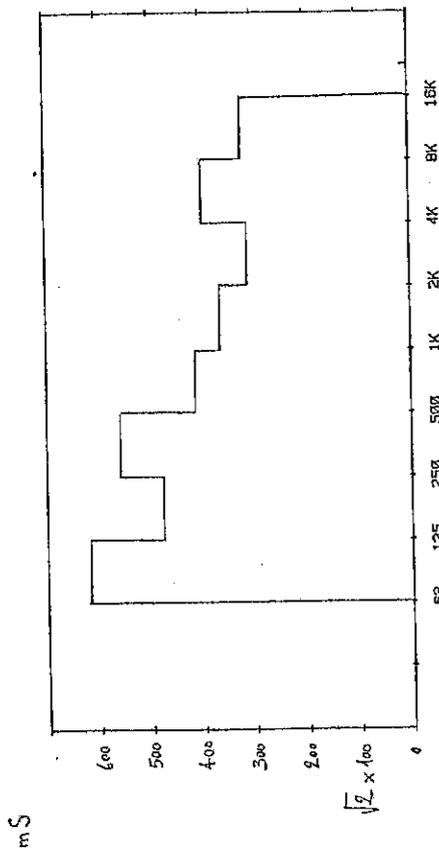
- émission de bruit rose successivement aux trois positions: "Transept", "Croisée" et "Nid".
- réception aux positions 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12 précisées figure 7 (sauf pour l'émission "au Transept" où seules les positions 1,3,5,7,9 ont été étudiées du point de vue du temps de montée)
- largeur de bande : une octave

Chaque courbe représente le temps de montée en millisecondes, pour les bandes d'octave allant de 63Hz à 16kHz.

Ces mesures ont été effectuées au moyen d'un filtre Krohn-Hite associé à un oscilloscope numérique Nicolet.

C'est à partir de ces mesures qu'ont pu être établies les "cartes" des temps de montée présentées figures 11 et 12.

N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



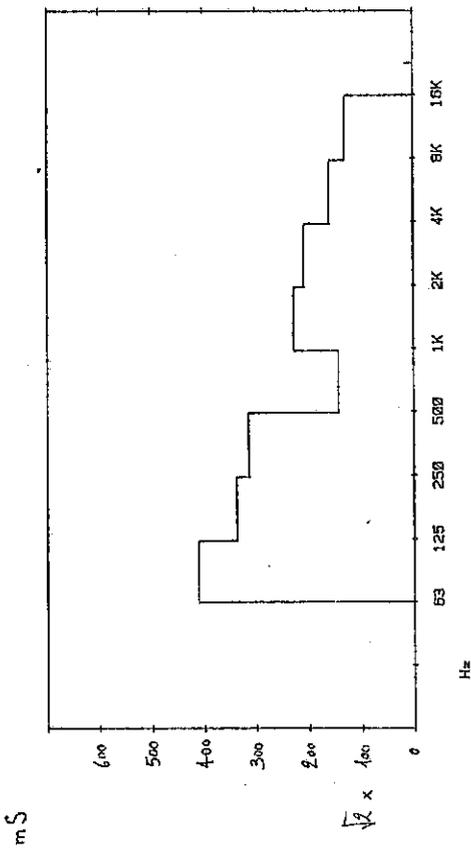
Notre-Dame de Paris 23&24 Mars 1987

Emission : TRANSEPT Micro : 9

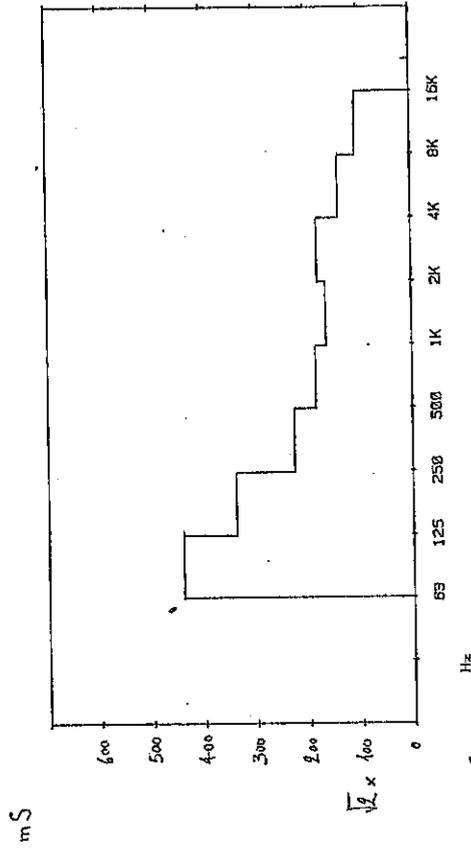
9

TEMPS DE MONTEE

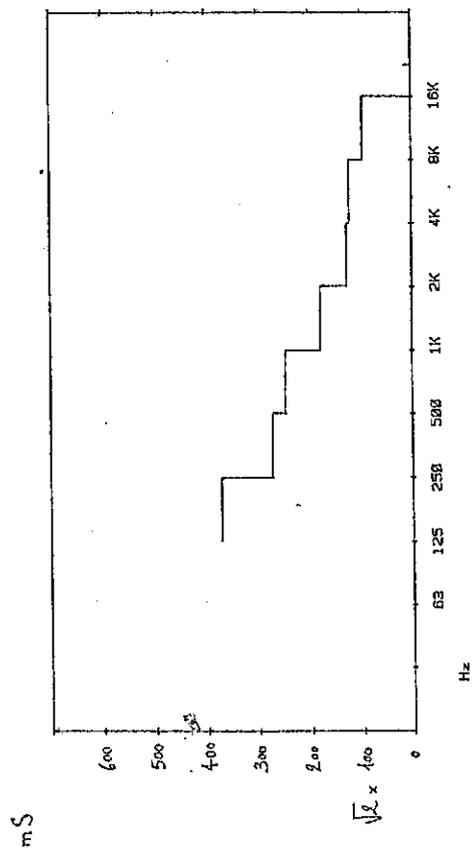
N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



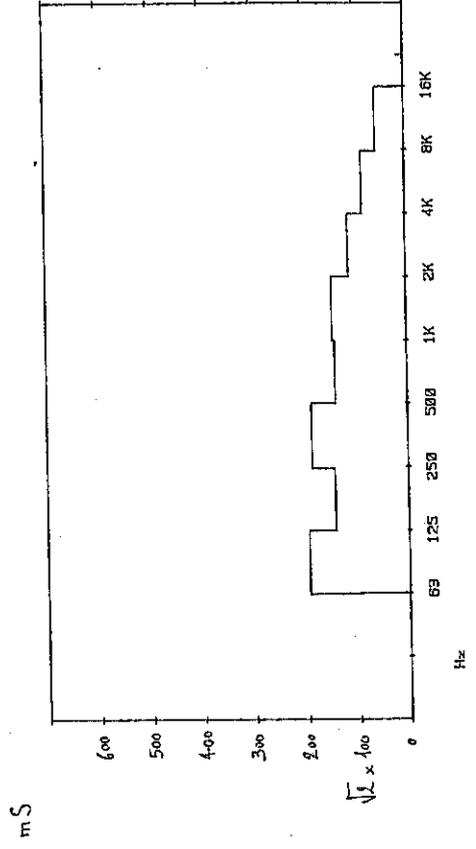
23&24 Mars 1987



23&24 Mars 1987



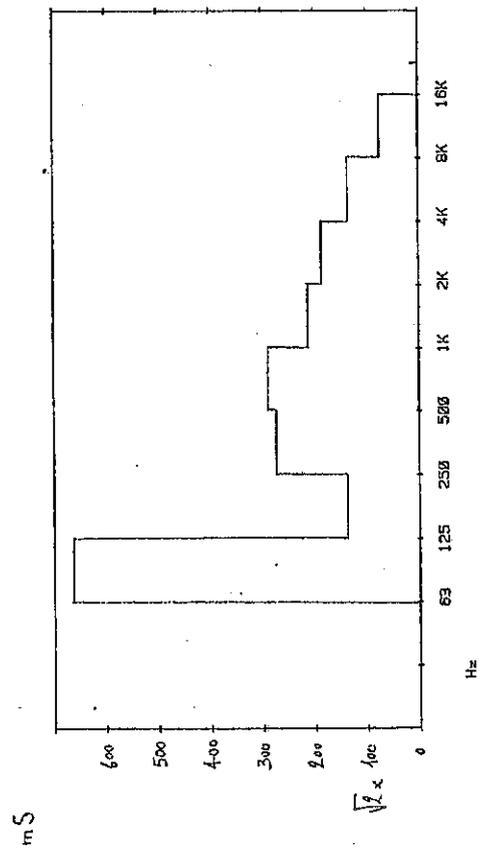
23&24 Mars 1987



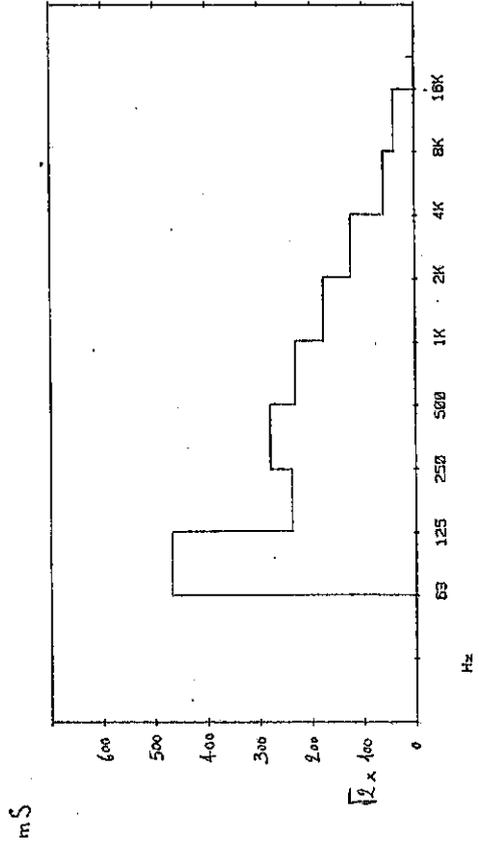
23&24 Mars 1987

TEMPS DE MONTEE

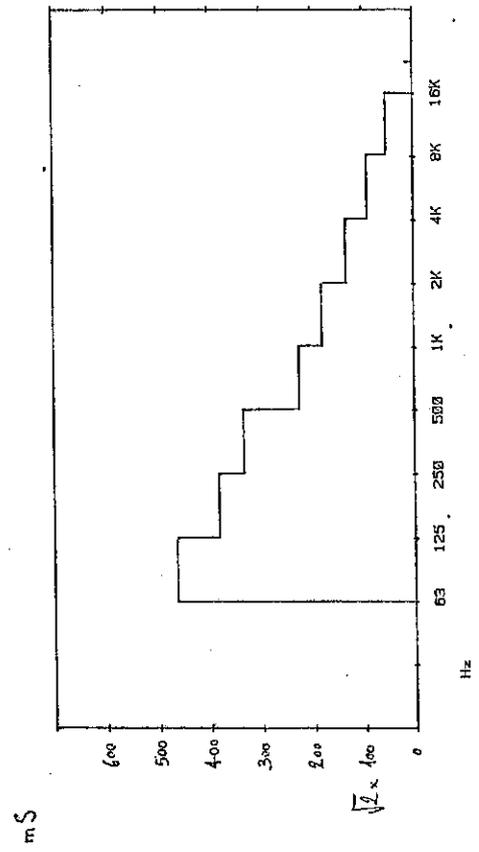
N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



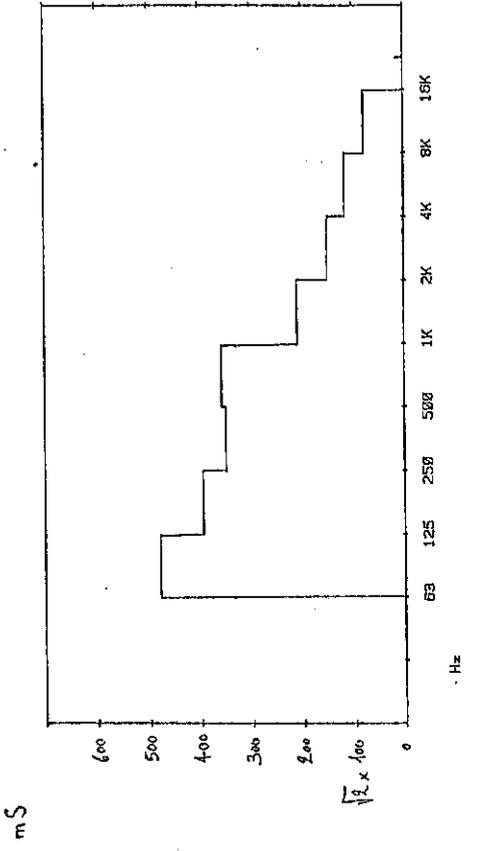
Notre-Dame de Paris
Emission: CROISEE
Micro: 5
23&24 Mars 1987



Notre-Dame de Paris
Emission: CROISEE
Micro: 6
23&24 Mars 1987

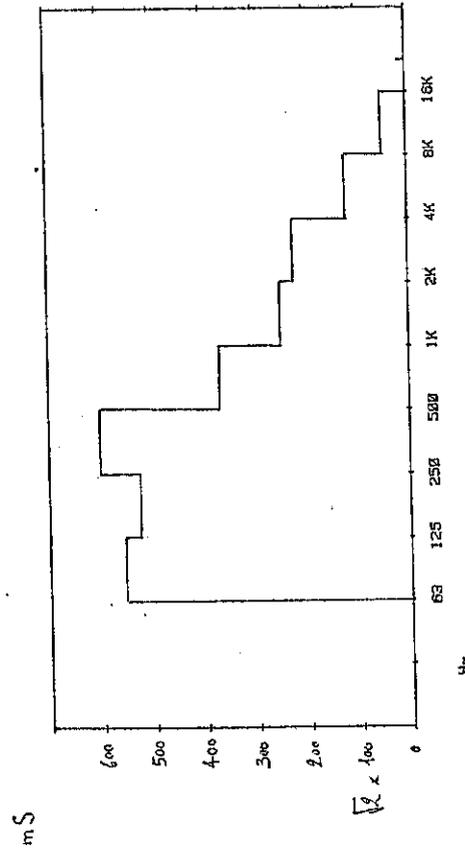
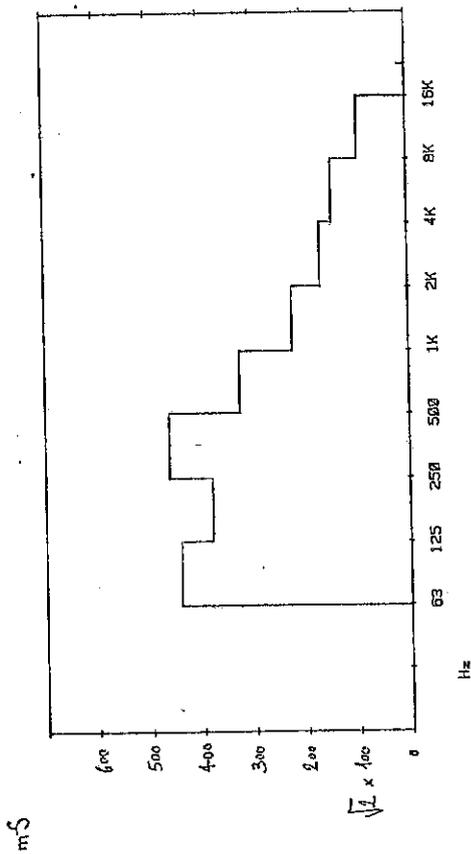
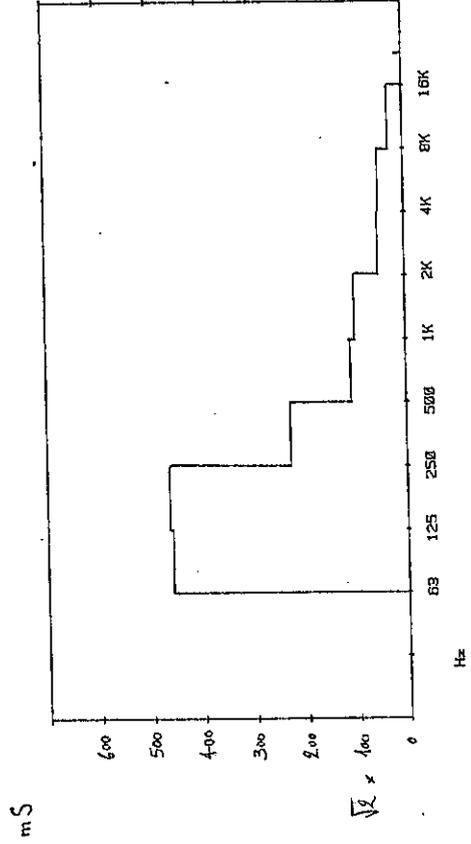
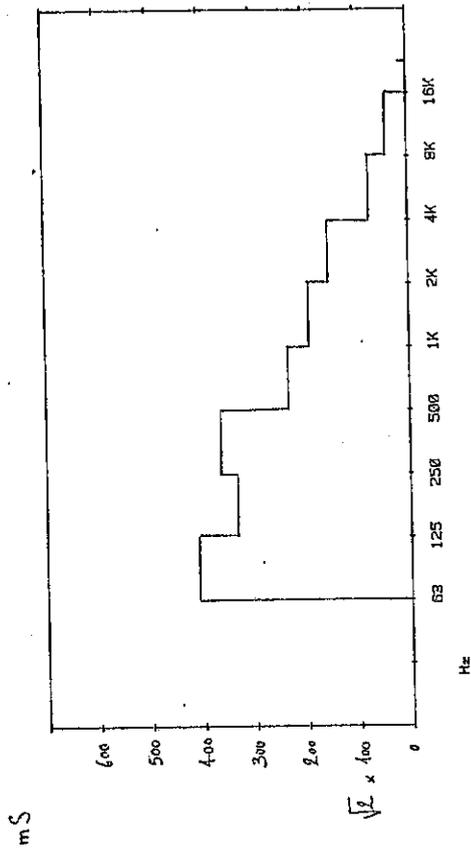


Notre-Dame de Paris
Emission: CROISEE
Micro: 7
23&24 Mars 1987



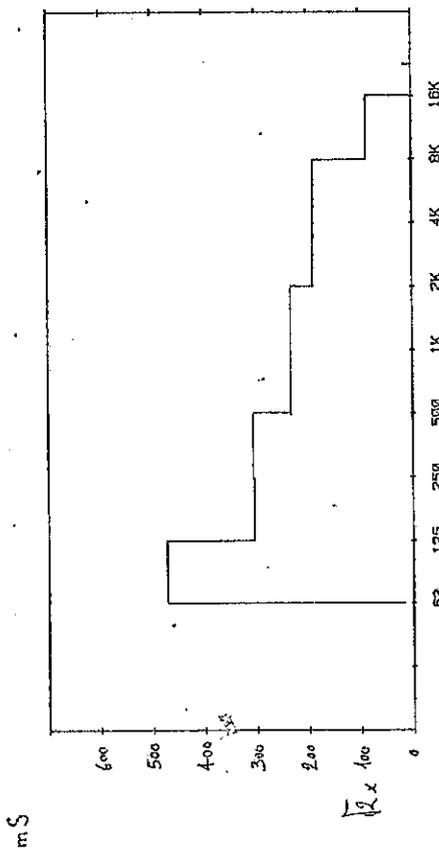
Notre-Dame de Paris
Emission: CROISEE
Micro: 8
23&24 Mars 1987

N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.

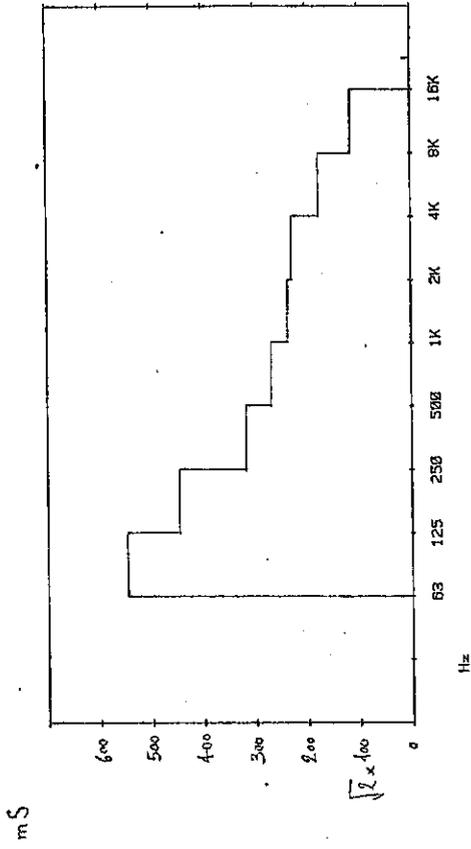


TEMPS DE MONTEE

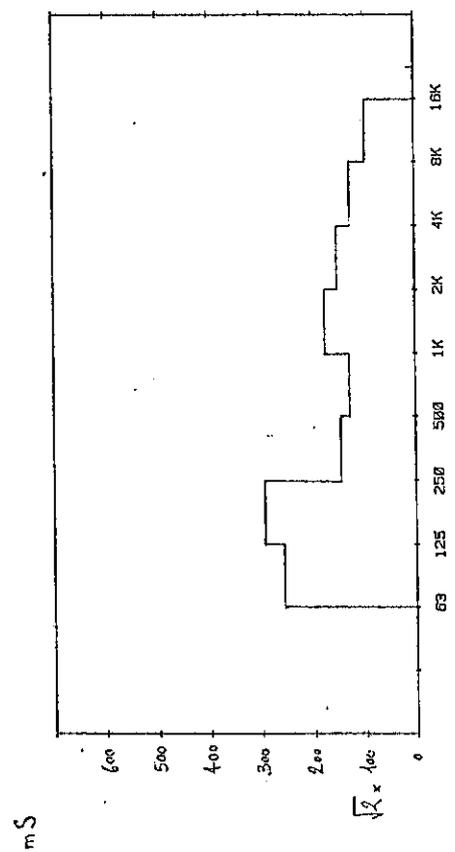
N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



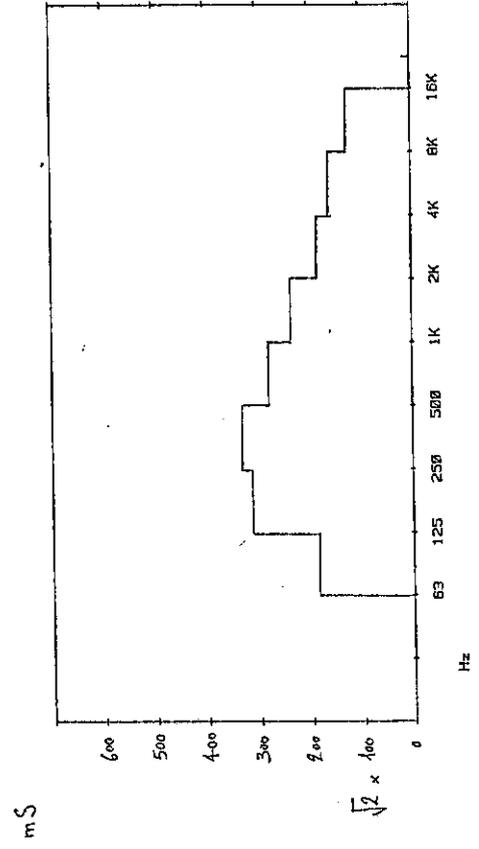
Notre-Dame de Paris
Emission : NID
Micro : 1
23&24 Mars 1987



Notre-Dame de Paris
Emission : NID
Micro : 2
23&24 Mars 1987



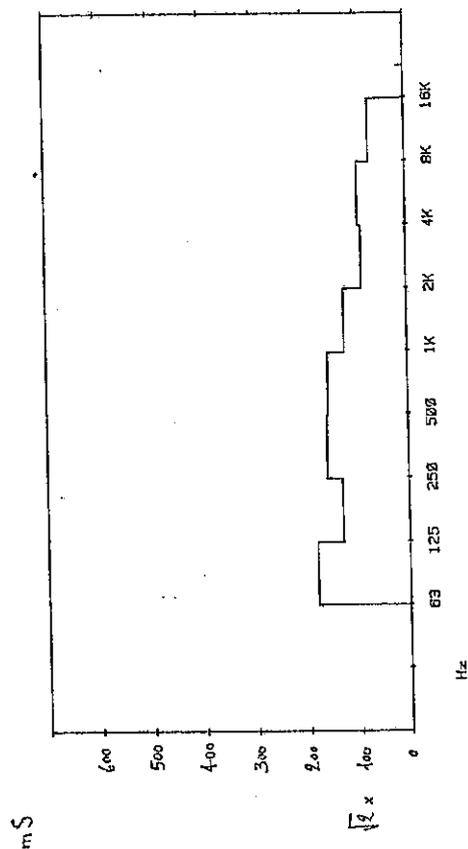
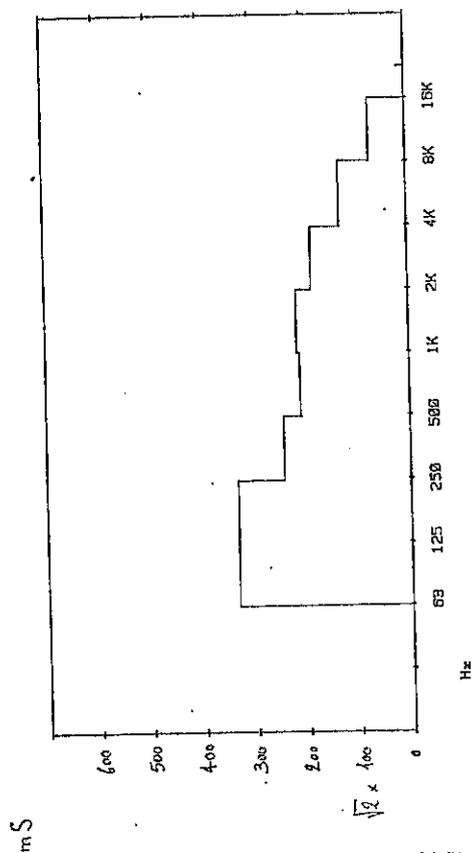
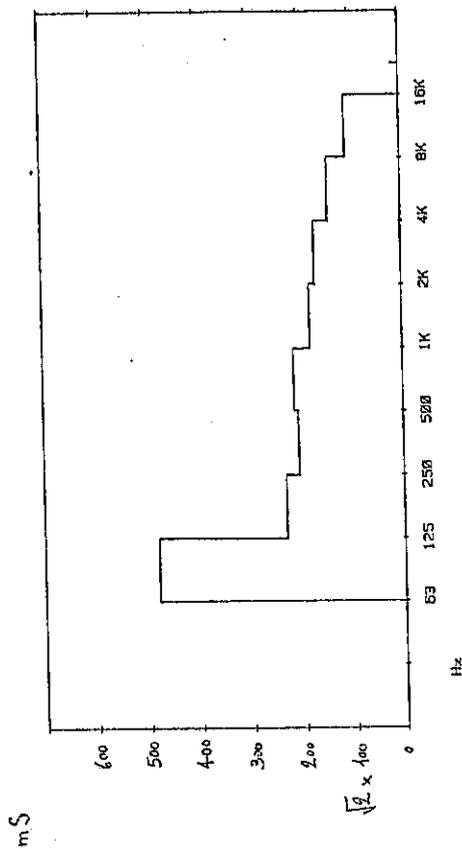
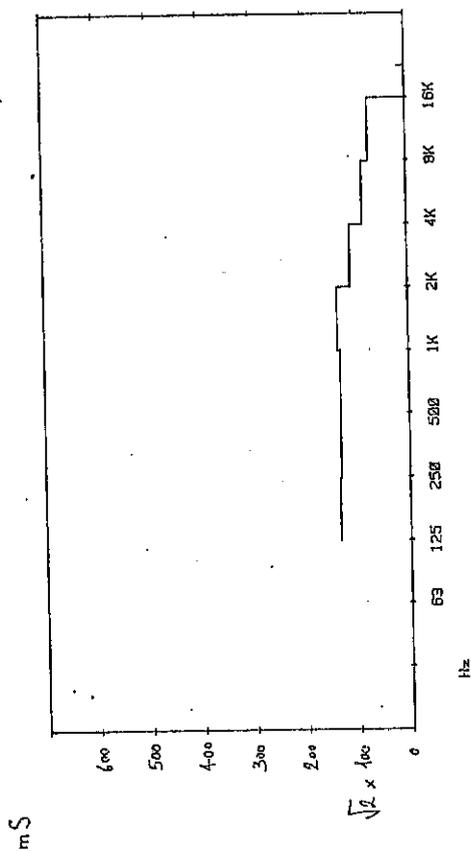
Notre-Dame de Paris
Emission : NID
Micro : 3
23&24 Mars 1987



Notre-Dame de Paris
Emission : NID
Micro : 4
23&24 Mars 1987

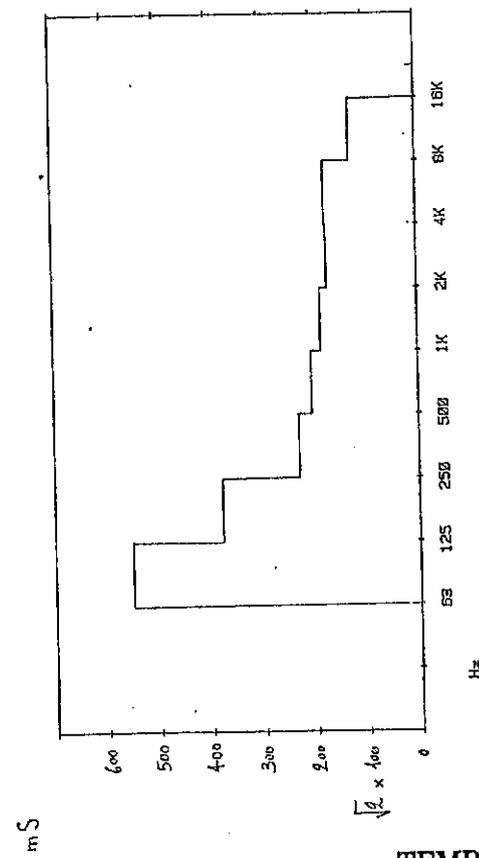
TEMPS DE MONTEE

N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



TEMPS DE MONTEE

N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



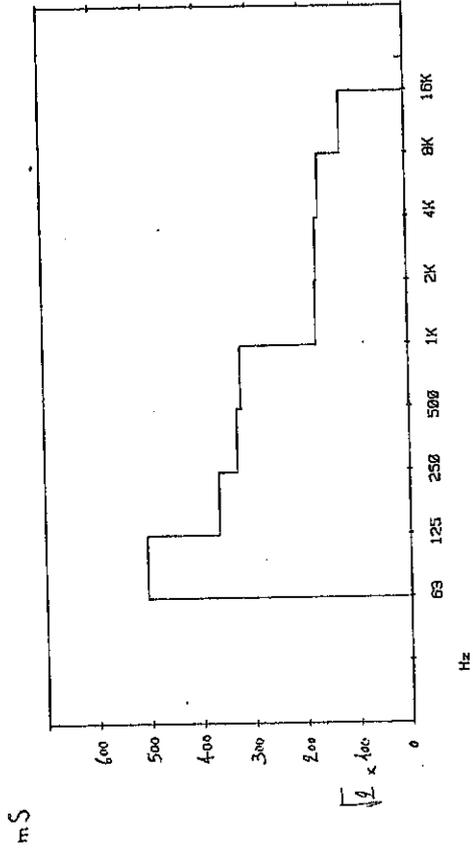
Notre-Dame de Paris

23&24 Mars 1987

Micro: 9

Emission: NID

TEMPS DE MONTEE

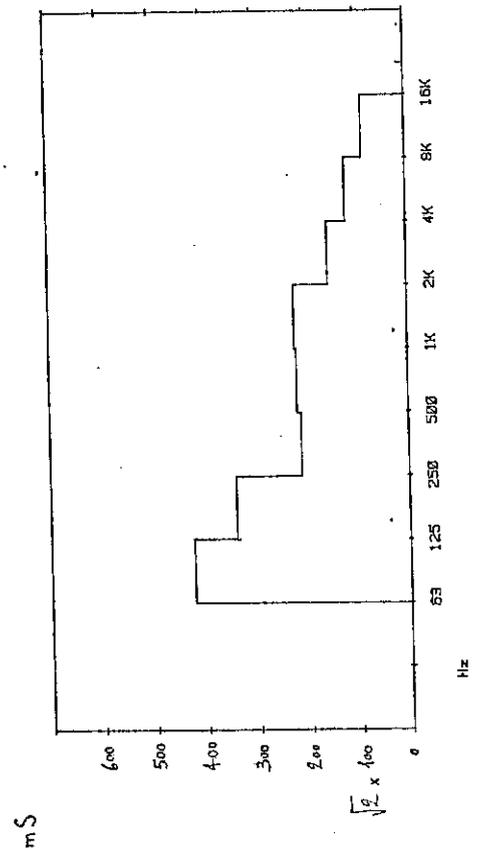


Notre-Dame de Paris

23&24 Mars 1987

Micro: 10

Emission: NID

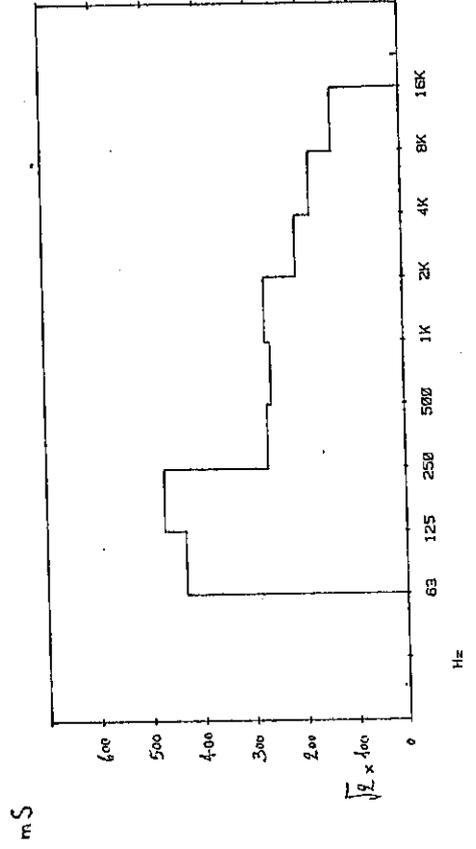


Notre-Dame de Paris

23&24 Mars 1987

Micro: 11

Emission: NID



Notre-Dame de Paris

23&24 Mars 1987

Micro: 12

Emission: NID

Annexe V

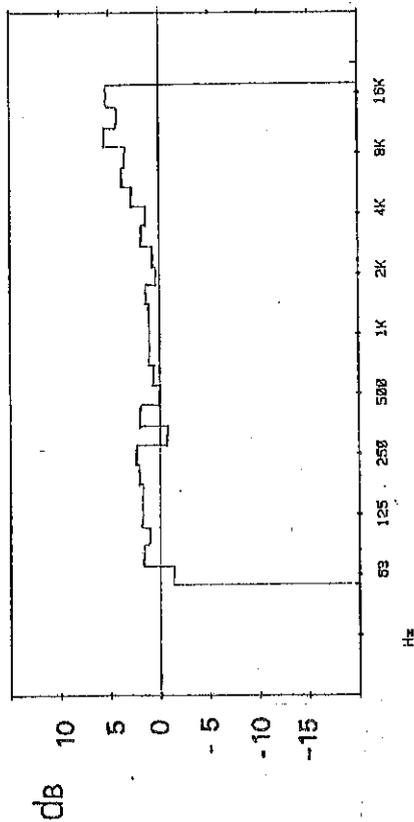
Analyses spectrales : écarts à la moyenne.

- émission de bruit rose successivement aux trois positions : "Transept", "Croisée" et "Nid".
- réception aux positions 1,2,3,4,5,6,8,11 précisées figure 7 (sauf pour l'émission "au Transept" où seules les positions 2,3,5,8 ont été étudiées du point de vue de l'écart à la moyenne)
- largeur de bande: 1/3 d'octave
- moyenne de 8 acquisitions d'environ 250 ms chacune

Sur chaque coube, le trait horizontal passant par 0 dB représente, pour chaque bande de fréquence, la moyenne effectuée sur les huit positions de réception considérées des différences d'intensité entre le spectre émis et le spectre reçu.

Chaque graphique montre l'écart par rapport à cette moyenne constaté à la position considérée.

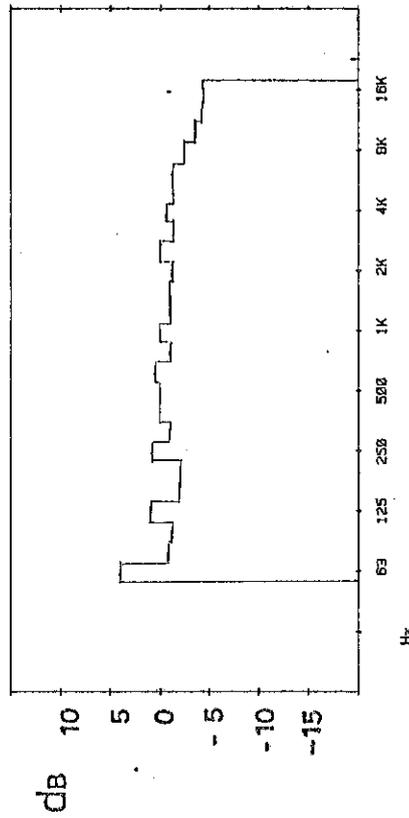
Les valeurs représentées sur ces courbes ont été calculées à partir des courbes d'analyse spectrale présentées en annexe II.



Notre-Dame de Paris
Emission : TRANSEPT

Micro : 2

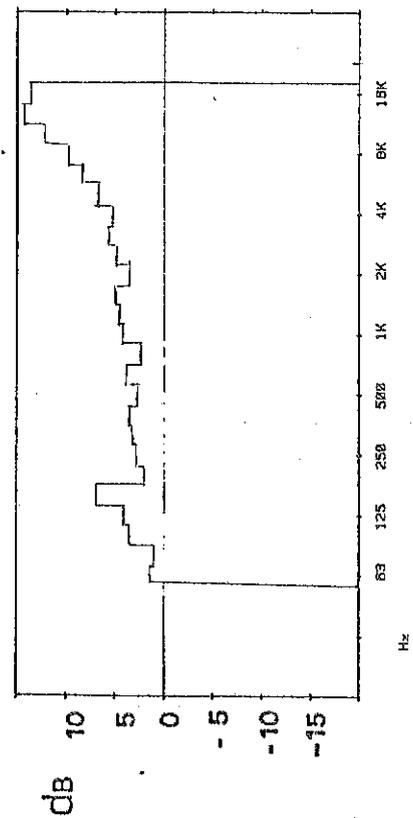
23&24 Mars 1987



Notre-Dame de Paris
Emission : TRANSEPT

Micro : 3

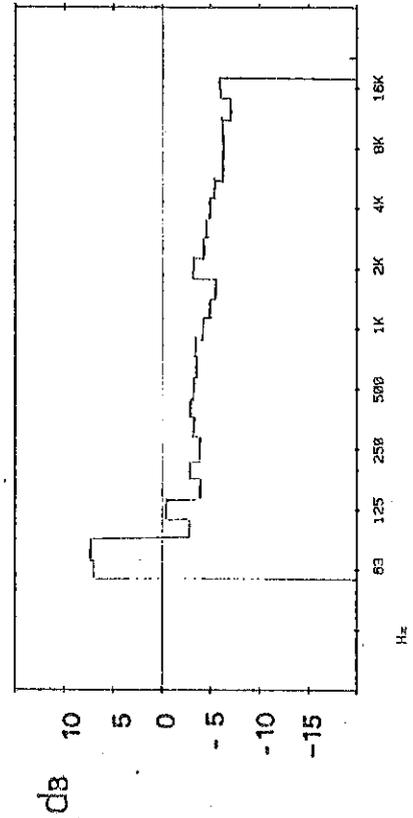
23&24 Mars 1987



Notre-Dame de Paris
Emission : TRANSEPT

Micro : 5

23&24 Mars 1987

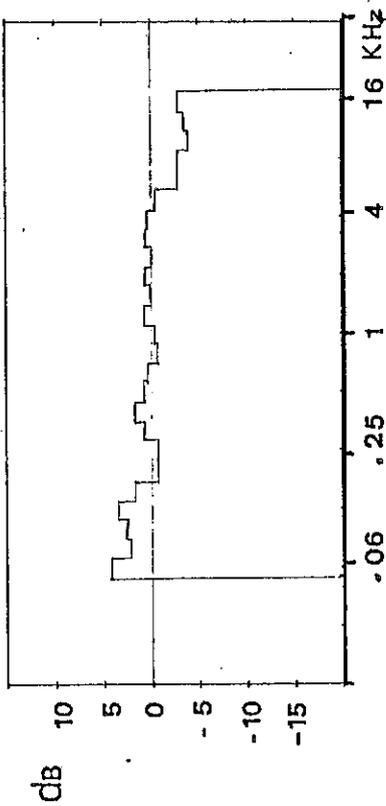


Notre-Dame de Paris
Emission : TRANSEPT

Micro : 8

23&24 Mars 1987

N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.

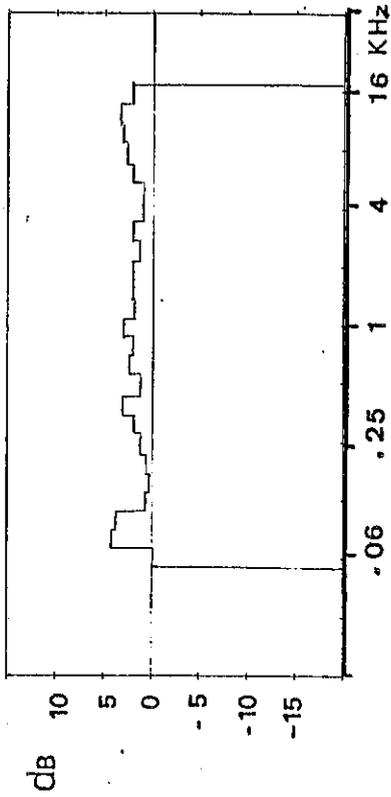


Notre-Dame de Paris

23&24 Mars 1987

Micro : 1

Emission : CROISEE

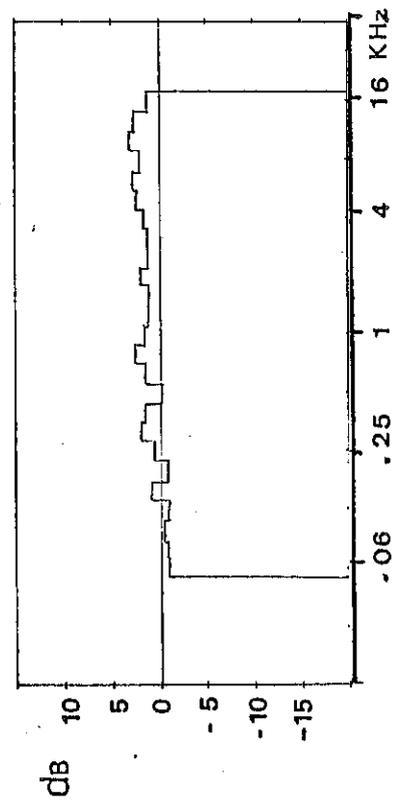


Notre-Dame de Paris

23&24 Mars 1987

Micro : 2

Emission : CROISEE

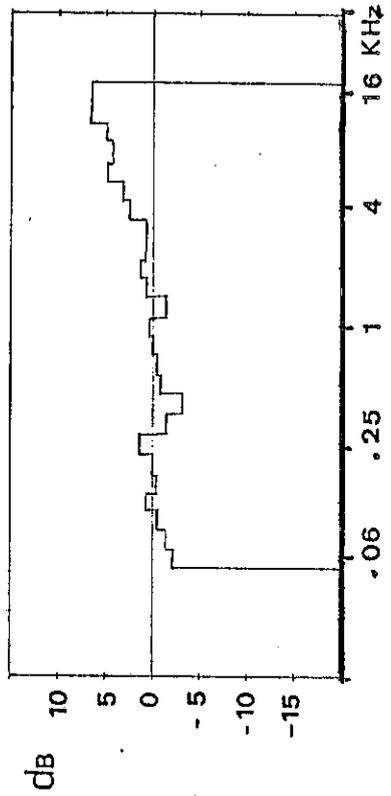


Notre-Dame de Paris

23&24 Mars 1987

Micro : 3

Emission : CROISEE



Notre-Dame de Paris

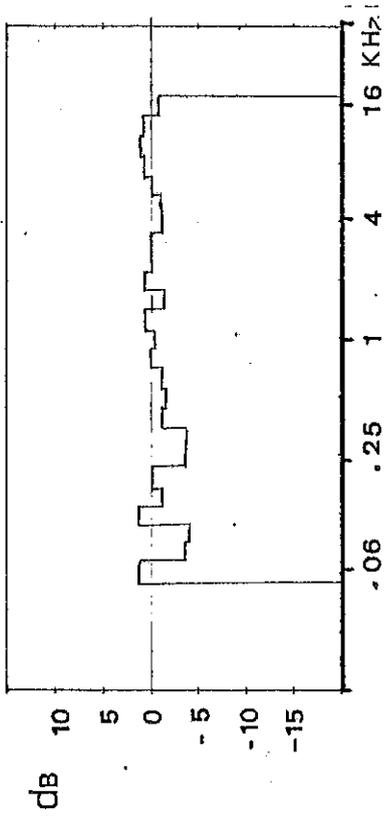
23&24 Mars 1987

Micro : 4

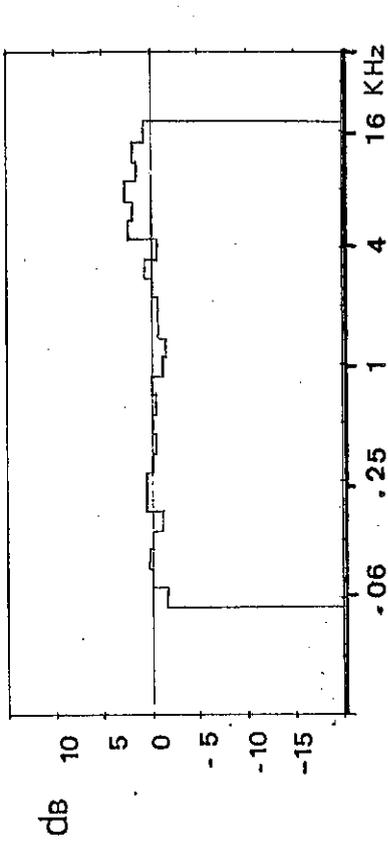
Emission : CROISEE

ANALYSE SPECTRALE : ECART A LA MOYENNE

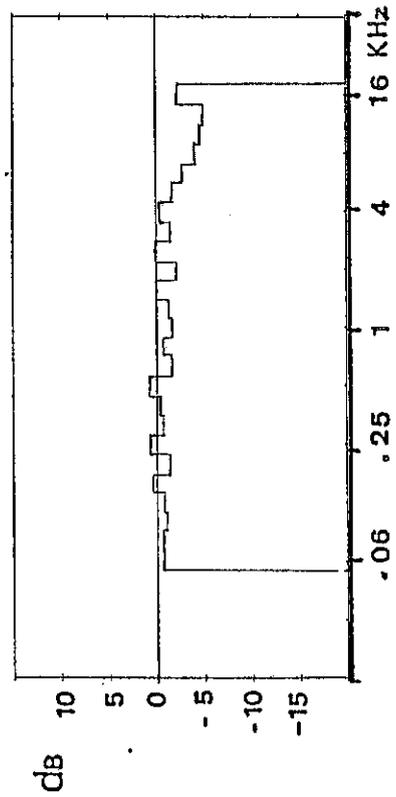
N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



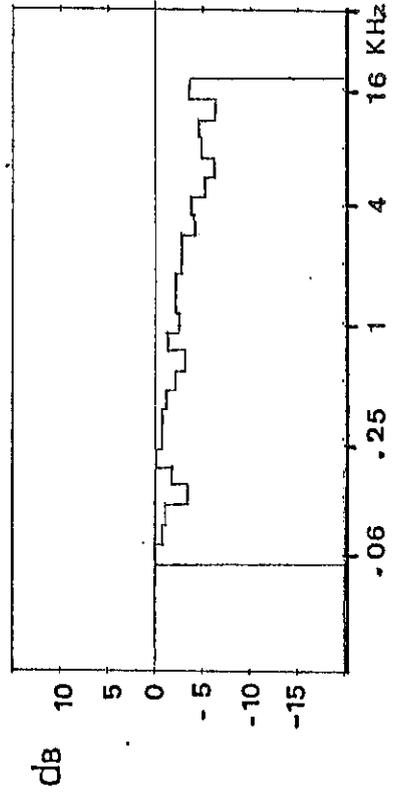
Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 5
23&24 Mars 1987



Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 6
23&24 Mars 1987

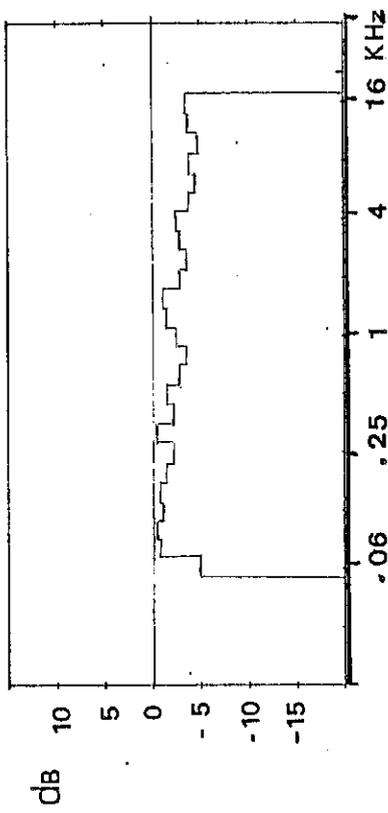


Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 8
23&24 Mars 1987



Notre-Dame de Paris
Emission : CROISEE
Micro : 11
23&24 Mars 1987

N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.

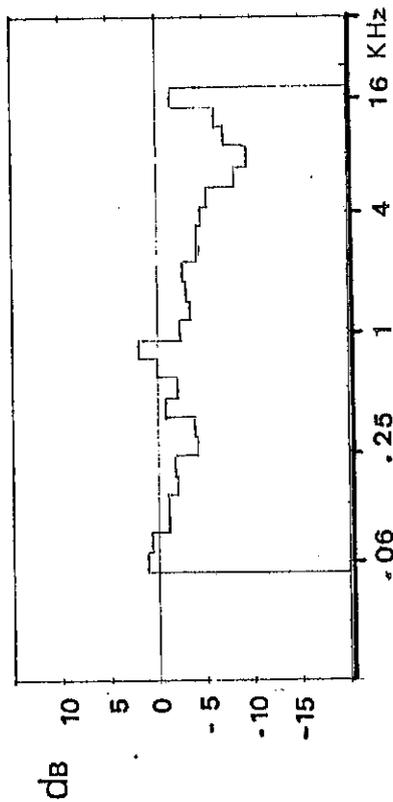


Notre-Dame de Paris

23&24 Mars 1987

Emission : NID

Micro : 2

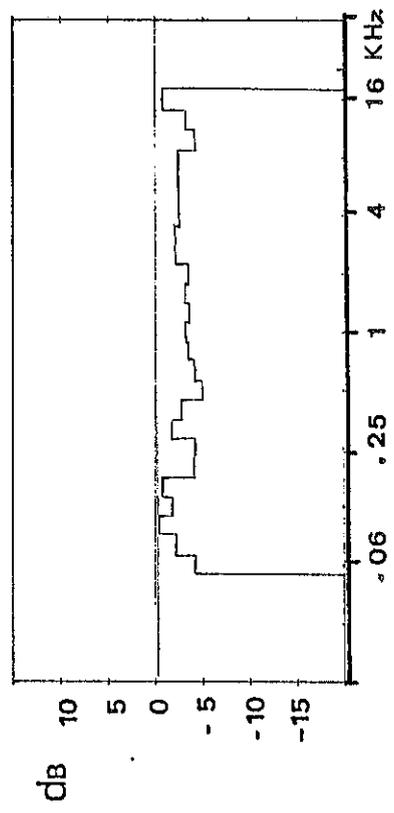


Notre-Dame de Paris

23&24 Mars 1987

Emission : NID

Micro : 1

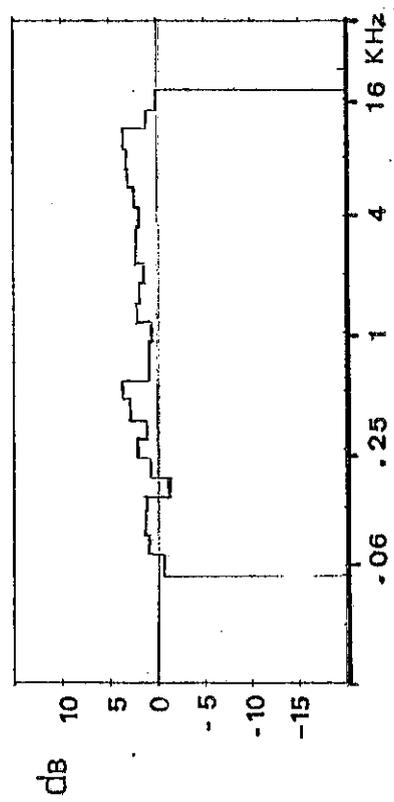


Notre-Dame de Paris

23&24 Mars 1987

Emission : NID

Micro : 4



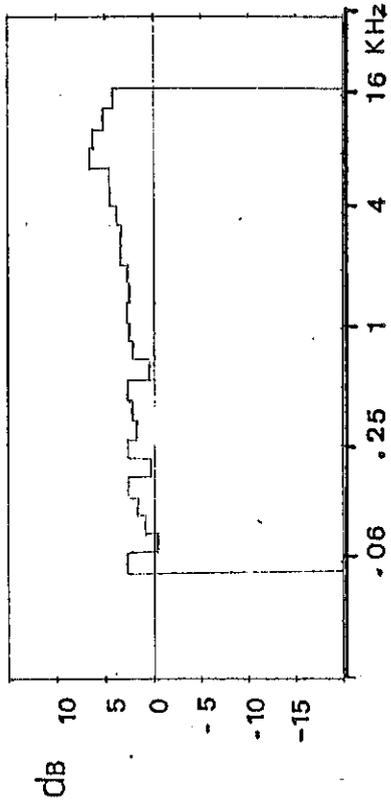
Notre-Dame de Paris

23&24 Mars 1987

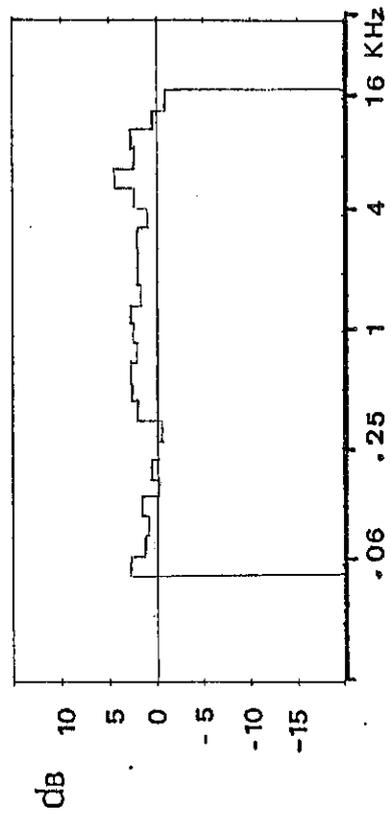
Emission : NID

Micro : 3

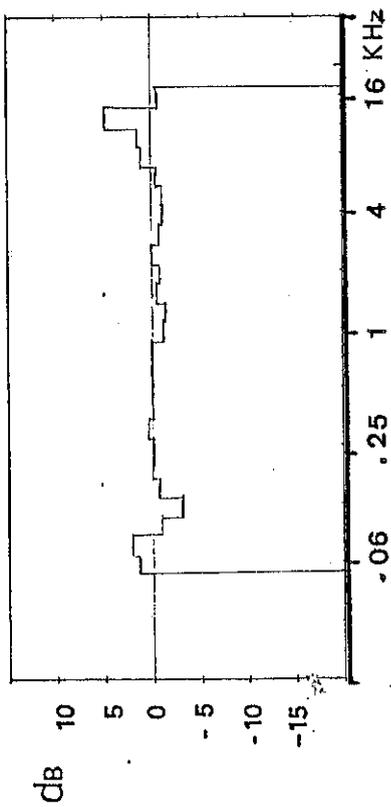
N.D. de PARIS - Etude acoustique pour un nouvel orgue.



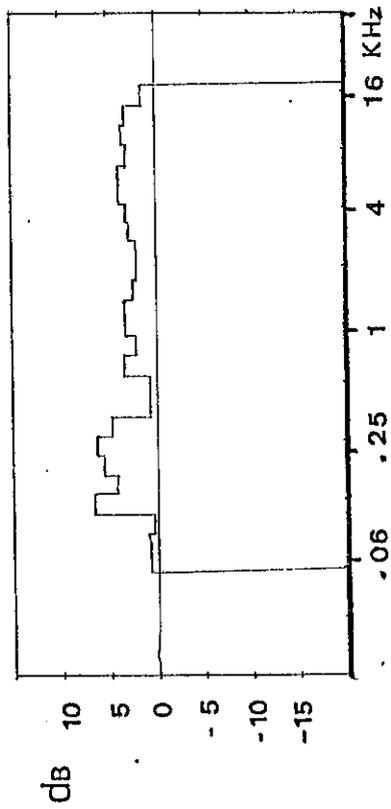
Notre-Dame de Paris
Emission : NID
Micro : 6
23&24 Mars 1987



Notre-Dame de Paris
Emission : NID
Micro : 11
23&24 Mars 1987



Notre-Dame de Paris
Emission : NID
Micro : 5
23&24 Mars 1987



Notre-Dame de Paris
Emission : NID
Micro : 8
23&24 Mars 1987

