

Laboratoire d'Acoustique Musicale
Université Paris 6, CNRS/UMR9945, Ministère de la Culture
Université Paris 6 - Tour 66 - 4 place Jussieu, 75005 Paris

RAPPORT D'ÉTUDE

Cathédrale Saint-Bénigne de Dijon
Orgue de Charles Joseph et Robert Riepp (1745)
restauré par M. Schmid en 1995.

*Etude acoustique de la qualité sonore de jeux
d'anche, par comparaison avec les jeux
correspondants des orgues de Dole, Poitiers et
Saint-Maximin.*

Cathédrale Saint-Bénigne de Dijon

Orgue de Charles Joseph et Robert Riepp (1745) restauré par

M. Schmid en 1995

Rapport d'étude

Introduction -	2
caractÉrisation acoustique des sons musicaux et cadre de l'Étude.....	4
DÉfinition de l'Étude	4
Difficultés soulevées par l'étude.....	4
DÉroulement de l'étude	5
1 - enregistrement	5
1/ Matériel et positionnement.	5
2/ Contenu de l'enregistrement.....	5
3/ Dépouillement des enregistrements.....	6
4/ Jeux sélectionnés pour l'anayse.	7
2 - Analyses acoustiques.....	7
1/ Méthodes d'analyse	7
1 - Analyse au Sonagraph DSP 5500.	7
2 - Analyse harmonique sur ordinateur	7
3 - Analyse basée selon les dimensions perceptives : sonie et acuité.	8
3 - Etude comparee de jeux d'anche	9
1/ Principales caractéristiques des jeux d'anche.	9
2/ Remarques préliminaires.	9
3/ Etude du cromorne.....	10
Document N°1 : Sonagrammes du cromorne -	10
Document N°2 : Intensité du fondamental (harmonique1).....	11
Document N°3 : Intensité des harmoniques 1,3,5,7.....	11
Document N° 4 : Rapport d'intensité entre les harmoniques impairs et pairs.	12
Document N°5 : Valeur du CGS (Centre de Gravité Spectrale)	12
Document N°6 : représentation du C.G.S. normalisé en fonction du rapport harmoniques impairs/harmoniques pairs	13
Document N°7 : Représentation de l'acuité.....	13
Conclusion sur le cromorne.....	13
3/ Etude des trompettes du positif.....	14
Document N°8 - Sonagrammes de la trompette du positif - Toutes les notes.	14

Document N°9 : Intensité du fondamental; comparaisons par paires.	14
4/ les trompettes du grand orgue	15
Document N°10 : Sonagrammes des trois trompettes du grand orgue de Dijon et Sonagrammes des deux trompettes de Dole	15
Document N° 11 : CGS non normalisé	15
5/ trompette et clairon de pédale	16
Document N°12 : Sonagrammes des deux octaves, Dole et Dijon.....	16
Document N°13 : Trompette de la pédale, comparaison Dole et Dijon	16
Conclusion Générale.	17
Bibliographie.....	19
ANNEXES	21
Liste des documents.....	22
Correspondance des notes.....	24
Documents : sonagrammes et graphiques	26

INTRODUCTION -

Sur la demande du Technicien-conseil Monsieur J.M. Meignien nous nous sommes rendus à la Cathédrale Ste Bénigne de Dijon en compagnie de Monsieur Clerc, organiste, pour y effectuer des enregistrements sonores permettant de procéder à quelques analyses acoustiques.

M. Chapis nous y a rejoint l'après-midi, et nous avons enregistré quelques pièces musicales. Toutefois, il nous est rapidement apparu qu'il serait difficile de retrouver des enregistrements de l'instrument antérieurs au démontage, enregistrements qui seraient musicalement comparables (même musique, même registration, même organiste, même prise de son) .

Etant donné que le Rapporteur Michel Chapis, demande par ailleurs qu'une comparaison soit établie entre l'orgue de la cathédrale de Dijon et d'autres instruments français de la même époque, et compte tenu de l'urgence de la situation, nous avons décidé de focaliser notre étude sur un point particulièrement sensible, signalé par les organistes et les techniciens conseils présents le 23 Novembre 1995, à savoir la qualité acoustique des jeux d'anche.

Le laboratoire d'Acoustique Musicale ayant déjà enregistré et analysé les jeux de plusieurs instruments historiques de référence nous présentons donc dans la suite de ce rapport une étude comparant les jeux d'anche de l'orgue de l'orgue de Dijon à ceux des instruments suivants :

- Orgue Riepp de la Collégiale de Dole (1754) enregistré en 1989.
- Orgue Isnard de la Basilique de St Maximin (1794) enregistré en 1992, après restauration (Cabourdin).
- Orgue F.H. Clicquot de la Cathédrale de Poitiers (1791) enregistré en 1995 après restauration (Boisseau).

Michèle Castellengo

Directrice du L.A.M.

Membre de la 5ème section de la Commission
Supérieure des Monuments Historiques

CARACTÉRISATION ACOUSTIQUE DES SONS MUSICAUX ET CADRE DE L'ÉTUDE

DÉFINITION DE L'ÉTUDE

Les techniques d'enregistrement et d'analyse des sons permettent aujourd'hui de rendre compte de manière objective de la complexité et de la richesse du contenu physique des sons musicaux.

La correspondance entre les différents paramètres acoustiques du son et les avis qualitatifs portés par les auditeurs fait actuellement l'objet d'un d'études nombreuses dans plusieurs centres de recherches, et constitue un des axes prioritaires de notre laboratoire. La méthodologie comporte d'une part des analyses acoustiques et d'autre part des tests comparatifs d'écoute menés avec un grand nombre de sujets. Le dépouillement de ces différents tests (similarité, différentiel sémantique, catégorisation) permet d'établir des correspondances entre les données physiques et la perception des auditeurs. Devant l'ampleur du travail à réaliser et le court laps de temps qui nous était imparti, nous avons dû renoncer, dans un premier temps, aux tests psychoacoustiques.

L'objectif de notre travail s'est ainsi défini : recueillir dans les instruments considérés comme références de qualité de "l'orgue classique français", les enregistrements de jeux d'anche dont nous pourrions comparer les analyses à celles de l'orgue de Dijon. Ainsi formulé notre travail se situe dans le domaine totalement objectif de l'analyse acoustique.

DIFFICULTÉS SOULEVÉES PAR L'ÉTUDE

a) Il faut analyser toutes les notes d'un jeu d'orgue.

Plusieurs études existent sur la caractérisation des sons d'orgue qui ne prennent en compte qu'une note de chaque jeu, par exemple l'ut3 de bourdon, l'ut3 de montre, l'ut3 de gambe [16]. D'autres sont fondées sur le spectre moyenné de trois demi-tons successifs joués simultanément [11]. Nous sommes les premiers à avoir affirmé la nécessité de prendre en compte individuellement toutes les notes d'un jeu. afin d'étudier l'évolution des caractéristiques acoustiques en fonction de la tessiture [8]

b) Les diverses notes d'un jeu ne sont pas strictement semblables.

L'analyse des notes successives d'un jeu d'orgue venant d'être parfaitement bien harmonisé montre des différences d'une note à l'autre. Deux notes voisines n'ont pas exactement le même spectre. Cette variabilité, inhérente aux divers sons d'un instrument traditionnel, est un des éléments du charme et de l'originalité d'un instrument donné, tant qu'elle ne dépasse pas un certain taux. Une inhomogénéité trop grande est rapidement perçue et suscite une réharmonisation. Les divers instruments que nous avons comparés présentaient des taux de variabilité différents.

Il faut donc extraire de la variabilité intrinsèque, les caractéristiques acoustiques communes à toutes les notes d'un jeu, ce qu'un auditeur expert fait aisément, et traduit par des qualificatifs comme "chaud, clair, nasal" etc.

c) Les instruments que nous comparons diffèrent à plusieurs titres.

Les études antérieures que nous avons effectuées ont eu pour objet de comparer un instrument donné, avant et après restauration. Le seul problème à résoudre pour assurer une comparaison pertinente étant alors celui de la prise de son qui doit être totalement reproductible, même à plusieurs années de distance, les autres paramètres : acoustique du lieu, position de l'instrument, (!) étant supposés stables.[4]

Pour éliminer au mieux les variables présentes : niveau d'enregistrement, distance à l'instrument, caractéristiques acoustiques du lieu, nous avons eu recours à des analyses permettant de comparer des rapports d'intensité.

DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE

1 - ENREGISTREMENT

1/ Matériel et positionnement.

L'enregistrement a été réalisé avec un magnétophone DAT professionnel (type HHB) et deux microphones électrostatiques (type Schoeps) omnidirectionnels.

Nous avons placé les microphones face à l'instrument, à la distance du deuxième pilier de la nef situé immédiatement après l'aplomb de la tribune. Le câble tendu entre ces deux piliers a permis de se positionner à peu près au milieu de la façade du positif [voir photo]. Cette situation est comparable à celle que nous avons précédemment adoptée pour les autres instruments.

2/ Contenu de l'enregistrement

1 - Pièces d'orgue jouées par Michel Chapuis. Nous avons enregistré successivement

- un plein jeu à la Balbastre.
- le grand jeu du livre d'orgue de Clérambaut.
- le cromorne en taille de la messe des paroisses de F. Couperin.

Comme nous l'avons déjà évoqué ces enregistrements ne pourront pas être comparés avec des enregistrements antérieurs, mais l'écoute en situation musicale nous a permis d'orienter le choix des jeux à analyser.

2 - Gammes chromatiques.

Nous avons enregistré individuellement tous les jeux d'anche présents, excepté ceux du récit expressif.

Le protocole que nous avons défini, dès la première mission à Saint-Maximin en 1986 [cf 4] est le suivant.

Gammes chromatiques commençant par la note supérieure; jeu détaché; deux vitesses de jeu. Gamme lente, 42 à la noire et gamme rapide quatre fois plus vite. Par assurer la meilleure comparaison possible avec l'orgue de Dole, nous pouvions écouter à tout moment l'enregistrement des jeux de cet instrument, sur un deuxième magnétophone DAT.

L'enregistrement ayant dû être fait dans la journée, nous avons effectué deux prises, une à 15h et une à 17h pour compenser certains bruits produits dans la nef.

3/ Dépouillement des enregistrements.

Le travail en laboratoire a consisté en plusieurs étapes.

Ecoute, dépouillement écrit et indexation de la cassette enregistrée à Dijon.

Sélection et copie des séquences enregistrées sur les jeux d'anche.

Ecoute comparée alternative des jeux similaires à Dijon et à Dole (Cromorne du positif, Trompette du positif etc). A cette étape, il est rapidement apparu que l'enregistrement dont nous disposions pour l'orgue de Dole, présentait en plusieurs endroits des inégalités reflétant l'état de l'instrument au moment de notre visite. Il est alors décidé d'élargir le corpus des orgues.

Sélection et copie des jeux comparables à Poitiers et à St Maximin. Nous choisissons l'état "après restauration". En ce qui concerne Poitiers, il s'agit d'une période particulière (Janvier 95), avant la mise en place complète de la nouvelle soufflerie, mais les analyses, comme on le verra sont très pertinentes.

Constitution d'une bande rassemblant les jeux à comparer sur les différents instruments. Dès les premières analyses acoustiques nous constatons pour Dijon, un important bruit de fond localisé dans les très basses fréquences qui peut gêner la lecture

des documents. Pour réduire ce bruit dû à la circulation automobile, nous appliquons à toute la cassette, donc à tous les orgues, un filtrage des fréquences inférieures à 45 Hz.

4/ Jeux sélectionnés pour l'anayse.

L'écoute comparée des enregistrements nous a conduit à sélectionner les jeux suivants que nous avons retenu

- a) Le cromorne du positif (Dijon, Dole, Poitiers, St Maximin)
- b) La trompette du positif (Dijon, Dole, Poitiers, St Maximin)
- c) Les trompettes du Grand Orgue (Dijon et Dole)
- d) Trompette et clairon de la pédale (Dijon et Dole)

Le hautbois ne parlait pas. Quand à la voix humaine, trop particulière dans sa facture, elle ne pouvait pas être comparée à celles que nous avons déjà enregistrées sur les autres instruments.

2 - ANALYSES ACOUSTIQUES.

1/ Méthodes d'analyse

Nous avons utilisé trois méthodes d'analyse, chacune permettant d'extraire des paramètres acoustiques différents et souvent complémentaires.

1 - Analyse au Sonagraph DSP 5500.

Cet appareil numérique qui comporte deux processeurs spécialisés de traitement du signal acoustique, permet d'obtenir plusieurs types de représentations visuelles du son.

- Le **sonagramme** qui figure l'évolution de la fréquence et de l'intensité en fonction du temps et permet d'obtenir une image synthétique de l'évolution de toutes les notes du jeu sur un seul document. Deux gammes d'analyse ont été retenues : 8000Hz (toute la tessiture) et 4000 Hz pour les sons graves (octaves graves des 8' et 16').

- Le **spectre** qui permet de chiffrer, pour une note donnée, les amplitudes relatives de ses harmoniques.

2 - Analyse harmonique sur ordinateur

L'analyse se déroule sur un micro ordinateur équipé d'une carte d'acquisition (OROS - AU20). Le programme d'analyse a été développé au laboratoire par Benoît. Fabre pour l'étude des caractéristiques sonores du cornet d'orgue [8] et complété par C.Piron [13]. Il comporte les étapes suivantes.

- l'acquisition sonore d'une gamme chromatique complète (70 secondes), fréquence d'échantillonnage 32 KHz.

- La recherche des dates du début de chaque note (programme attak)

- L'analyse de l'amplitude des harmoniques de chaque note (programme ana). La fréquence de la première note ayant été donnée, le programme calcule celle des suivantes selon les rapports de fréquence du tempérament égal. Lorsque l'accord de l'orgue est manifestement inégal, on introduit manuellement les fréquences des 12 premières notes de la partition (programme anainég). Le filtrage appliqué est très étroit (4ème ordre).

Sur la base des données ainsi obtenues il est alors possible de construire différentes représentations graphiques montrant l'évolution de paramètres choisis en fonction de la tessiture.

a) **Intensité** (en dB) d'un ou de plusieurs harmoniques.

b) **Rapports d'intensité** de certains harmoniques. Par exemple le fondamental par rapport à tout le spectre, ou bien le rapport des harmoniques pairs aux harmoniques impairs;.

c) **CGS ou Centre de Gravité Spectrale**. Ce paramètre permet de localiser la position du maximum d'énergie du spectre d'une note. De nombreuses études ont montré qu'on peut établir une bonne correspondance entre la valeur du CGS et le caractère de "brillance" des sons [3 et 10]. Le CGS peut être exprimé de deux façons différentes. Exprimé en Hz il permet d'interpréter directement le résultat en fonction de la zone de plus grande sensibilité de l'oreille et donne une comparaison immédiate avec le sonagramme. Exprimé par référence à la fréquence du fondamental de la note analysée, il indique sur quel numéro d'harmonique se situe le maximum d'intensité du spectre.

d) **Trajectoire du CGS dans le plan I/P**. Cette représentation combine l'évolution du rapport d'énergie des harmoniques impairs aux harmoniques pairs, en fonction du centre de gravité spectrale normalisé, et convient particulièrement bien à la caractérisation du cromorne.

3 - Analyse basée selon les dimensions perceptives : sonie et acuité.

Les enregistrements numériques sur DAT de Dijon et Dole ont été directement transférés sur un ordinateur NeXT à l'IRCAM par M.P. Verge. Un programme développé par Pamela Goad [10] transforme ensuite l'énergie physique du spectre en une mesure perceptive correspondant à la qualité du timbre. On calcule en premier des FFT de 0 à 15 500 Hz, puis les FFT sont rassemblées dans des bandes de fréquence correspondant aux bandes critiques de l'oreille interne. En troisième lieu, la "sonie" (intensité perçue) est calculée dans chaque bande. Finalement, l'intensité dans chaque bande sert d'entrée pour la mesure de l'acuité, exprimée en "acums".

3 - ETUDE COMPAREE DE JEUX D'ANCHE

1/ Principales caractéristiques des jeux d'anche.

Le spectre des jeux d'anche de l'orgue est caractérisé par

- la richesse en harmoniques.
- la manière dont se répartit l'énergie dans le spectre. Contrairement aux jeux à bouche, le fondamental n'est généralement pas le plus intense.
- la présence d'une ou plusieurs zones formantiques (énergie maximale sur certains harmoniques)
- et pour les jeux à corps cylindriques, un renforcement des harmoniques impairs.

L'attaque des jeux d'anche peut être très franche et très précise, du moins perceptivement. L'analyse révèle souvent une rapide variation de hauteur au début et à la fin de la note, qui peut devenir audible si la soupape n'est pas actionnée assez nettement. Cet défaut est très nettement audible à la fin des notes aiguës des jeux d'anche de Dijon

L'étude portera successivement sur la caractérisation du cromorne puis de la trompette, le clairon et la bombarde étant considérés comme des extensions vers l'aigu et vers le grave de la trompette.

2/ Remarques préliminaires.

- Les instruments examinés n'ont pas exactement la même tessiture. Pour permettre des comparaisons faciles nous avons indiqué sur tous les documents les notes DO, en les affectant de l'indice correspondant au clavier, et non à la hauteur réelle puisque le diapason des divers instruments est différent. On aura ainsi

l'octave 1 de DO1 à Do2

l'octave 2 de DO2 à DO3

l'octave 3 de DO3 à Do4

l'octave 4 de DO4 à DO5

- Les numéros de notes correspondent à l'ordre dans lequel nous avons enregistré les notes de la gamme chromatique, en partant de la note la plus aiguë. On trouvera en annexe un tableau de correspondance entre les instruments.

3/ Etude du cromorne

Document N° 1 : Sonagrammes du cromorne -

1a/ Orgue de Dijon

1b/ Orgue de Dole

1c/ Orgue de Poitiers

1d/ Orgue de St Maximin

Analyses de 0 à 8000 Hz; Durée totale 64 secondes. Les notes de l'octave inférieure de l'orgue de Dijon qui n'ont pu être représentées sont données en annexe.

Chaque note est représentée par une sorte "d'échelle" verticale dont les barreaux horizontaux sont les harmoniques. L'épaisseur et la noirceur des traits indiquent l'intensité.

Le "trainage" des sons dû à la réverbération de l'édifice se traduit par la persistance (affaiblie) des harmoniques d'une note donnée lorsque la note suivante est jouée.

On voit d'emblée les irrégularités accidentelles constatées sur certains instruments : notes fortes (Dijon 37, St Maximin 35) ou faibles (Dole 44 et 52), notes manquantes (Dole 1 et 27).

Le sonagramme permet d'explorer de manière globale les caractéristiques acoustiques les plus saillantes, confirmées ensuite par les mesures extraites de l'analyse harmonique.

Partie supérieure de l'analyse : aigu, Octave 4 et début de l'octave 3.

On remarque d'emblée certains traits caractéristiques. La ligne continue et intense de l'harmonique 1 (fondamental) pour Poitiers et St Maximin, celle de l'harmonique 3 pour Dole. Sur l'analyse de Dijon on est plutôt frappé par l'irrégularité du spectre : tantôt l'harmonique 3, tantôt l'harmonique 4, voire l'harmonique 2, dominant. On remarque des faiblesses sur le fondamental (notes 9,14,15).

Partie inférieure de l'analyse : suite de l'octave 3, octaves 2 et 1.

Dès le Do3 s'affirme le caractère "impair du cromorne.

En progressant vers le grave, les harmoniques 5 puis 7, puis 9 deviennent prédominants et on peut suivre leur ligne continûment et clairement jusque vers la dernière note. Ce caractère est bien marqué sur les analyses de Poitiers, St Maximin et Dole (excepté les notes 44 et 45). Sur l'analyse de Dijon, l'harmonique 3 est visible de 28 à 35, puis s'affaiblit. L'harmonique 5 devient irrégulier dès 40 et vers le grave, les harmoniques pairs sont souvent aussi intenses que les harmoniques impairs.

On notera aussi la permanence du fondamental sur les analyses de Poitiers et St Maximin.

D'une façon générale, la partie grave de la tessiture (à partir de la note 38, Fa dièse 2) est caractérisée sur l'orgue de Dijon, par la faiblesse d'intensité des premiers harmoniques.

Le formant (zone noire), bien repérable sur les quatre analyses à partir du DO2, baisse avec la fréquence sur les orgues de Dole et St Maximin, mais reste entre 1000 et 2000 Hz pour les orgues de Dijon et Poitiers. La position et l'intensité de ce formant est à relier au caractère de "brillance" du son. Toutefois, l'interprétation complète de la qualité sonore doit tenir compte simultanément du formant mais aussi de l'équilibre d'intensité avec les premiers harmoniques.

En résumé, nous avons repéré sur cette première analyse un certain nombre de traits que nous allons maintenant reprendre en détail en examinant les documents suivants

Document N°2 : Intensité du fondamental (harmonique1)

Analyses de l'évolution de l'intensité du fondamental, de DO1 à Do5 pour les quatre instruments.

Pour tous les instruments l'intensité varie avec la tessiture et présente une certaine irrégularité selon les notes. Très faible dans le grave, l'intensité croît au cours des octaves 1 et 2. Elle croît de 30 à 40 dB à Poitiers et à St Maximin, et d'environ 25 dB à Dijon et à Dole. Les octaves 3 et 4 sont statistiquement au niveau maximum. La seule remarque que nous pouvons faire au vu de ces analyses est le rapprochement évident entre Dijon et Dole d'une part, Poitiers, et St Maximin d'autre part. Ce rapprochement est peut-être dû à des similitudes dans la progression des tailles, hypothèse qui serait à confirmer.

Document N°3 : Intensité des harmoniques 1,3,5,7.

3a/ Dijon

3b/ Dole

3c/ Poitiers

3d/ St Maximin

Nous avons vu en analysant le document N°1 que le caractère du cromorne est lié à la présence des harmoniques impairs et que le nombre de ceux-ci augmente au fur et à mesure que l'on progresse vers les notes les plus graves. Du document N°3 nous pouvons extraire deux informations intéressantes.

- Dans l'aigu de la tessiture, octave 4 et quelques notes de l'octave 3, le fondamental surpasse en intensité les autres harmoniques à Poitiers et St Maximin. Sur l'analyse de Dijon on remarque une zone (notes 17 à 23) où le fondamental prédomine, mais au

détriment des harmoniques impairs plus faibles. Sur le document 1a (sonagramme) on voit que l'harmonique 4 est le plus fort dans cette zone.

- Examinant maintenant l'évolution de l'intensité des harmoniques 3, 5, 7, de l'octave 3 vers l'octave 1, on remarque à Dijon une chute importante de l'intensité, de 20 à 30 dB, alors qu'à Dole et à St Maximin l'intensité est constante en moyenne, et baisse plus modérément à Poitiers.

On sait que la perception du fondamental peut être "reconstituée" au travers des harmoniques supérieurs. Ce phénomène est d'autant plus important qu'il s'agit des basses fréquences (octave 1) dans la zone desquelles l'oreille est peu sensible à la fréquence réelle du fondamental, mais plus à celles des harmoniques élevés.

Document N° 4 : Rapport d'intensité entre les harmoniques impairs et pairs.

4a/ Dijon et Dole

4b/ Poitiers et St Maximin

Analyse des deux premières octaves : Do1 à Do3

Rapport des harmoniques 1,3,5,7,9,11 aux harmoniques 2,4 6,8,10.

Cette mesure rend bien compte d'une caractéristique spectrale importante du cromorne.

La valeur du rapport est élevée à Poitiers et à St Maximin (supérieure ou égale à 10). La comparaison entre Dole et Dijon, très similaire dans l'octave 2, révèle une chute brutale dès le Sib1, alors qu'à Dole sa valeur croît significativement et reste toujours au dessus de 10.

Document N°5 : Valeur du CGS (Centre de Gravité Spectrale)

5a/ Dijon et Dole

5b/ Poitiers et St Maximin

En examinant le Document N°1 nous avons remarqué des différences dans la situation fréquentielle du formant, principalement dans le grave. Le document N°5 donne précisément la valeur centrale du formant pour chaque note. Dans les octaves 1 et 2 les valeurs mesurées à Dijon sont toujours supérieures à celles des autres instruments. La zone moyenne, 1500 Hz, correspond au formant principal (2ème formant) de la voyelle nasale "IN" en français.

Par ailleurs la valeur élevée de la fréquence centrale de ce formant, proche de la zone sensible de l'oreille, accentue le caractère de brillance des notes graves.

Document N°6 : représentation du C.G.S. normalisé en fonction du rapport harmoniques impairs/harmoniques pairs

6a/ Dole et Dijon

6b/ Poitiers et St Maximin

L'analyse ne représente que les notes des octaves 1 et 2. Les numéros sont spécifiques à chaque instrument. Se reporter à l'annexe.

Cette représentation complexe combine deux caractéristiques du cromorne et montre l'évolution de leur rapport en fonction de la tessiture.

Sur l'axe horizontal figure la valeur du CGS normalisé, exprimé en numéro d'harmonique. Cette valeur augmente quand la fréquence diminue, (numéros de notes croissant), mais reste toujours inférieure à 15 à Dole et à St Maximin.

Sur l'axe horizontal, on lit la valeur du rapport d'intensité entre les harmoniques impairs et les harmoniques pairs. Toutes les notes du cromorne sont normalement dans le plan "impair" excepté à Dijon où dès la note 48 le rapport s'inverse. On appréciera également la valeur de ce rapport, très élevée sur les trois instruments de comparaison.

Document N°7 : Représentation de l'acuité.

L'axe horizontal représente les différentes notes du jeu à Dole et à Dijon. Sur l'axe horizontal, l'acuité est exprimée dans une unité particulière, l' "Acum". Elle a été égalisée pour les premières notes aiguës de chaque orgue. On voit clairement que l'acuité a statistiquement, une valeur plus élevée à Dijon qu'à Dole. Cette différence est plus prononcée, comme on l'a déjà vu, dans les octaves graves.

Remarque - L'acuité est actuellement la seule mesure perceptive du timbre adoptée par les psychoacousticiens. Définie par Bismarck [3], sa corrélation avec les réponses perceptives a été largement vérifiée, sur 80 sons différents, et pour diverses intensités sonores. Elle est significativement reliée à la "brillance spectrale".

Conclusion sur le cromorne

- La caractéristique principale du cromorne, la prédominance des harmoniques impairs est peu marquée. Irrégulière dans l'aigu, elle est peu affirmée dans les octaves 3 et 2 et disparaît totalement dans l'octave 1.

- Le formant principal a une valeur élevée dans les deux octaves inférieures, alors que les premiers harmoniques (pas seulement le fondamental) tendent à s'affaiblir à partir du lab2. La combinaison de ces deux caractéristiques confère au son un caractère "nasal"

3/ Etude des trompettes du positif.

Document N°8 - Sonagrammes de la trompette du positif - Toutes les notes.

8a/ Dijon

8b/ Dole

8c/ Poitiers

8d/ St Maximin

Mêmes paramètres d'analyse que pour le document N°1.

La partie supérieure de l'analyse montre peu de différences si ce n'est l'aigu (notes supérieures à Do5) qui sont plus fortes et plus riches en harmoniques à Dijon que pour les autres orgues.

Sur la partie inférieure de l'analyse on identifie clairement le formant principal, zone noire centrale du spectre, dont la fréquence moyenne diffère peu d'un instrument à l'autre, mais dont la largeur est plus réduite à Dijon. Toujours par comparaison avec celle des trois autres instruments, l'analyse du jeu de Dijon montre deux autres particularités :

- Une plus grande richesse en harmoniques supérieurs, dans la zone de 3 à 6000 Hz, au delà de la fréquence de coupure du tuyau.
- Un amoindrissement de l'intensité des composantes inférieures au formant principal.

Ces observations rejoignent celles que nous avons faites à propos de l'étude du cromorne : richesse en harmoniques élevés, intensité plus faible des premiers harmoniques.

Document N°9 : Intensité du fondamental; comparaisons par paires.

9a/ Dijon et Dole

9b/ Dijon et Poitiers

9c/ Dijon et St Maximin

Précisons qu'il ne s'agit pas ici d'une mesure absolue qu'i n'aurait aucun sens. Le jeu de trompette des quatre instruments a été enregistré sur ordinateur en égalisant l'intensité globale. On peut ensuite en tirer les intensités relatives de chaque harmonique, et comparer les instruments comme nous l'avons fait pour le cromorne.

Sur les trois documents la courbe du fondamental de la trompette du positif de Dijon est statistiquement plus basse que celle des autres instruments. Selon les termes utilisés en facture d'orgue : le jeu a un faible "bourdon".

4/ les trompettes du grand orgue

Document N°10 : Sonagrammes des trois trompettes du grand orgue de Dijon et Sonagrammes des deux trompettes de Dole

10a/ Dijon, 1ère trompette

10b/ Dijon, 2ème trompette

10c/ Dijon, 3ème trompette

10d/ Dole, 1ère trompette

10e/ Dole, 2ème trompette

Même réglages des paramètres que pour le document 1.

Les observations énoncées à partir de l'examen du document N°8 sont applicables à ce document. On voit nettement

- la richesse et l'intensité des notes des octaves aiguës (notes Sol5 à Mi3) de Dijon, par comparaison à celles de Dole.

- le formant principal très localisé à Dijon (notes Do3 à Mi1) et le peu d'intensité des premiers harmoniques, caractères qui diffèrent de ceux de Dole où le formant est largement étalé, souvent jusqu'au fondamental.

Enfin la première trompette apparaît plus forte et plus riche en harmonique que les deux autres.

Document N° 11 : CGS non normalisé

11a/ Dijon, trompettes 2 et 3

11b/ Dole, trompettes 1 et 2

Evolution de la fréquence centrale du CGS en fonction de la tessiture : octaves 1, 2 et 3.

Cette analyse met bien en évidence l'observation faite sur le document N°10 de la plus grande richesse en harmoniques des notes supérieures. A Dijon, évolution entre 1800 et 2500 Hz; à Dole, évolution entre 1200 et 1800 Hz dans l'octave 3.

5/ trompette et clairon de pédale

Document N°12 : Sonagrammes des deux octaves, Dole et Dijon.

12a/ Clairon de la Pédale

12b/ Trompette de la Pédale

Sur chaque document de l'analyse on trouve le jeu de Dole à la partie supérieure et celui de Dijon à la partie inférieure. Lors de notre enregistrement le Do du milieu du pédalier ne fonctionnait pas. Les réglages et les données générales pour l'interprétation acoustique sont les mêmes que pour le Document N°1

L'examen comparé de ces deux documents ne fait que confirmer ce que nous avons dit à propos du document N°10 concernant en particulier la largeur du formant (octave Do1-Do3) et l'intensité des premiers harmoniques. Le document suivant va nous permettre de confirmer par la mesure, les différences observées dans "l'équilibre harmonique" des spectres.

Document N°13 : Trompette de la pédale, comparaison Dole et Dijon

13a/ CGS normalisé

13b/ rapport H(1+2)/tout

Sur le document 13a, le Centre de Gravité Spectrale est représenté par le numéro de l'harmonique correspondant (axe vertical). Le chiffre est toujours plus élevé à Dijon (excepté la note Do dièse 1).

Sur le document 13b, nous avons représenté l'évolution du rapport de l'énergie des harmoniques 1 et 2 rapportée à tout le spectre. La valeur en est très significativement plus faible pour la trompette de pédale de Dijon.

CONCLUSION GÉNÉRALE.

Nous avons effectué plusieurs types d'analyses acoustiques sur le jeu de cromorne et sur plusieurs jeux de trompette : positif, grand-orgue et pédale.

Ces analyses nous ont permis d'étudier l'évolution en fonction de la tessiture, de différents paramètres caractérisant la structure acoustique des jeux d'anche. Chaque zone peut-être caractérisée différemment, mais du point de vue perceptif, les particularités sont plus accusées dans la zone grave, celle des octaves 1 et 2.

La comparaison a été systématiquement effectuée entre les jeux de l'orgue de Dijon et ceux de Dole. Pour le cromorne et pour la trompette du positif, elle a pu être étendue à trois autres instruments.

Au travers des variables provenant des instruments, des traits particuliers peuvent être dégagés qui permettent de caractériser le spectre acoustique des jeux d'anche de l'orgue de Dijon.

1/ Les différentes analyses montrent, de manière convergente, une tendance générale, commune au cromorne et aux trompettes étudiées, que nous pouvons définir par la combinaison de trois paramètres.

- Le spectre est riche en harmoniques,
- Le formant principal localisé sur un petit nombre d'harmoniques, est souvent plus aigu que sur les autres instruments.
- Les premiers harmoniques s'affaiblissent au fur et à mesure que l'on progresse vers les graves (octaves 1 et 2).

Certains paramètres, pris isolément, peuvent se retrouver sur d'autres instruments, mais c'est la combinaison des trois qui est caractéristique, et qui correspond à notre avis, à l'impression auditive globale. Bien que nous n'ayons pu procéder à des tests psychoacoustiques, nous pouvons confirmer qu'il est d'usage d'utiliser des termes évoquant la "nasalité" pour caractériser des sons à spectre riche mais de fondamental faible, comme par exemple ceux du hautbois de l'orchestre.

2/ Le jeu de cromorne

L'identité sonore de ce jeu est liée à la prédominance des harmoniques impairs. Nous avons clairement montré que cette caractéristique, très présente sur les analyses des autres instruments, était faible dans le médium du jeu de Dijon, et disparaissait même totalement dans la première octave. Par ailleurs la qualité esthétique énoncée au point 1/ ne semble pas désirable pour la qualité sonore du cromorne, puisque selon Dom Bédos "Il ne s'agit pas de chercher un grand éclat dans ce Jeu, mais beaucoup de tendre, et de moelleux."

En conclusion, le style d'harmonie des jeux d'anche que nous avons pu caractériser à partir des analyses de l'orgue de Dijon diffère sur plusieurs points de celui des trois instruments de référence auxquels il a été comparé, et de ce fait ne peut être considéré comme représentatif du style classique français.

A Paris, le 31 Janvier 1996

Michèle Castellengo
Directrice de recherches au CNRS

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Aures W. (1985) - Berechnungsverfahren für den sensorischen wohlklang beliebiger schallsignale, *Acustica*, **59**, 130-141.
- [2] Bismarck G.von, (1974 a) - Timbre of steady sounds. A factorial investigation of its verbal attributes. *Acustica*, **30** (3),146-159.
- [3] Bismarck G.von, (1974 b) - Sharpness as an attribute of timbre of steady sounds, *Acustica*, **30**, 159-172.
- [4] Brottier E. (1979) - *Contribution à l'étude de la densité spectrale en vue de l'appréciation subjective de certains jeux de l'orgue*, Mémoire ENSAM Châlons sur Marne /LAM Paris.
- [4] Castellengo M. (1991) - A propos de l'étude acoustique de l'orgue de Saint-Maximin, *L'orgue de Jean Esprit et Joseph Isnard; dans la basilique de la Madeleine à Saint-Maximin* ARCAM, Nice, p197-201.
- [5] Castellengo M. (1994) - Approche acoustique de l'identité sonore de l'orgue F.H. Clicquot, *l'orgue François-Henri Clicquot de la cathédrale de Poitiers*, Ministère de la Culture, Poitiers, p.82-86.
- [6] Castellengo M.(1977) - Analyses spectrographiques de quelques jeux d'un orgue, *La revue Musicale* **295-296** , Paris.
- [7] Dom Bédos (1766) - *L'art du Facteur d'orgues*. Réédition Léonce Laget., Paris, 1982.
- [8] Fabre B. (1988) - *Caractérisation d'un jeu d'orgue* . Mémoire de DEA, Université du Maine/LAM Paris..
- [9] Fletcher H., Blackham E., Bhristensen D. (1963) - Quality of Organ Tones, *J. A.S.A.*, **35** (3), 314-325.
- [10] Goad P. (1994) - *Timbral sharpness and modulations in frequency and amplitude : implications for the fusion of musical sounds*. Thesis of the University of Washington, Seattle.
- [11] Guyot F. (1992) - *Etude de la pertinence perceptive de deux critères acoustiques pour caractériser la sonorité des sons à spectres réduits*. Mémoire de DEA, Université du Maine/LAM Paris.
- [11] Lottermoser W. (1983) - Orgeln, Kirchen und Akustik. Tome 1 : Die akustischen Grundlagen der Orgel ,155p.; Tome 2 :Orgelakustik in Einzeldarstellungen 211p.; Verlag Erwin Bochinsky, Frankfurt am Main.
- [12] Padgham C. (1986) - The scaling of the timbre of the pipe organ, *Acustica*, **60**, 189-204.
- [13] Piron Ch. (1993) - *Approche de l'identité sonore d'un orgue : Comparaisons spectrales et perceptives d'enregistrements avant et après restauration*. Mémoire d'ingénieur, Université de Technologie de Compiègne/LAM Paris.
- [14] Plomp R., de Laat J. (1984) - Comparison of Organs in a Spectrum Space, *Acustica*, **55** (Research Notes), 193-194.
- [15] Pollard H.F. (1988) - Feature analysis of musical sounds, *Acustica*, **65**, 232-244.
- [16] Sundberg J.,Jansson E. (1976) - Long-Time-Average-Spectra applied to analysis of Music. Part ii : An analysis of organ stops. *Acustica*, **30**, 159-172

ANNEXES

LISTE DES DOCUMENTS

Document N°1 : Sonagrammes du cromorne -

- 1a/ Orgue de Dijon
- 1b/ Orgue de Dole
- 1c/ Orgue de Poitiers
- 1d/ Orgue de St Maximin

Document N°2 : Intensité du fondamental (harmonique1)

Document N°3 : Intensité des harmoniques 1,3,5,7.

- 3a/ Dijon
- 3b/ Dole
- 3c/ Poitiers
- 3d/ St Maximin

Document N° 4 : Rapport d'intensité entre les harmoniques impairs et pairs.

- 4a/ Dijon et Dole
- 4b/ Poitiers et St Maximin

Document N°5 : Valeur du CGS (Centre de Gravité Spectrale)

- 4a/ Dijon et Dole
- 4b/ Poitiers et St Maximin

Document N°6 : représentation du C.G.S. normalisé en fonction du rapport des harmoniques impairs par rapport aux harmoniques pairs

- 6a/ Dole et Dijon
- 6b/ Poitiers et St Maximin

Document N°7 : Représentation de l'acuité.

Document N°8 - Sonagrammes de la trompette du positif - Toutes les notes.

- 8a/ Dijon
- 8b/ Dole
- 8c/ Poitiers
- 8d/ St Maximin

Document N°9 : Intensité du fondamental; comparaisons par paires.

- 9a/ Dijon et Dole

9b/ Dijon et Poitiers

9c/ Dijon et St Maximin

Document N°10 : Sonagrammes des trois trompettes du grand orgue de Dijon et
Sonagrammes des deux trompettes de Dole

10a/ Dijon, 1ère trompette

10b/ Dijon, 2ème trompette

10c/ Dijon, 3ème trompette

10d/ Dole, 1ère trompette

10e/ Dole, 2ème trompette

Document N° 11 : CGS non normalisé

11a/ Dijon, trompettes 2 et 3

11b/ Dole, trompettes 1 et 2

Document N°12 : Sonagrammes des deux octaves, Dole et Dijon.

12a/ Clairon de la Pédale

12b/ Trompette de la Pédale

Document N°13 : Trompette de la pédale, comparaison Dole et Dijon

13a/ CGS normalisé

13b/ rapport H(1+2)/tout

CORRESPONDANCE DES NOTES

Correspondance des numérotations des notes de la gamme chromatique sur les instruments étudiés.

Clavier	Dijon	Dole	Poitiers	St Maximin
Sol5	1			
Fa#5	2			
Fa5	3	1		
Mi5	4	2	1	
Mib5	5	3	2	
Ré5	6	4	3	1
Réb5	7	5	4	2
Do5	8	6	5	3

Si4	9	7	6	4
Sib4	10	8	7	5
La4	11	9	8	6
Lab4	12	10	9	7
Sol4	13	11	10	8
Fa#4	14	12	11	9
Fa4	15	13	12	10
Mi4	16	14	13	11
Mib4	17	15	14	12
Ré4	18	16	15	13
Réb4	19	17	16	14
Do4	20	18	17	15

Si3	21	19	18	16
Sib3	22	20	19	17
La3	23	21	20	18
Lab3	24	22	21	19
Sol3	25	23	22	20
Fa#3	26	24	23	21
Fa3	27	25	24	22
Mi3	28	26	25	23
Mib3	29	27	26	24
Ré3	30	28	27	25
Réb3	31	29	28	26
Do3	32	30	29	27

Clavier	Dijon	Dole	Poitiers	St Maximin

Si2	33	31	30	28
Sib2	34	32	31	29
La2	35	33	32	30
Lab2	36	34	33	31
Sol2	37	35	34	32
Fa#2	38	36	35	33
Fa2	39	37	36	34
Mi2	40	38	37	35
Mib2	41	39	38	36
Ré2	42	40	39	37
Réb2	43	41	40	38
Do2	44	42	41	39

Si1	45	43	42	40
Sib1	46	44	43	41
La1	47	45	44	42
Lab1	48	46	45	43
Sol1	49	47	46	44
Fa#1	50	48	47	45
Fa1	51	49	48	46
Mi1	52	50	49	47
Mib1	53	51	50	48
Ré1	54	52	51	49
Réb1	55	53	52	(50)
Do1	56	54	53	51

Si0	57			
Sib0	58			
La0	59			
Sol0	61			

DOCUMENTS : SONAGRAMMES ET GRAPHIQUES

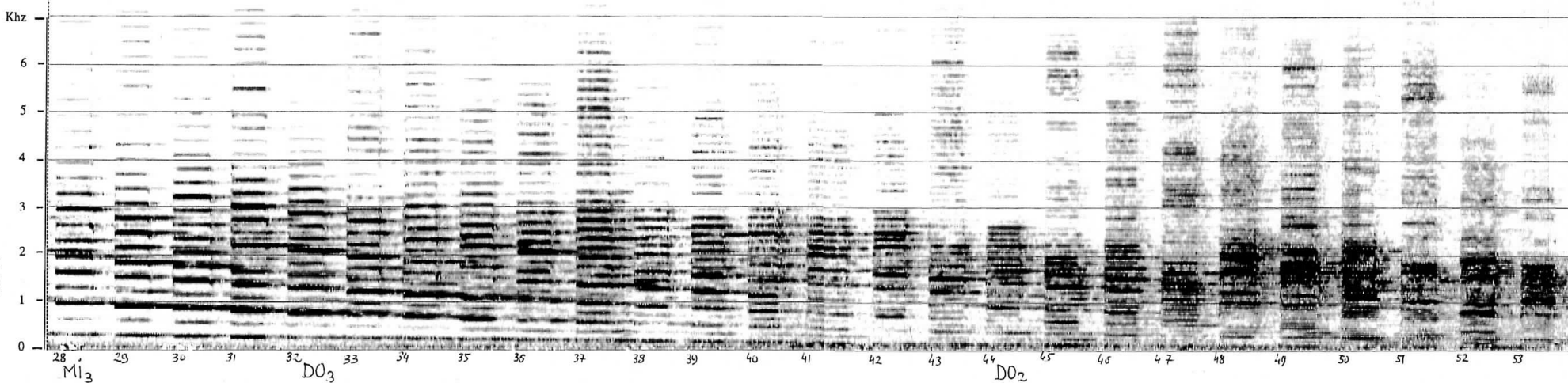
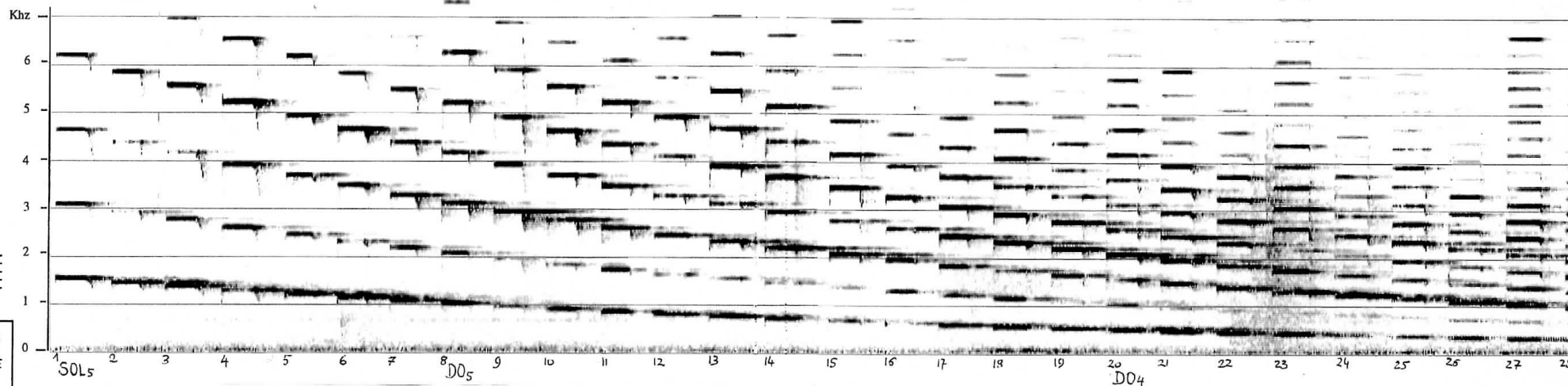
DIJON --- CROMORNE DU POSITIF

Janvier 1996

Niveau : dB
Set up N° 50



CLAVIER : Positif f
JEU : CROMORNE



DOLE --- CROMORNE DU POSITIF

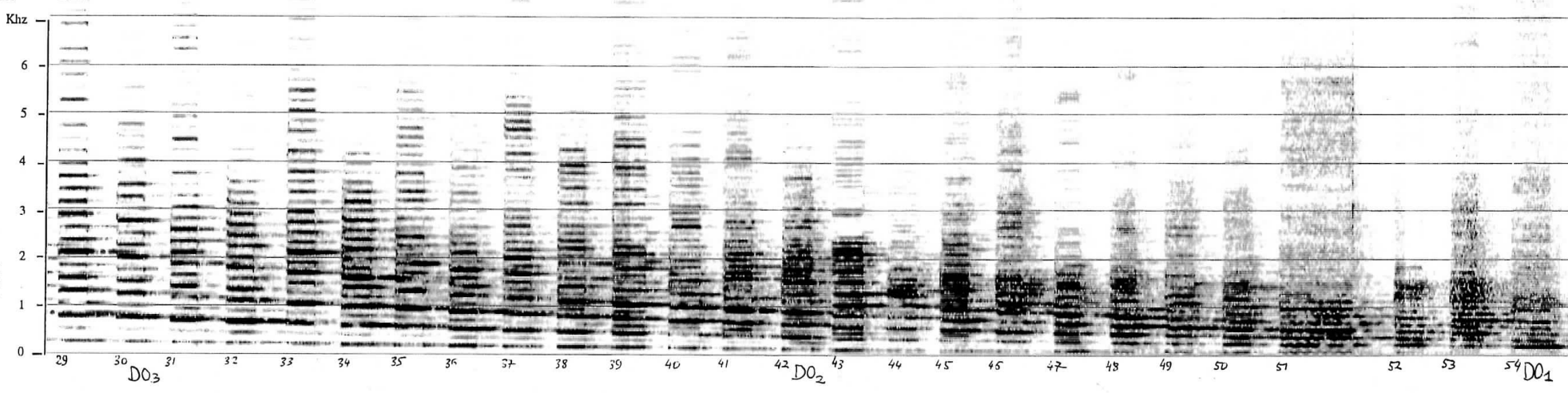
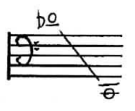
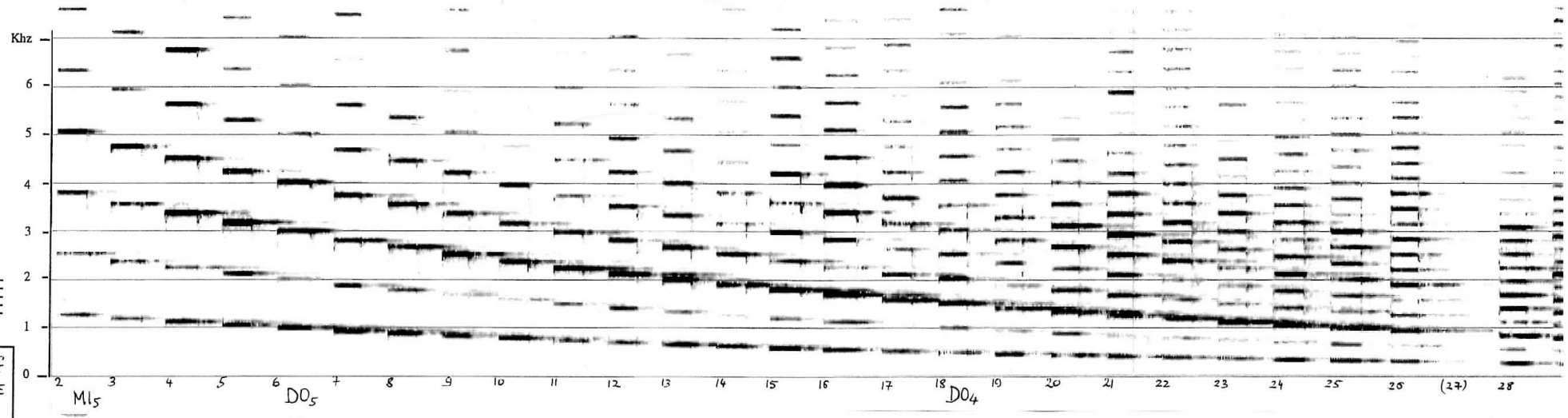
Janvier 1996

UNIVERSITÄT WÜRZBURG - INSTITUT FÜR MUSIKWISSENSCHAFT UND MUSIKPÄDAGOGIK

Niveau : dB
Set up N° 50



CLAVIER : Positif
JEU : CROMORNE



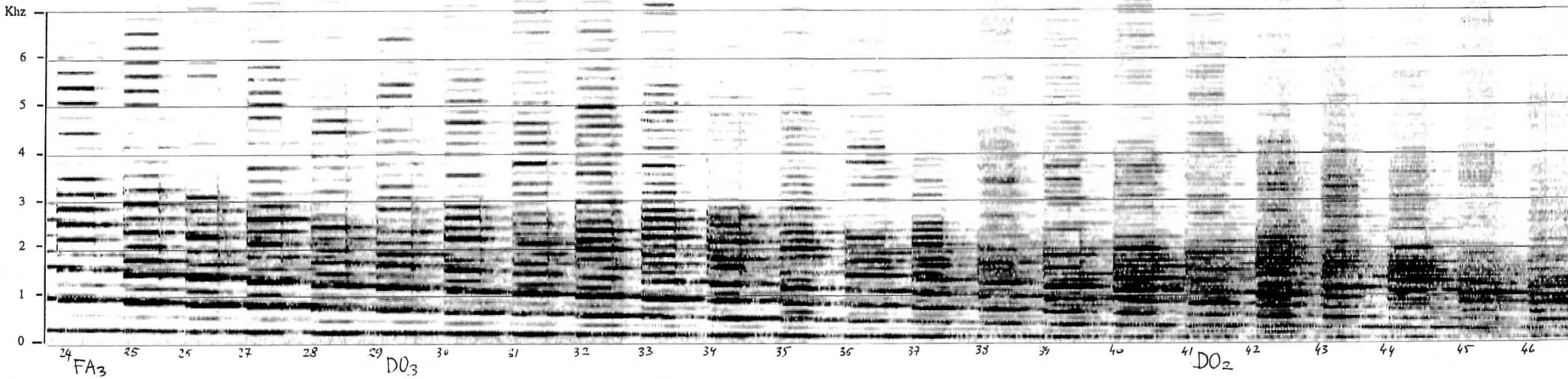
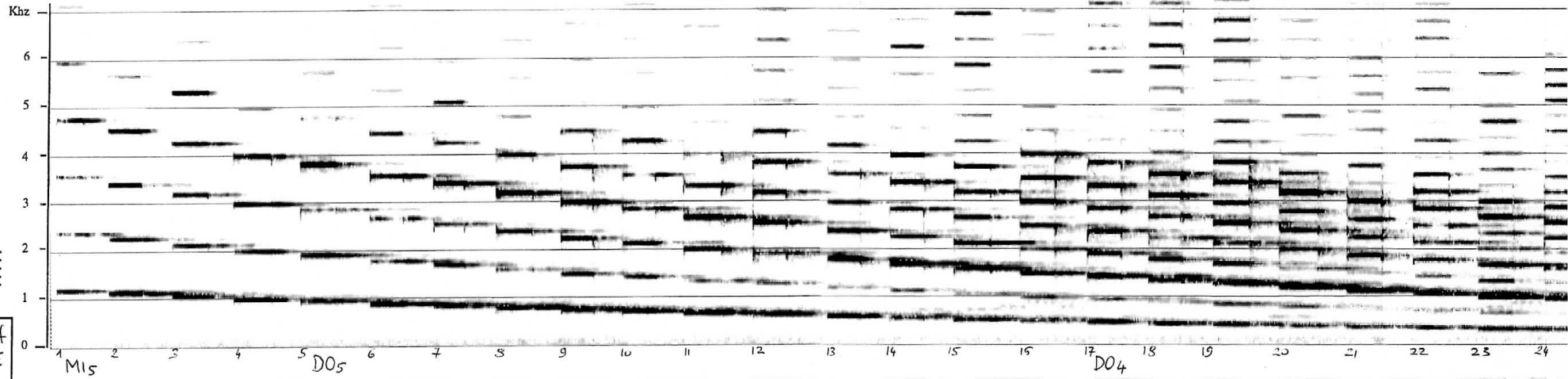
POITIERS --- CROMORNE DU POSITIF

Janvier 1996

Niveau : dB
Set up N° 50



CLAVIER : Positif
JEU : CROMORNE



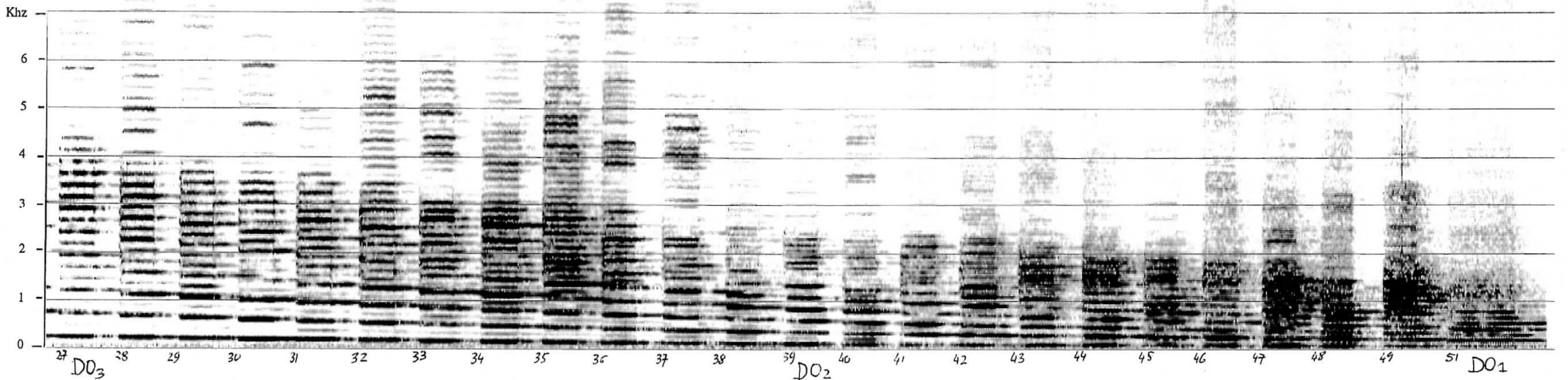
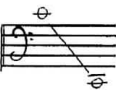
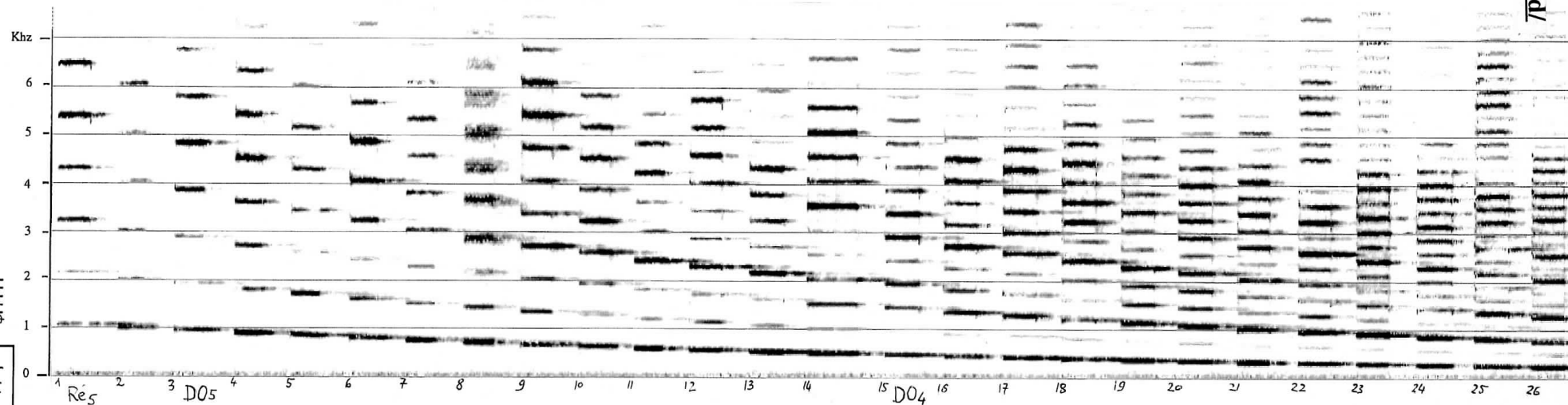
ST. MAXIMIN --- CROMORNE DU POSITIF

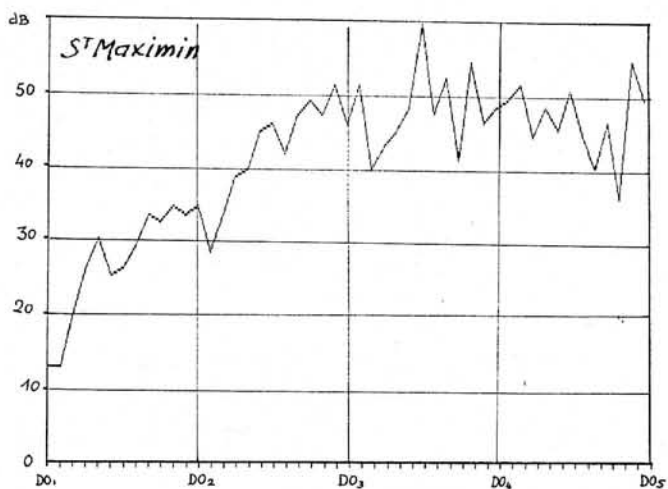
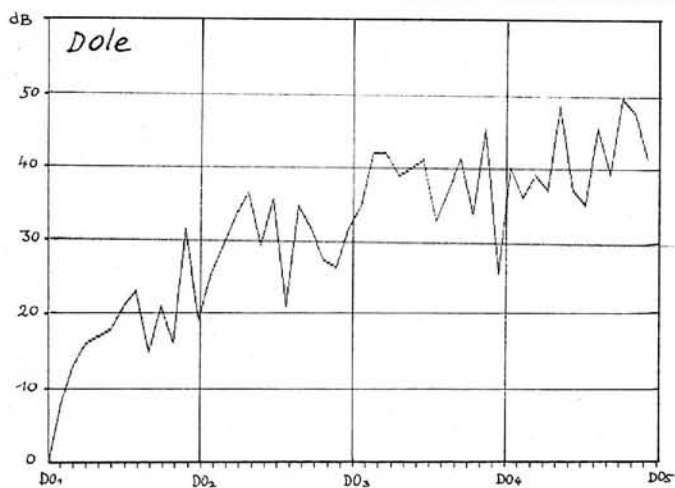
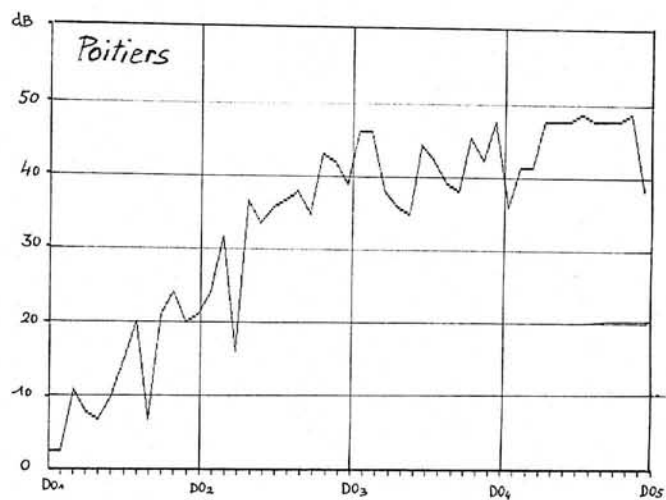
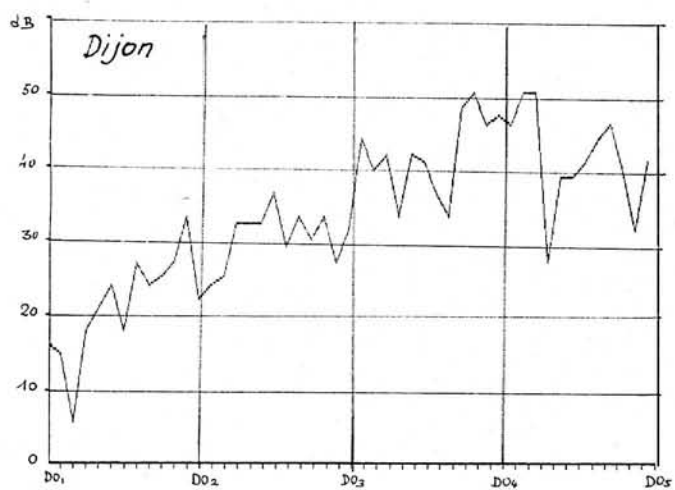
Janvier 1996

Niveau : dB
Set up N°50

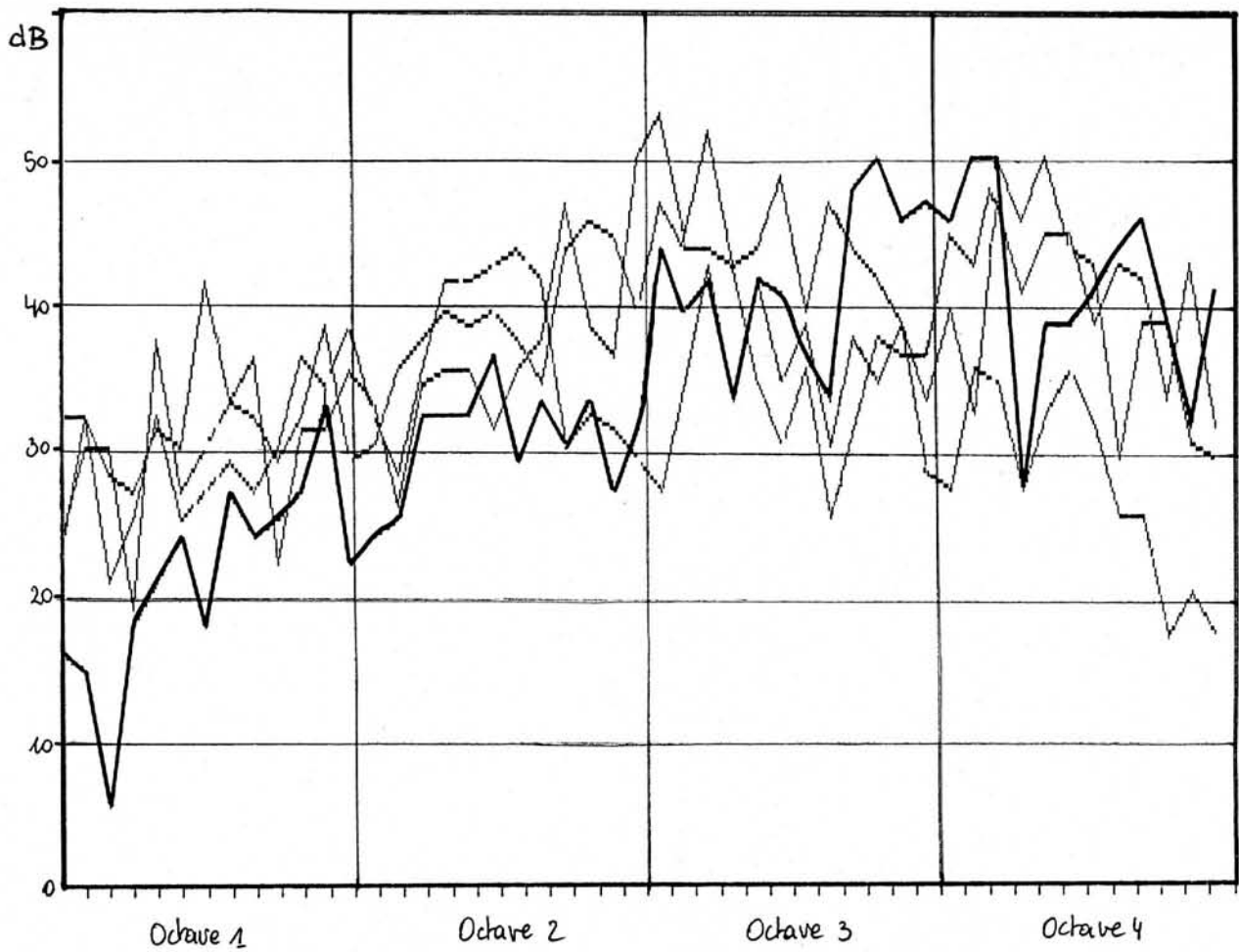


CLAVIER : Positif
JEU : CROMORNE

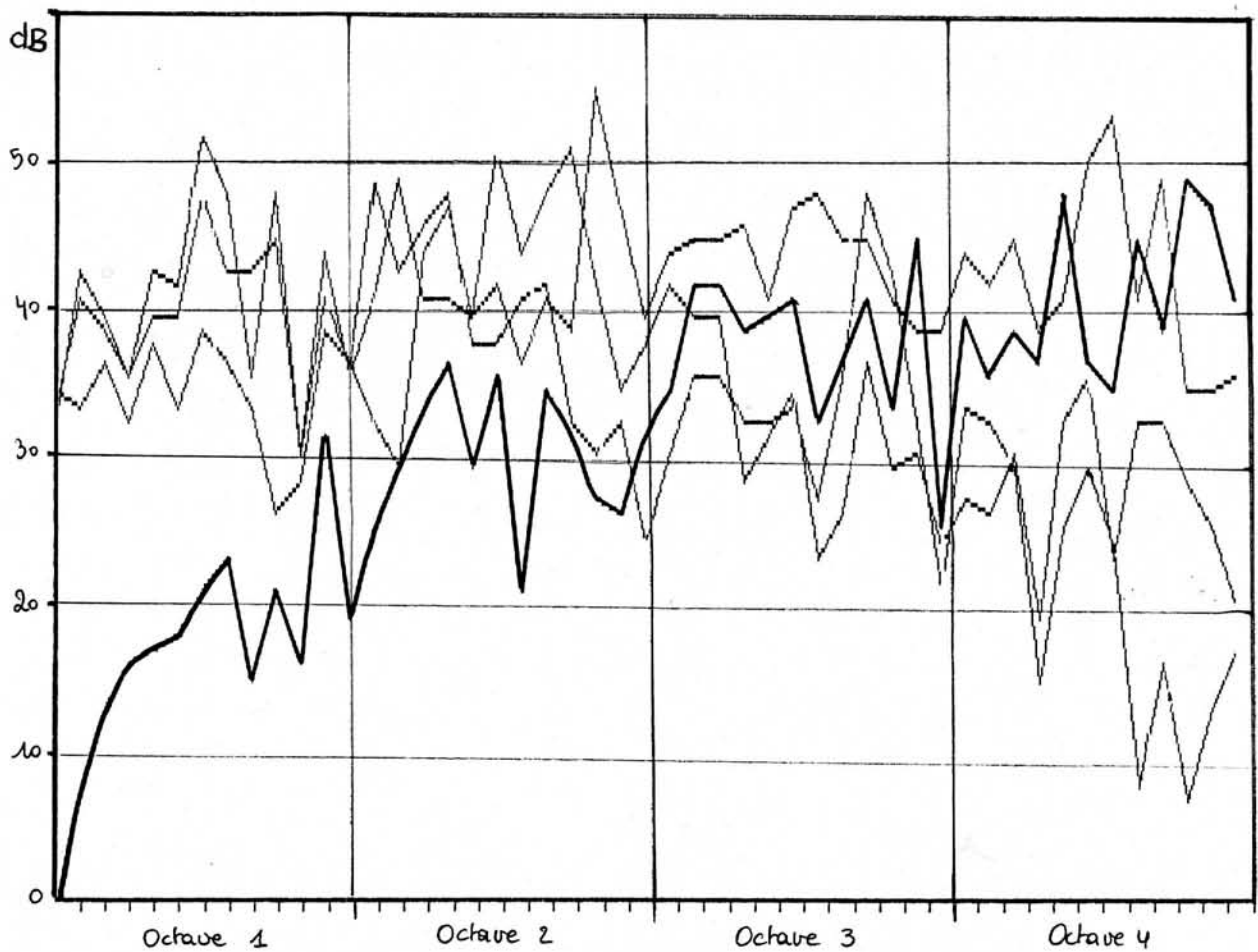




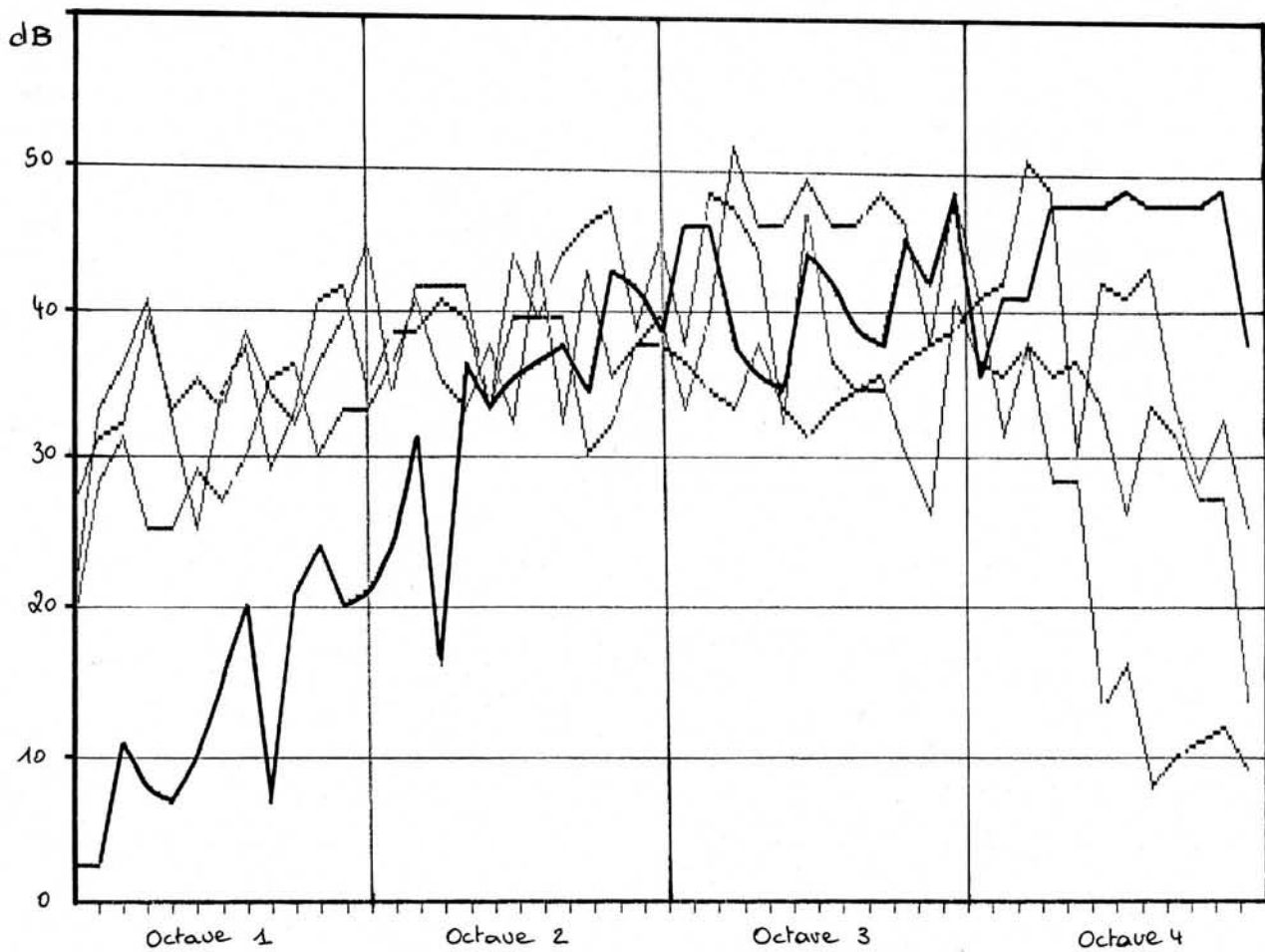
Document N°2 : Intensité du fondamental (harmonique1)



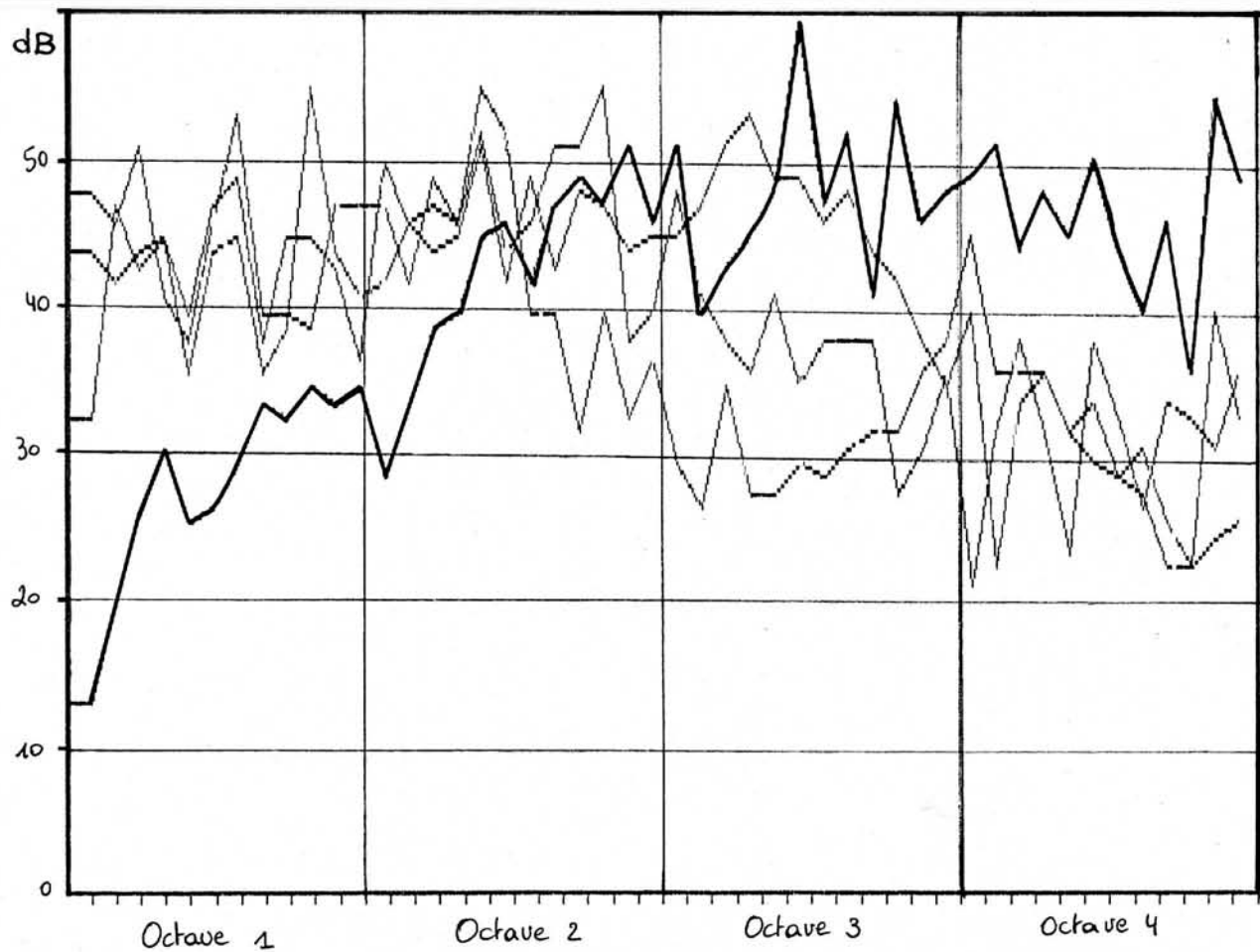
Document N°3a : Intensité des harmoniques 1,3,5,7.- Dijon



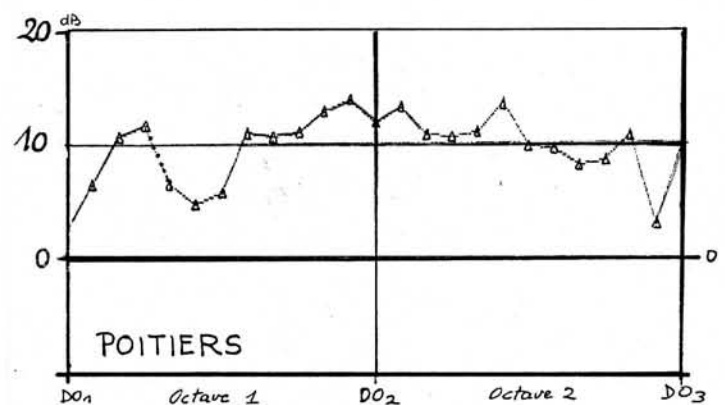
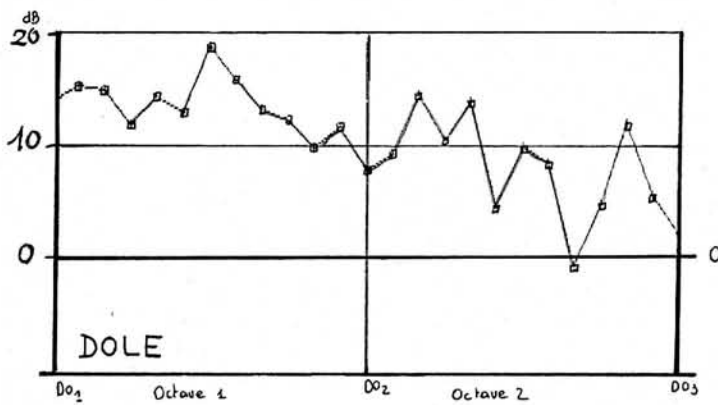
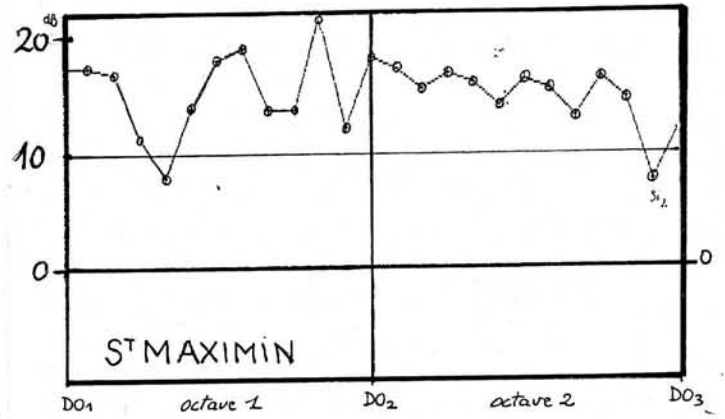
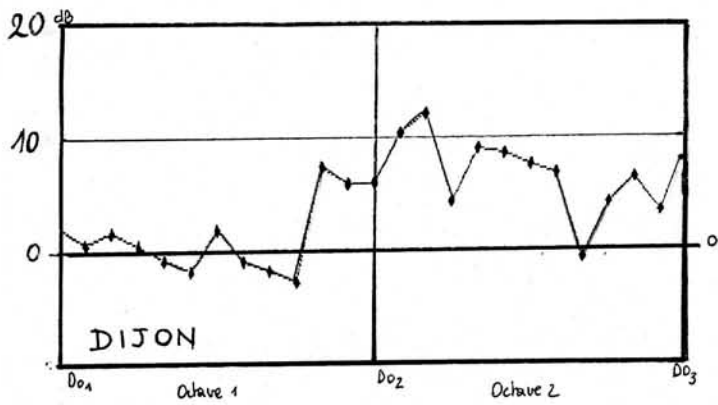
Document N°3b : Intensité des harmoniques 1,3,5,7.- Dole



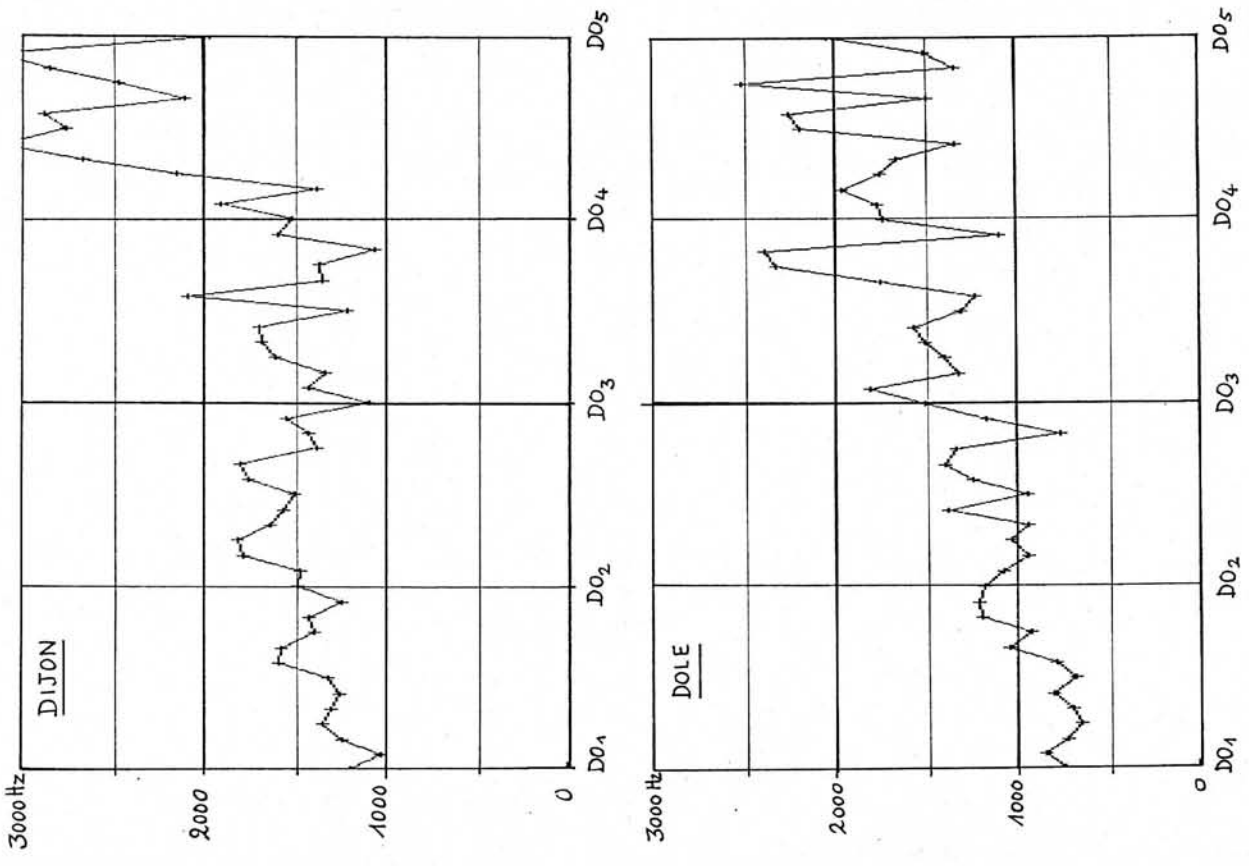
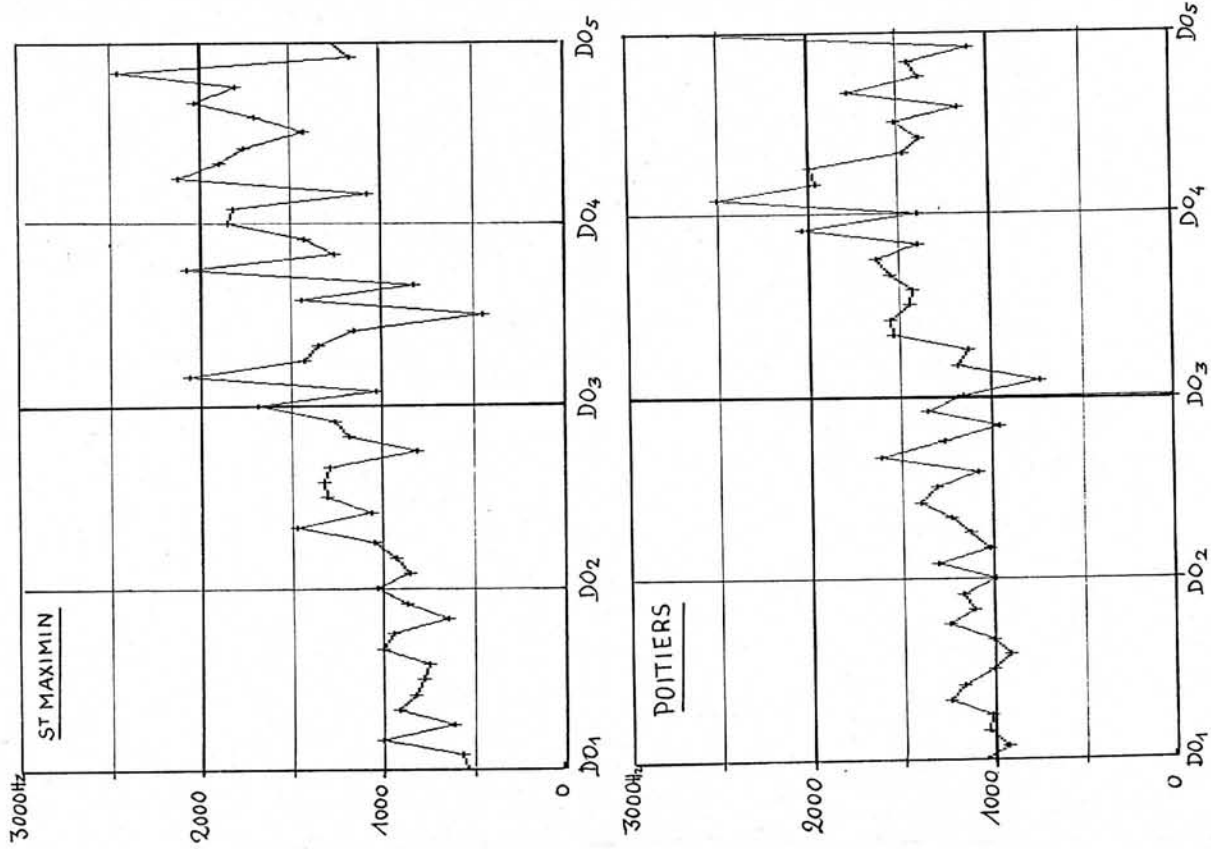
Document N°3c : Intensité des harmoniques 1,3,5,7. - Poitiers

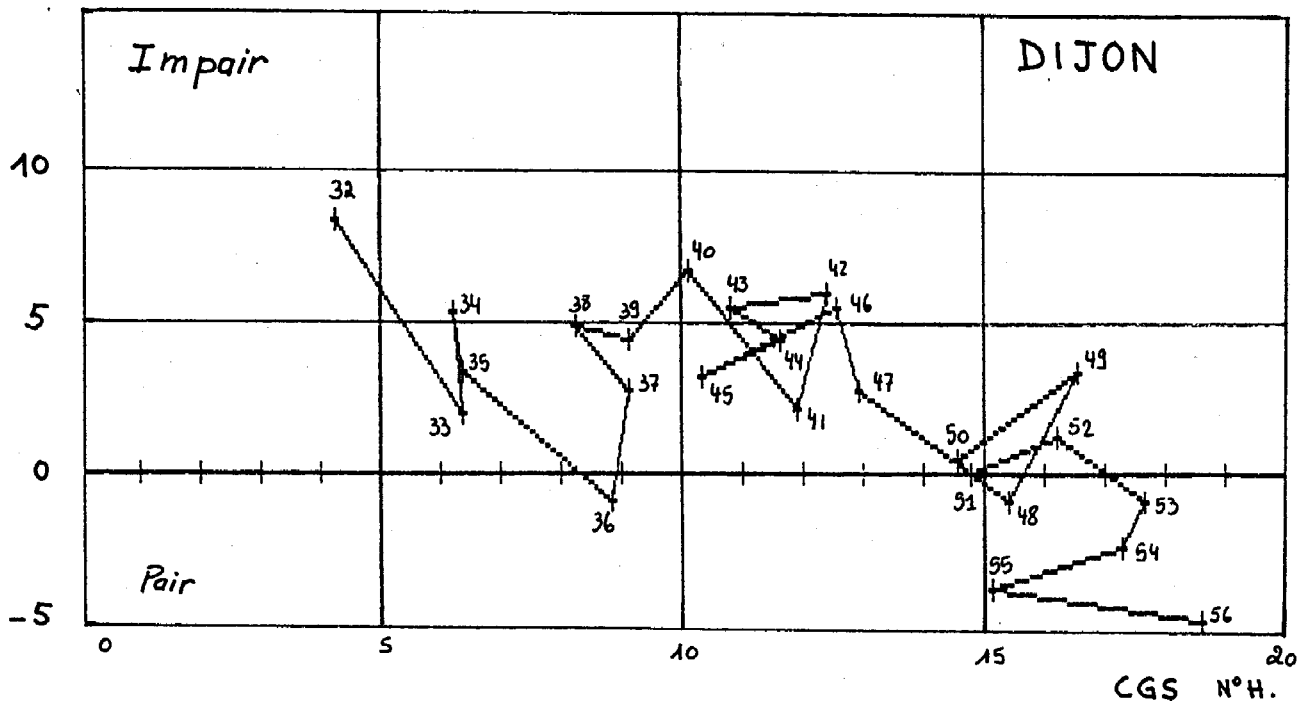


Document N°3d : Intensité des harmoniques 1,3,5,7. - St Maximin

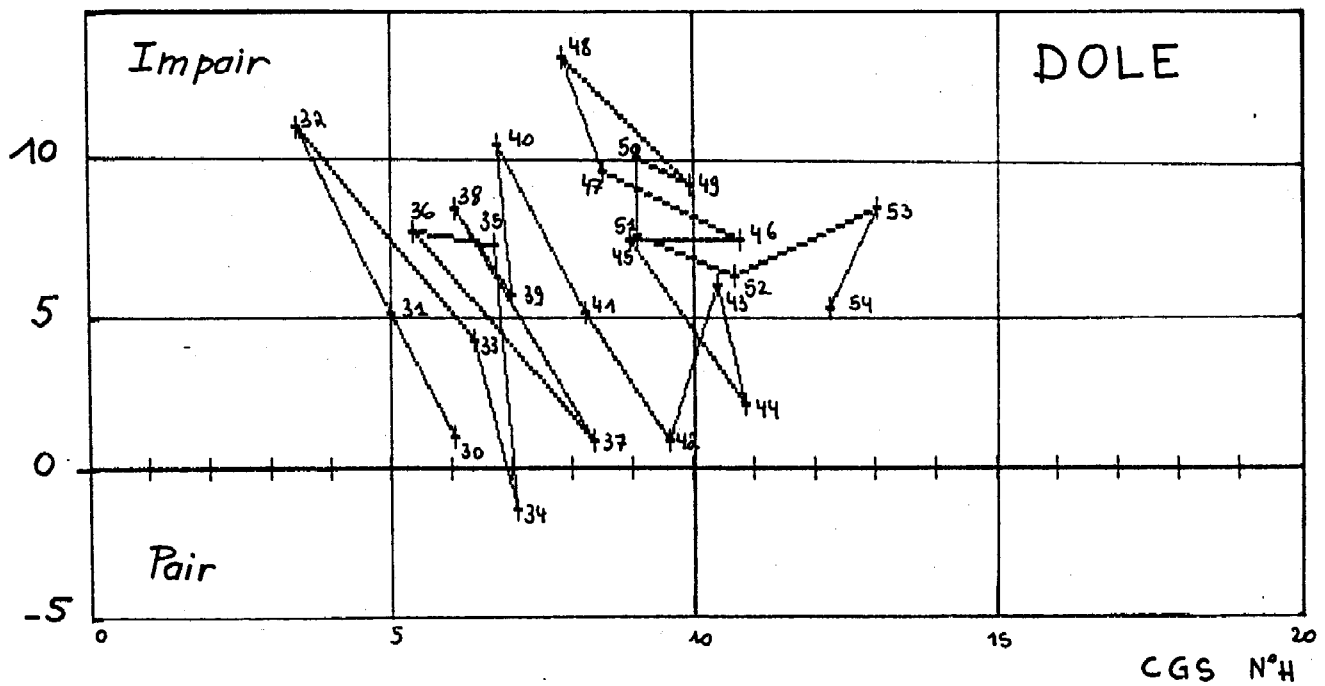


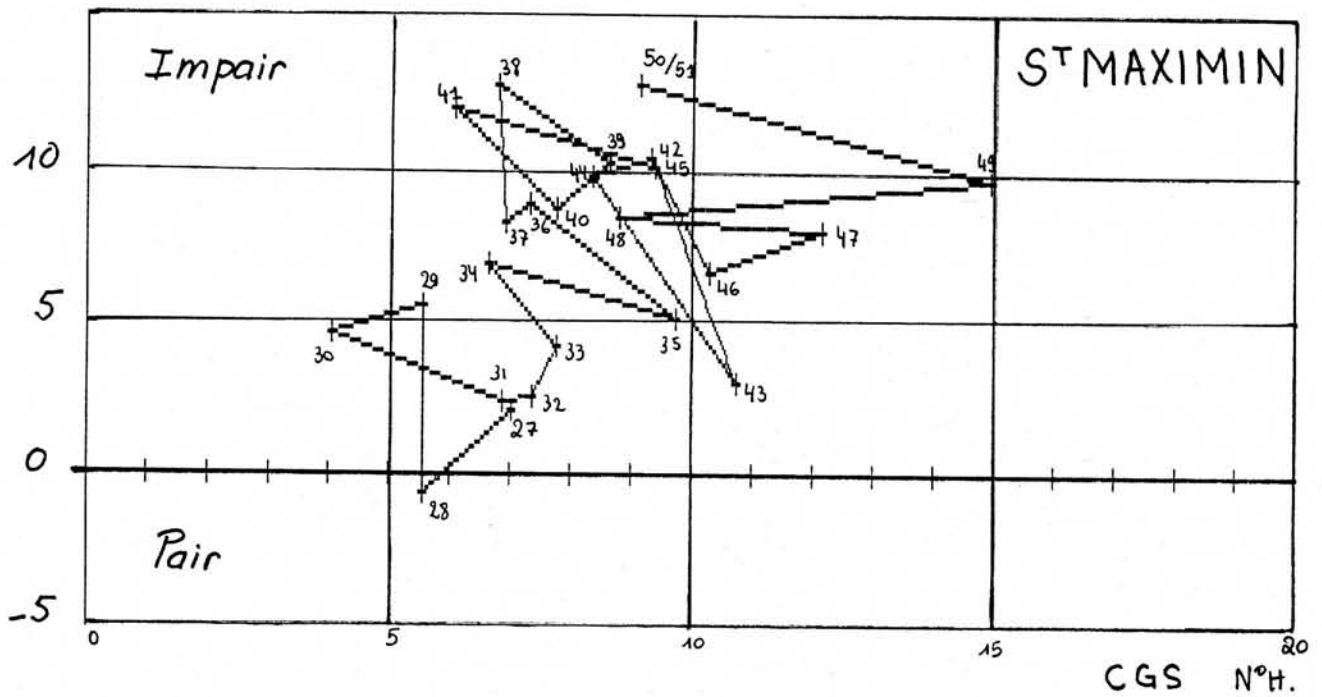
Document N° 4 : Rapport d'intensité entre les harmoniques impairs et pairs.



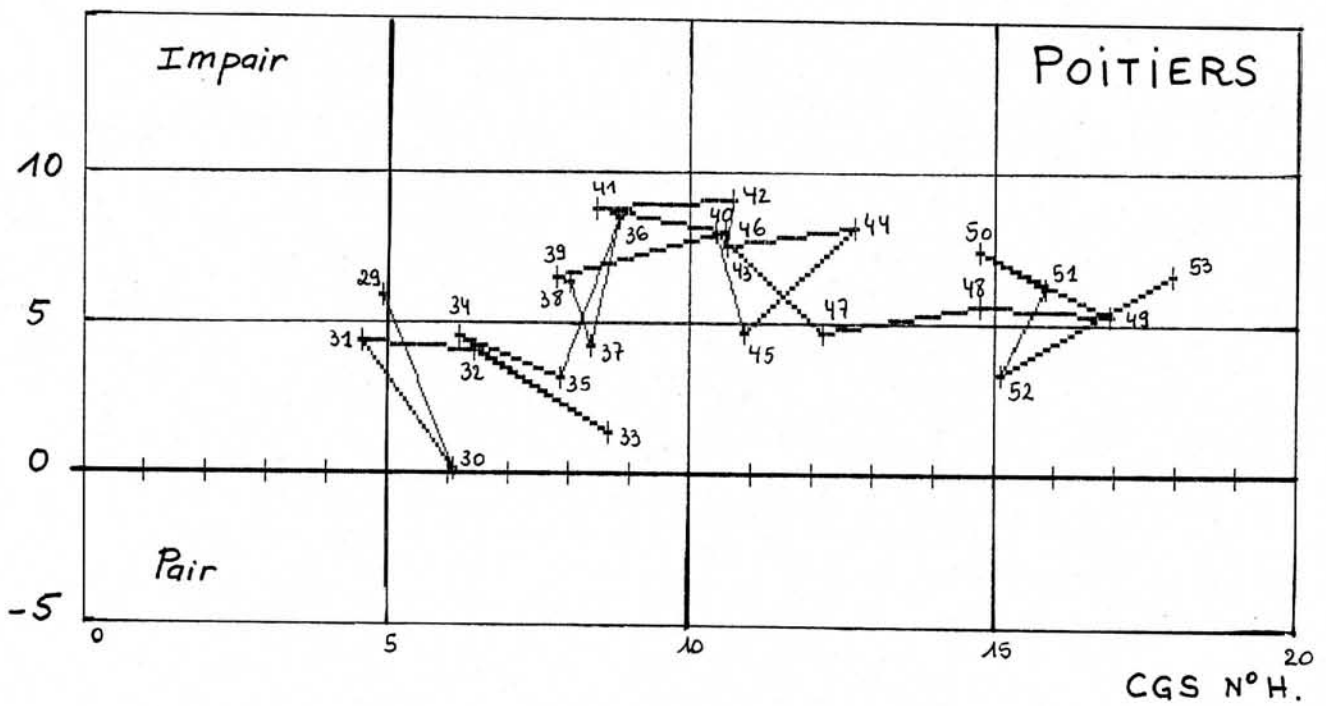


Document N°6a : représentation du C.G.S. normalisé en fonction du rapport harmoniques impair/harmoniques pairs - Dole et Dijon

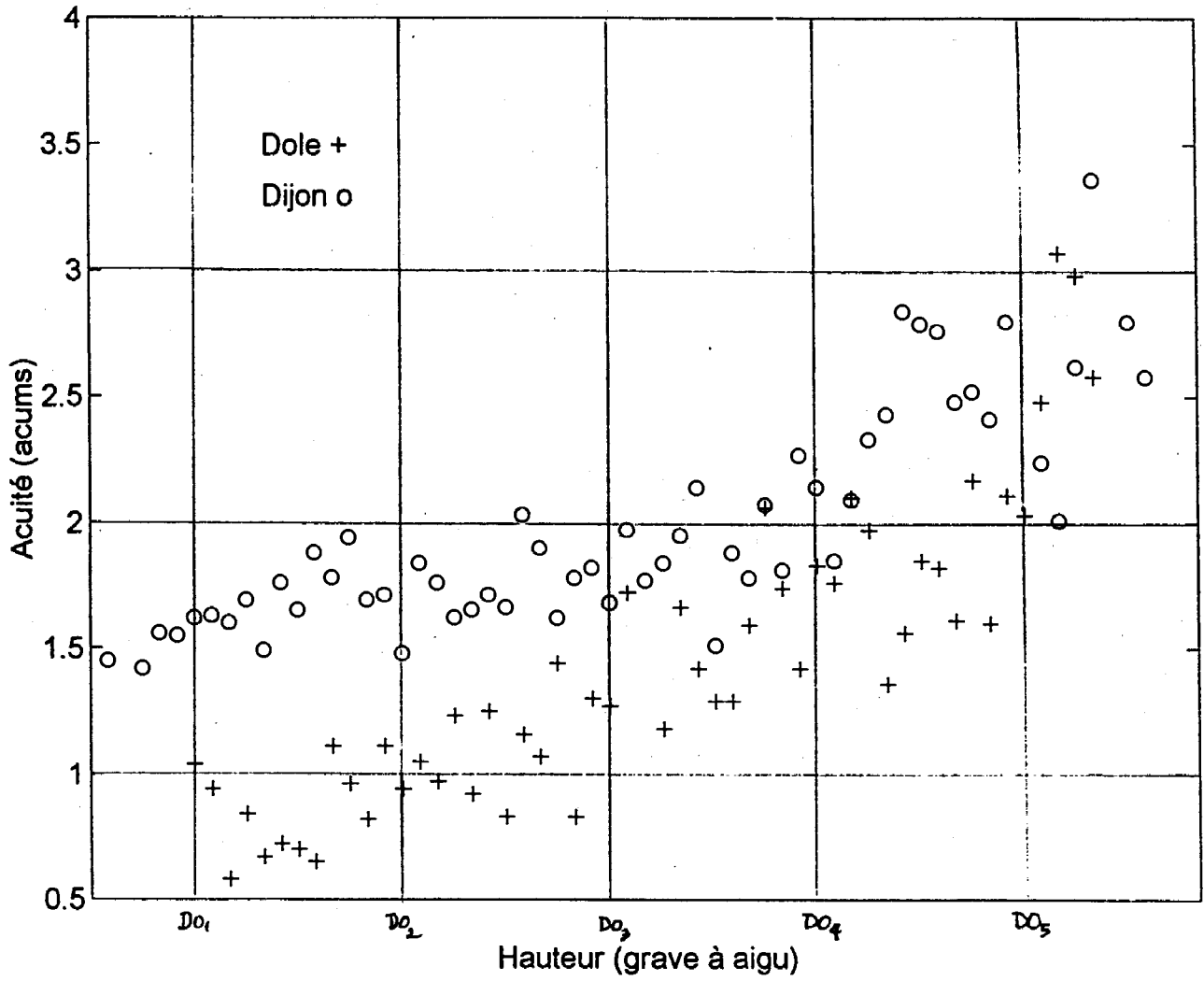




Document N°6b : représentation du C.G.S. normalisé en fonction du rapport harmoniques impair/harmoniques pairs -Poitiers et St Maximin



CROMORNE DU POSITIF



Document N°7 : Représentation de l'acuité.

DIJON --- TROMPETTE DU POSITIF

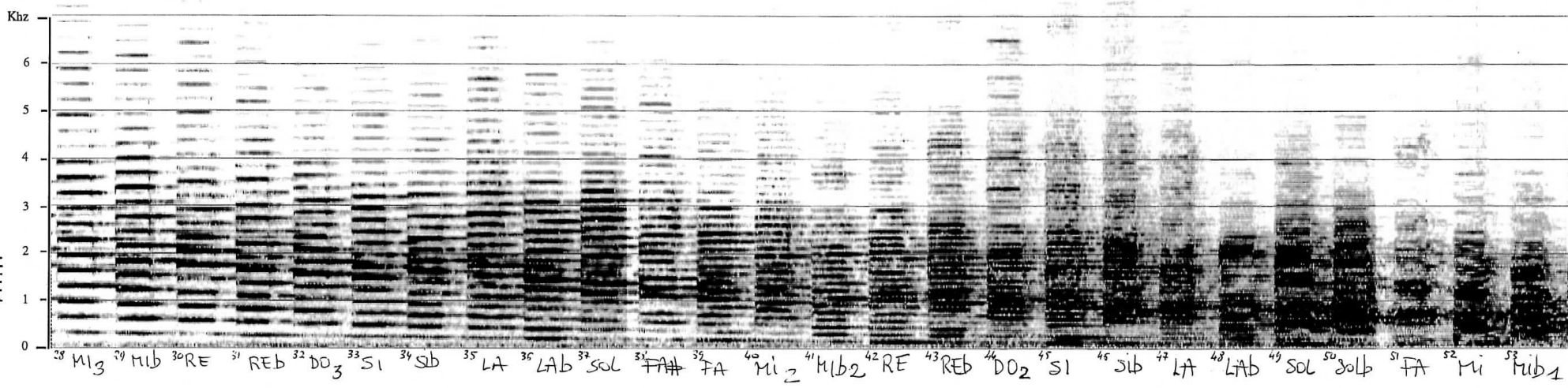
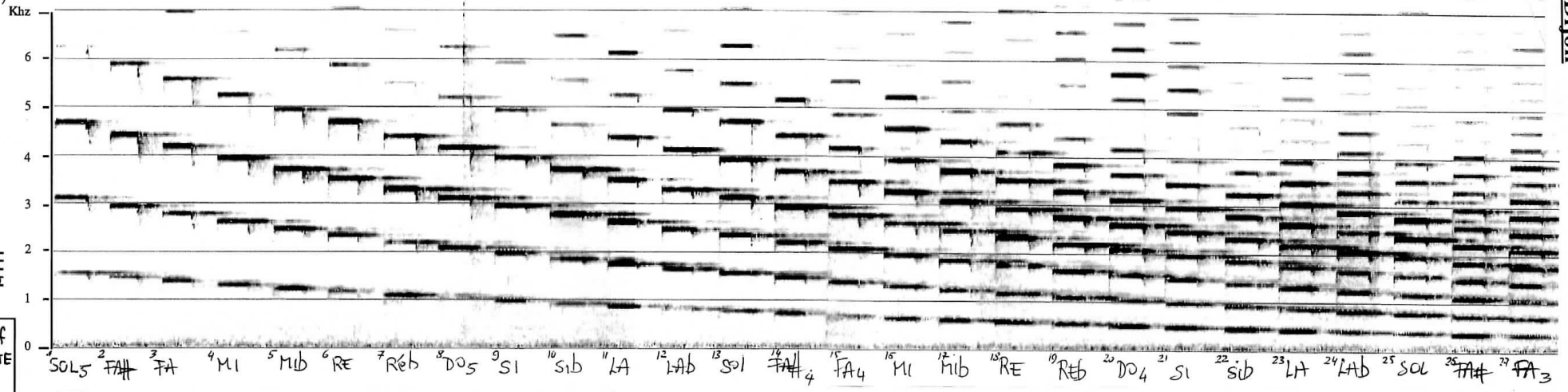
Janvier 1996

Orgue de la Cathédrale
de **DIJON**
(Décembre 1995)

Niveau : dB
Set up N°



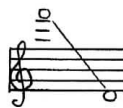
CLAVIER : Positif
JEU : TROMPETTE



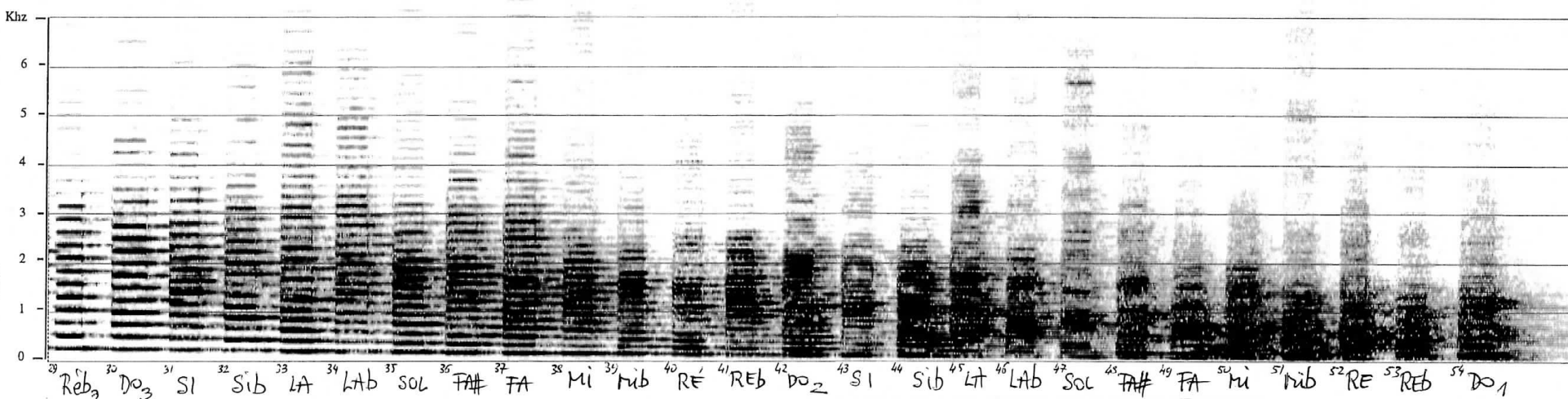
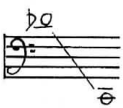
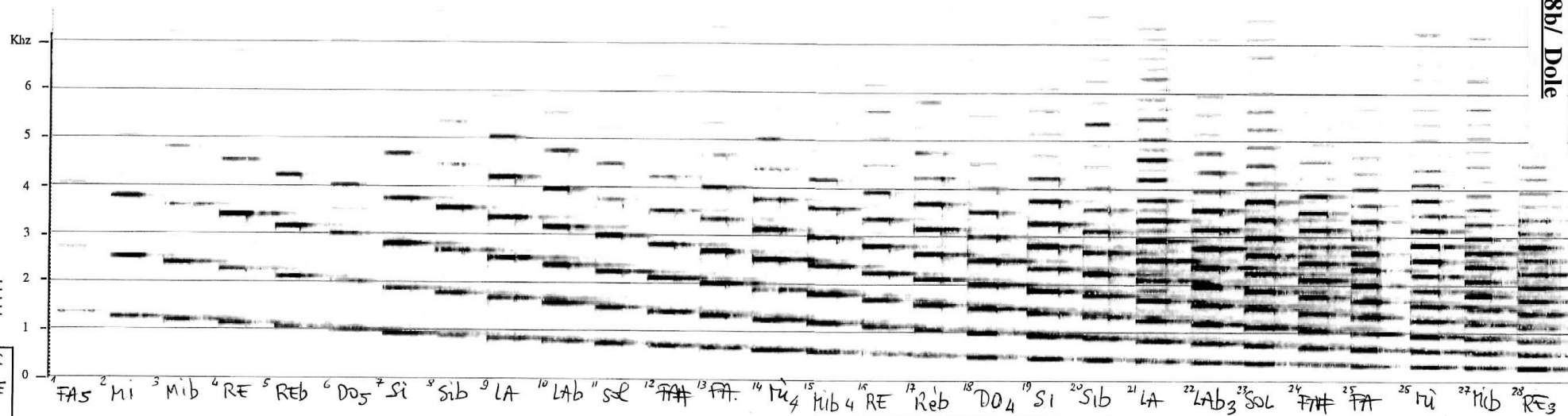
DOLE --- TROMPETTE DU POSITIF

Janvier 1996

Niveau : dB
Set up N°50



CLAVIER : Positif
JEU : TROMPETTE



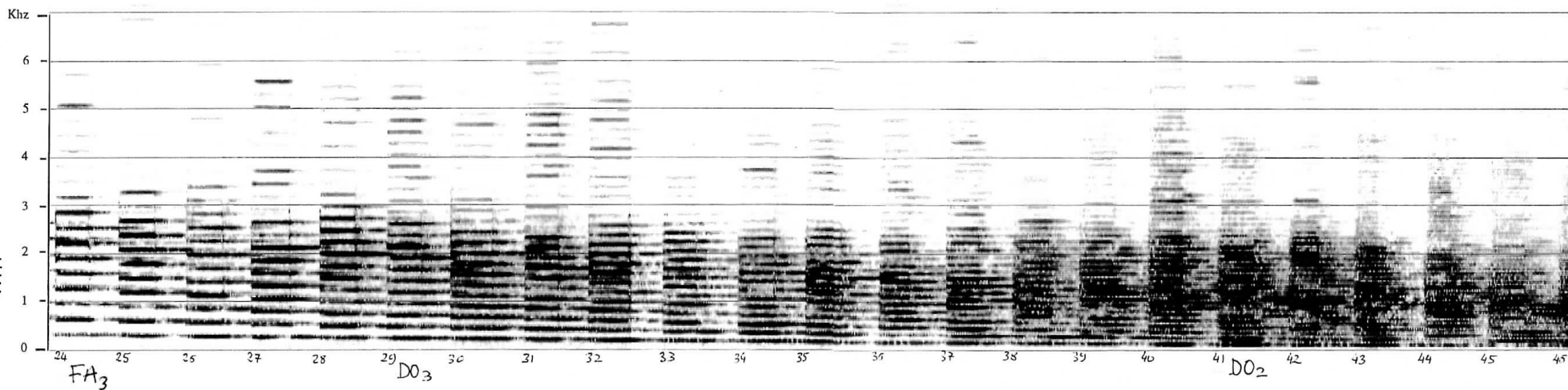
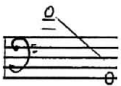
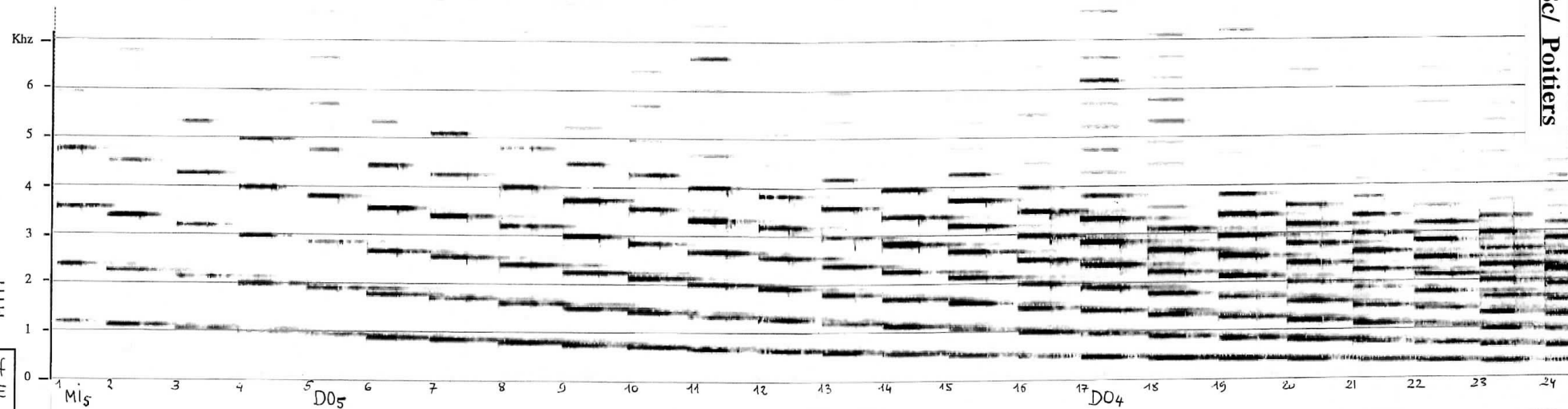
POITIERS --- TROMPETTE DU POSITIF

Janvier 1996

Niveau : dB
Set up N° 50



CLAVIER : Positif
JEU : TROMPETTE



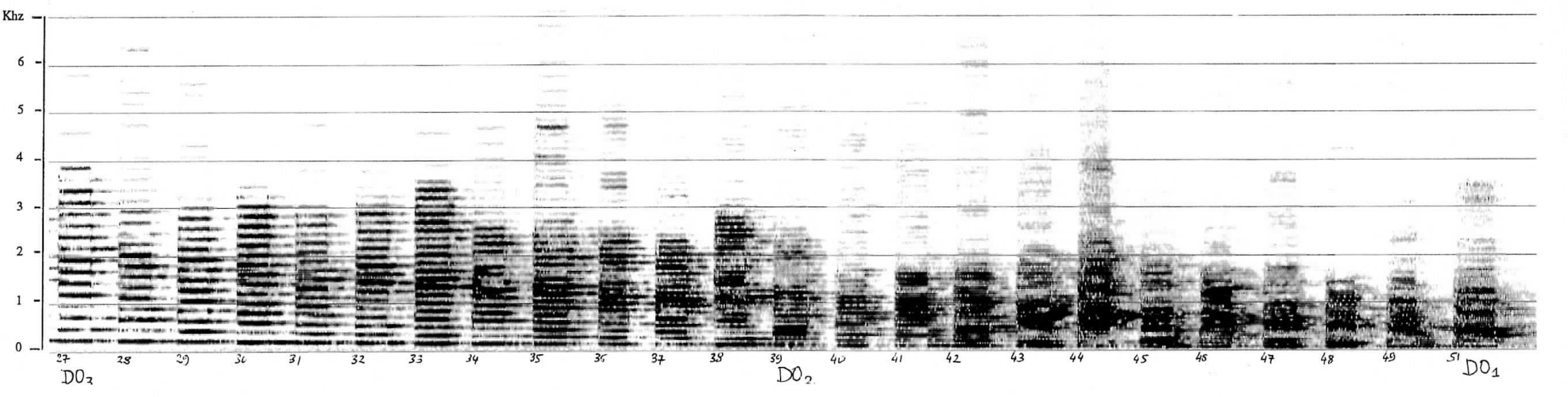
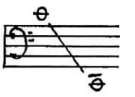
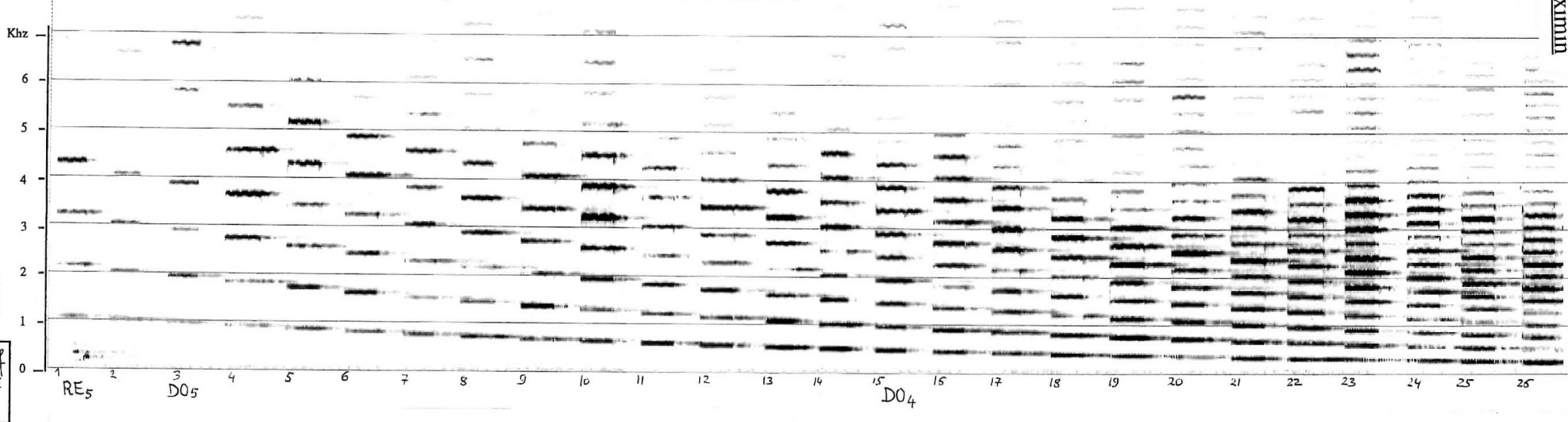
ST. MAXIMIN --- TROMPETTE DU POSITIF

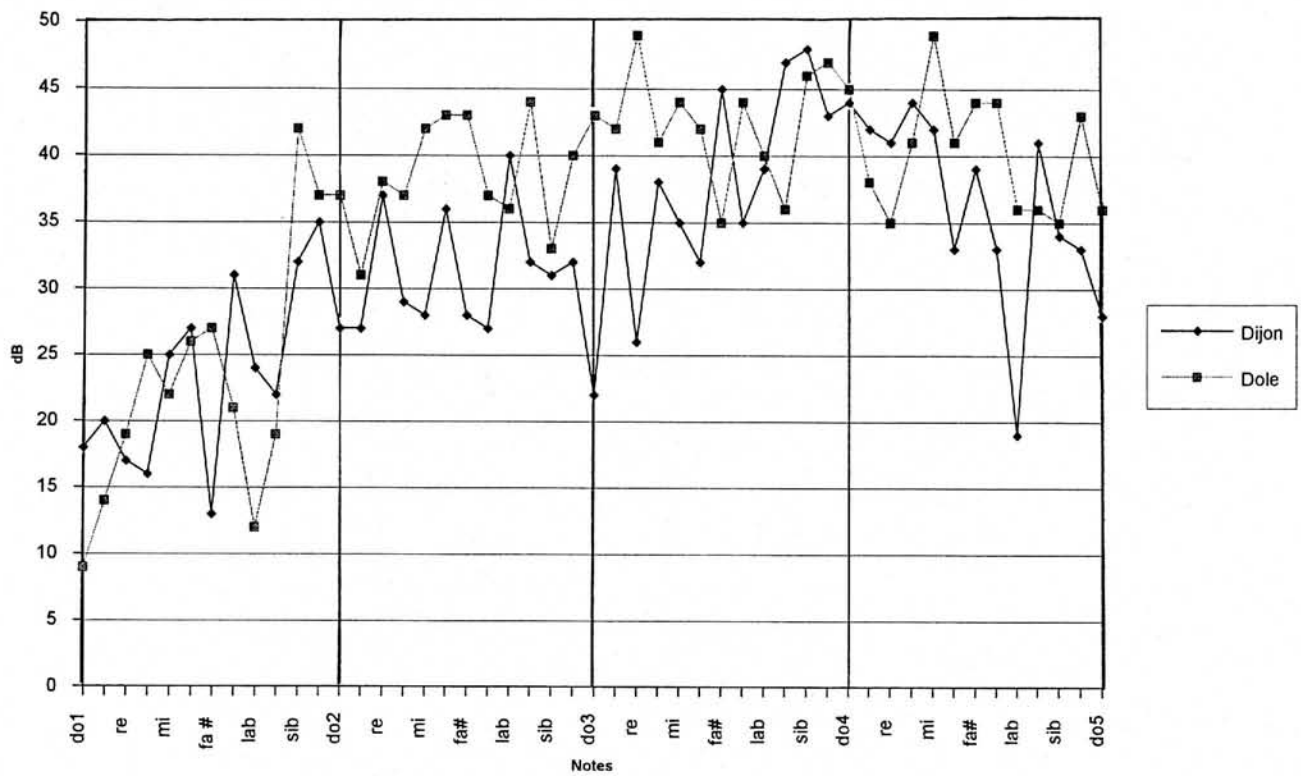
Janvier 1996

Niveau : dB
Set up N° 50

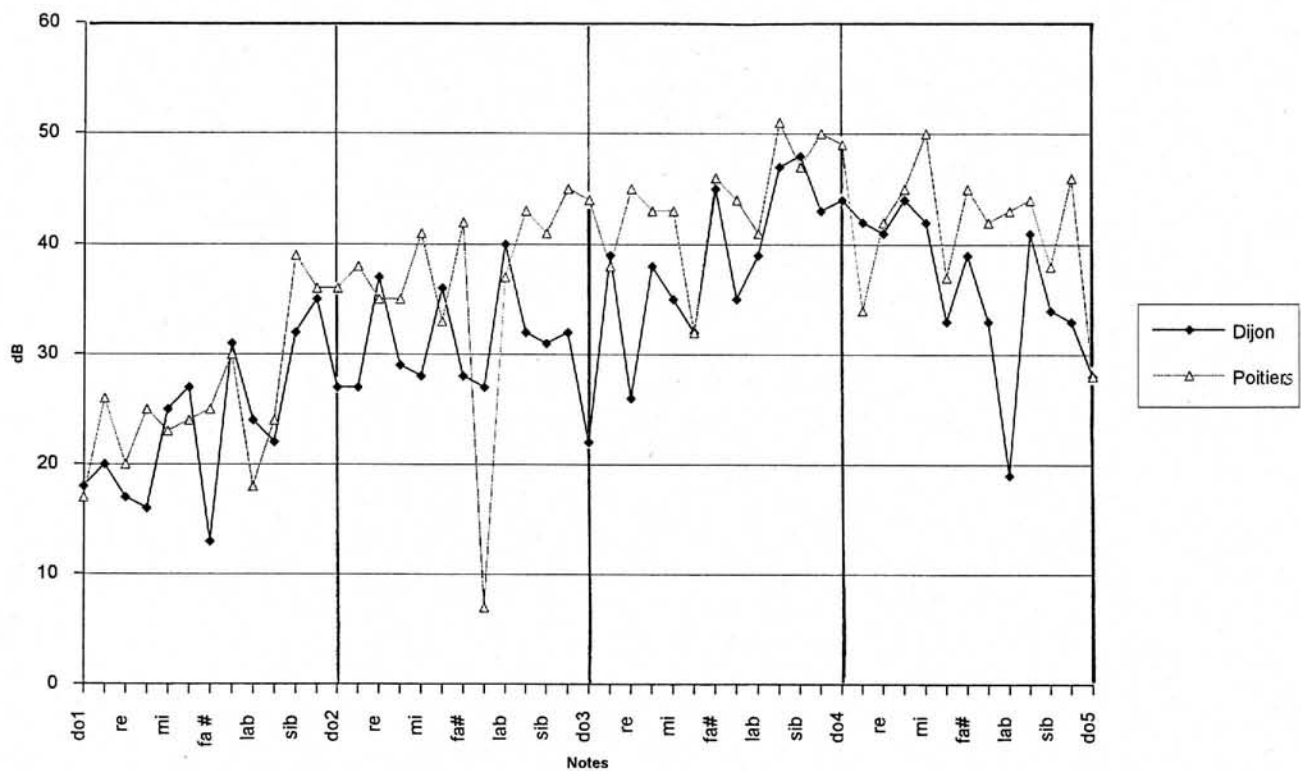


CLAVIER : Positif
JEU : TROMPETTE

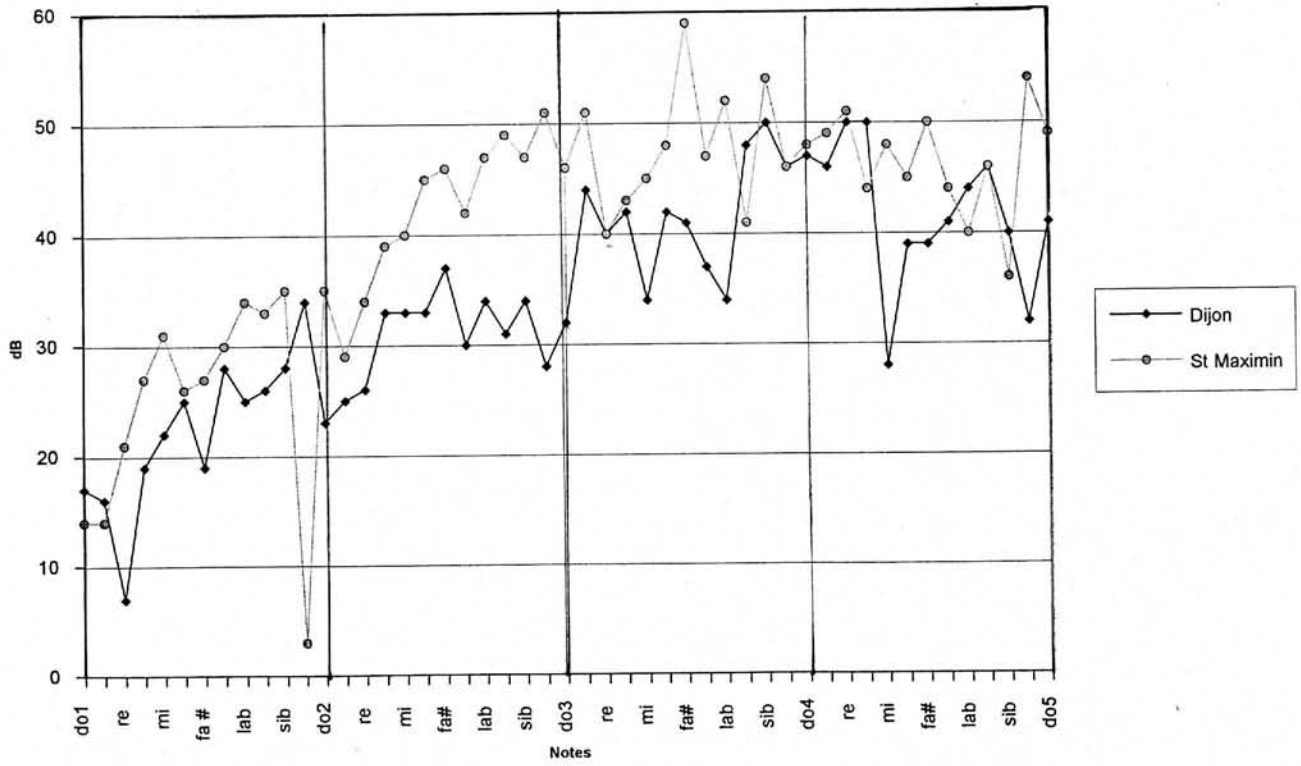




Document N°9 : Intensité du fondamental - 9a/ Dijon et Dole



Document N°9 : Intensité du fondamental - 9b/ Dijon et Poitiers



Document N°9 : Intensité du fondamental - 9c/ Dijon et St Maximin

DIJON --- TROMPETTE 1° DU GRAND ORGUE

Janvier 1996

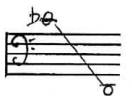
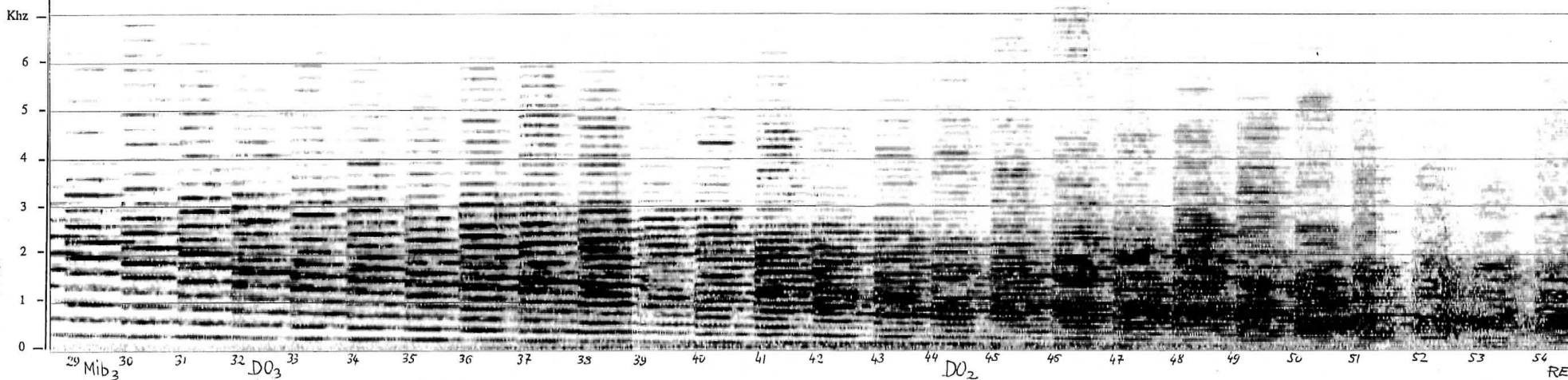
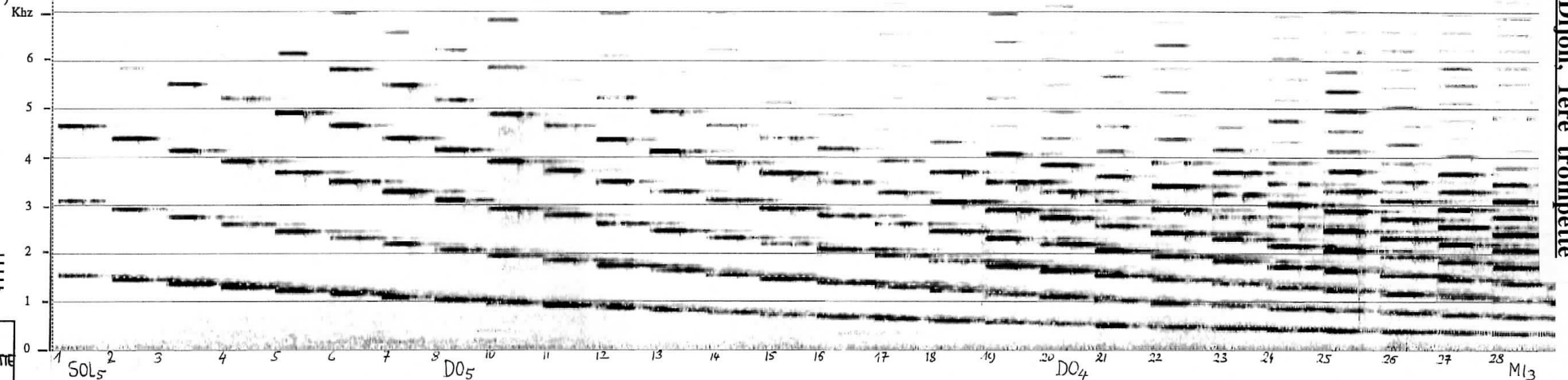
Orgue de la Cathédrale
de DIJON
(Décembre 1995)

Niveau : dB

Set up N° 50



CLAVIER : G. O.
JEU : 1° TROMPETTE



DIJON --- TROMPETTE 2° DU GRAND ORGUE

Janvier 1996

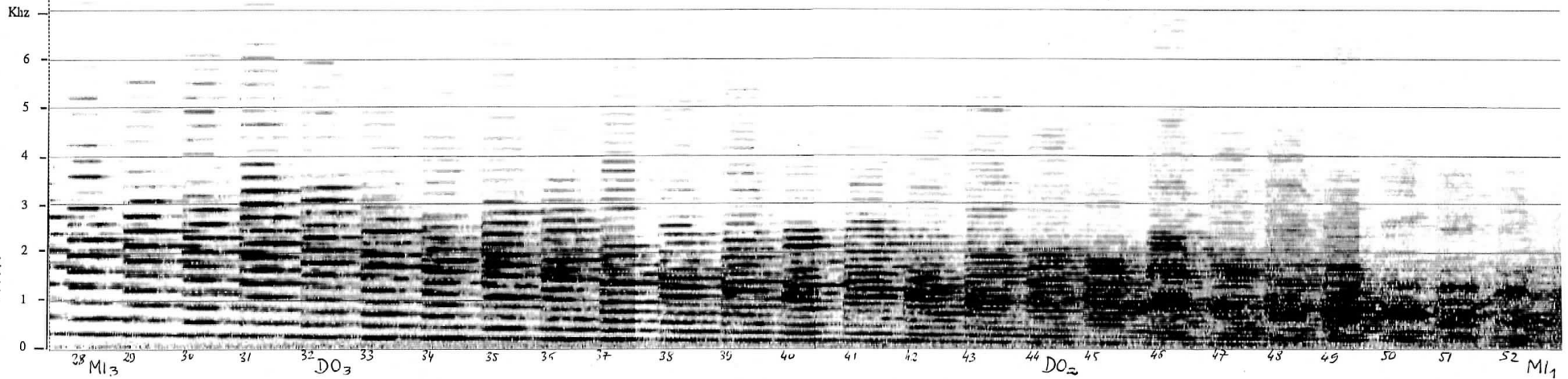
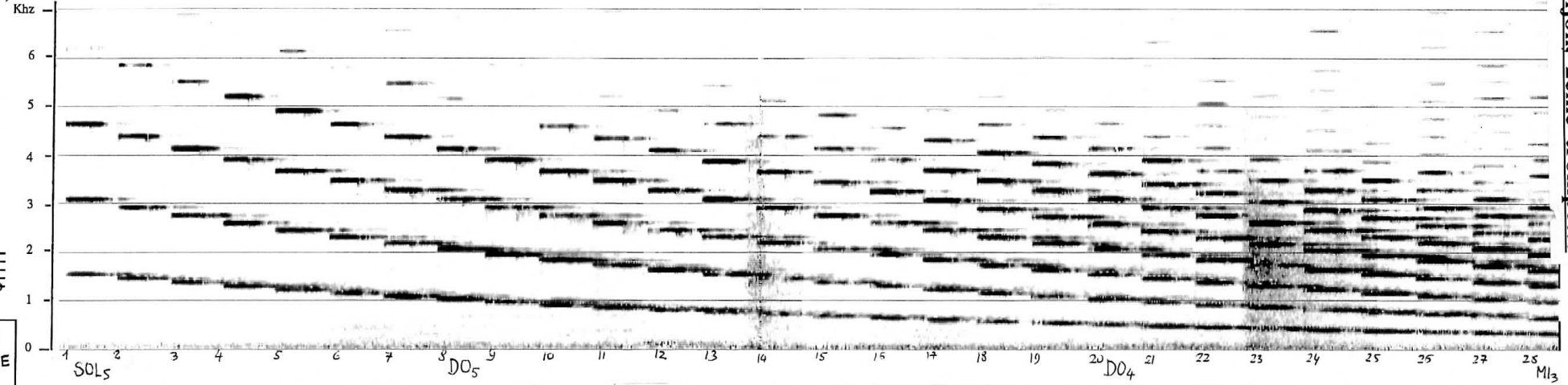
Orgue de la Cathédrale
de DIJON
(Décembre 1995)

Niveau : dB

Set up N° 50



CLAVIER : Gd O
JEU : 2° TROMPETTE



UNIVERSITE DE LORRAINE - UNIVERSITE DE LORRAINE - UNIVERSITE DE LORRAINE

DIJON --- TROMPETTE 3° DU GRAND ORGUE

Janvier 1996

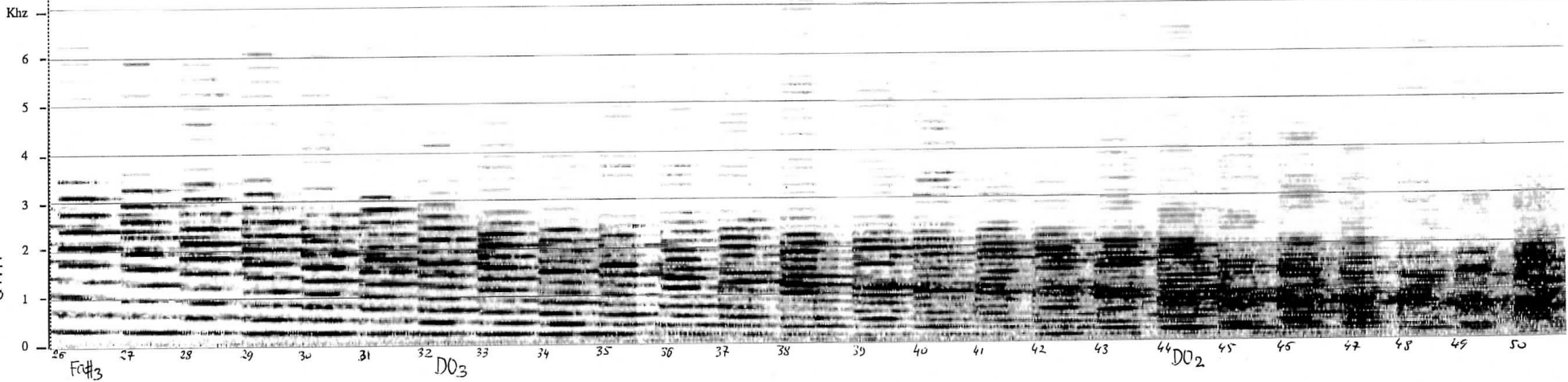
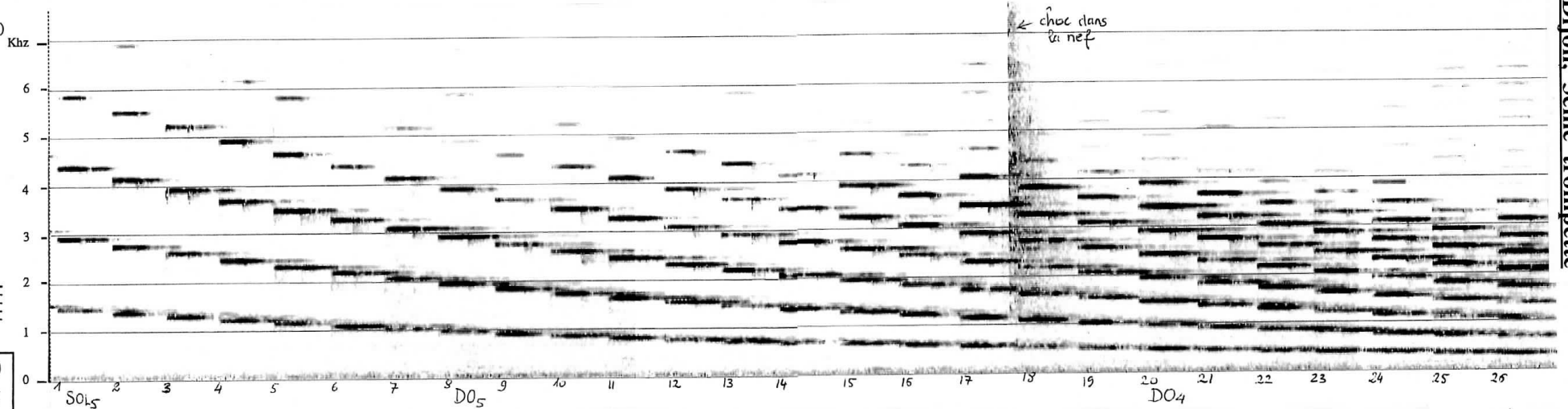
Orgue de la Cathédrale
de DIJON
(Décembre 1995)

Niveau : dB

Set up N° 50



CLAVIER : Gd O
JEU : 3° TROMPETTE



SPECTROGRAMME N° 10c/ DIJON, 3ème trompette

DOLE --- TROMPETTE 1° DU GRAND ORGUE

Janvier 1996

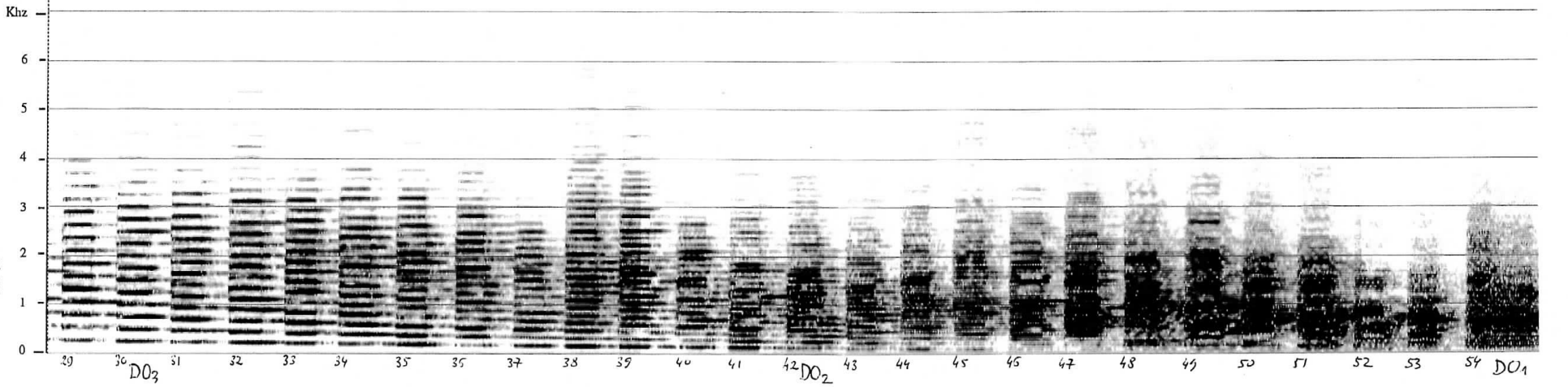
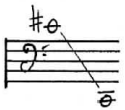
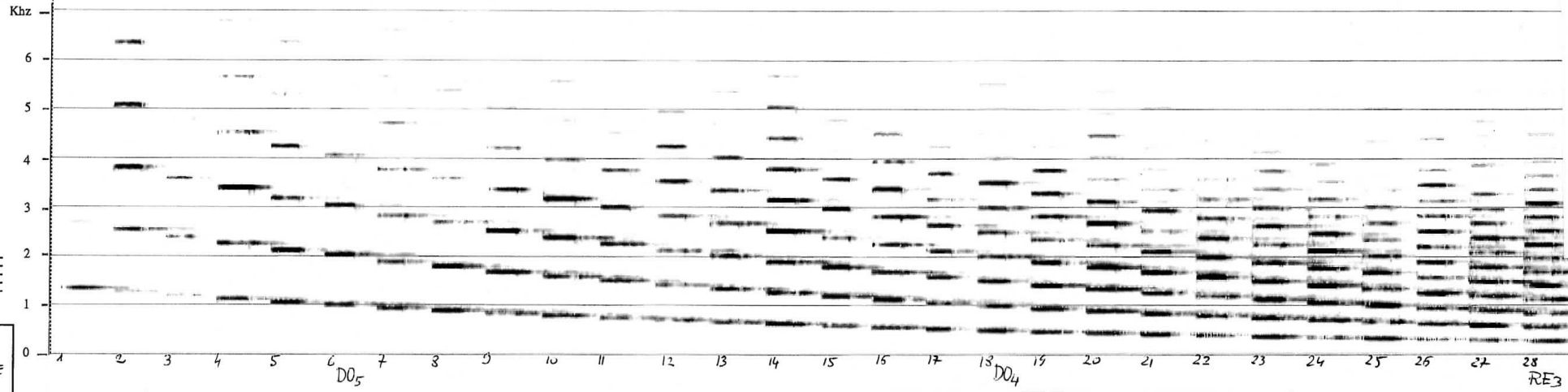
Orgue de la Cathédrale

Niveau : dB

Set up N° 50



CLAVIER : Gd O
JEU : 1 TROMPETTE



DOLE --- TROMPETTE 2° DU GRAND ORGUE

Janvier 1996

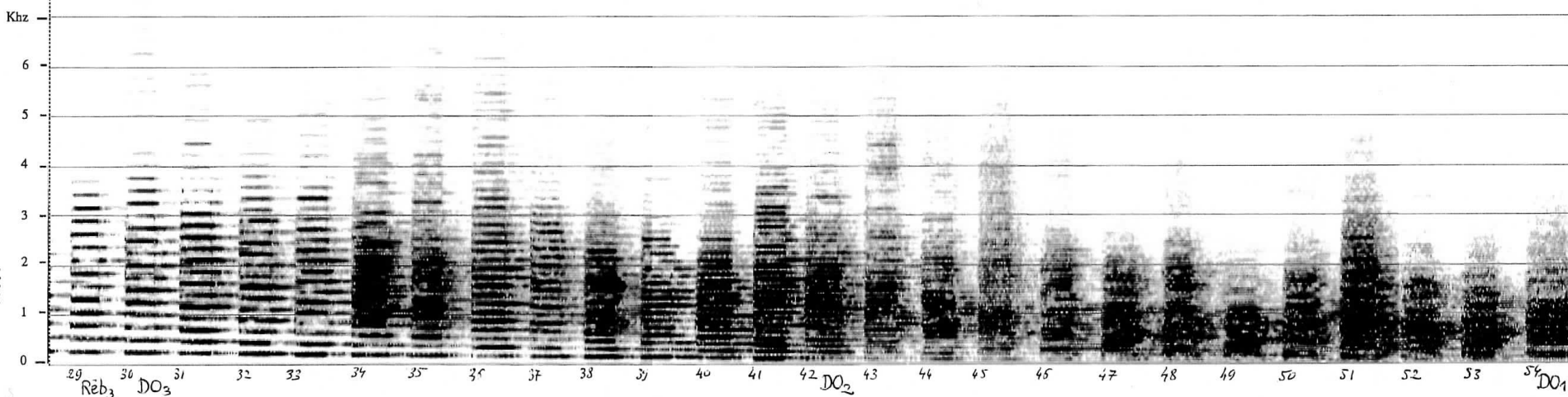
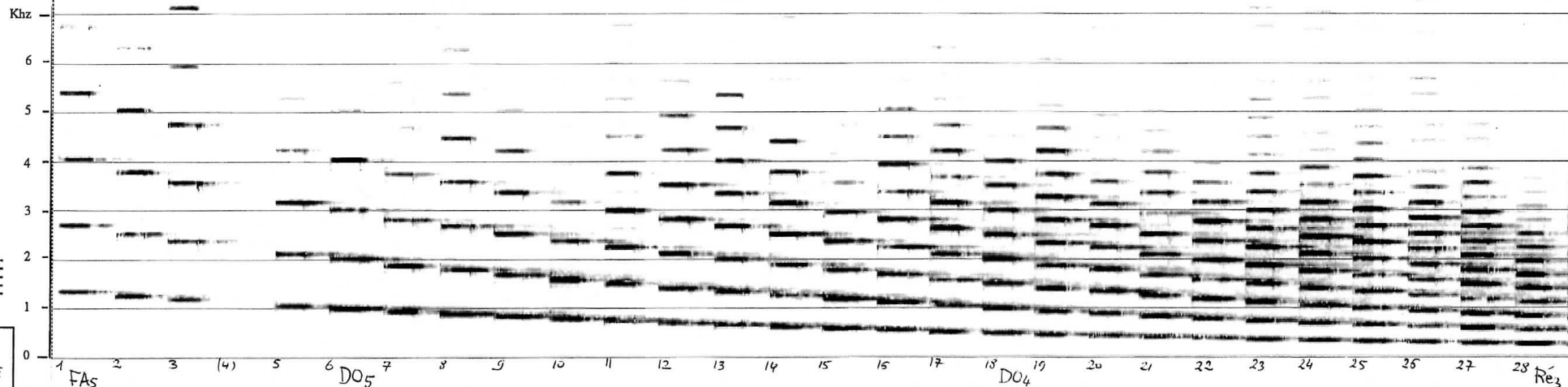
Orgue de la Cathédrale

Niveau : dB

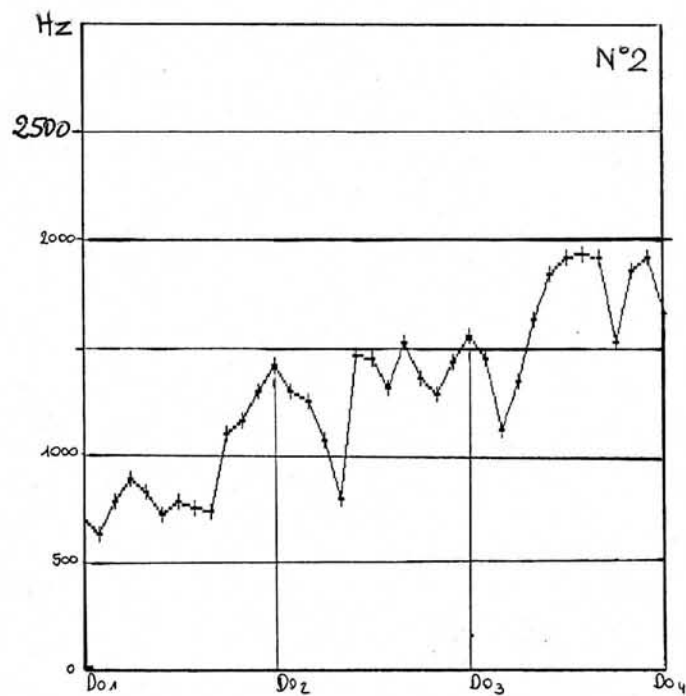
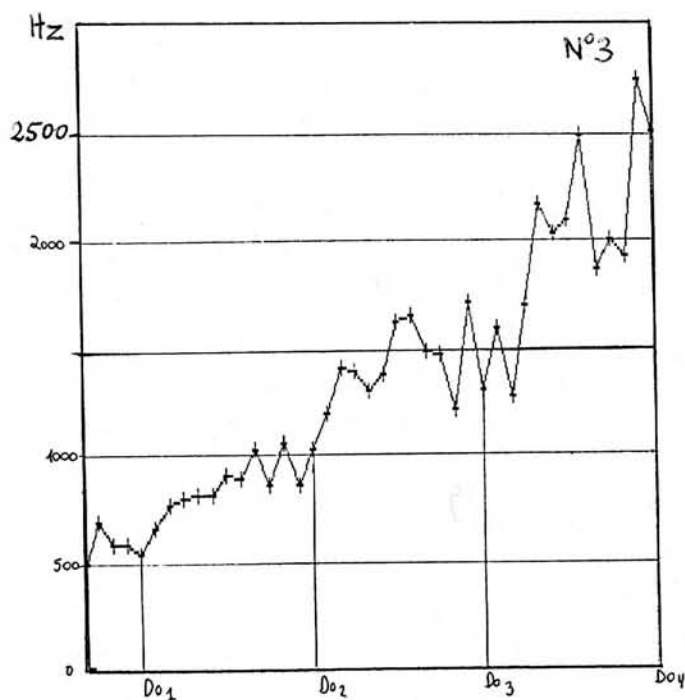
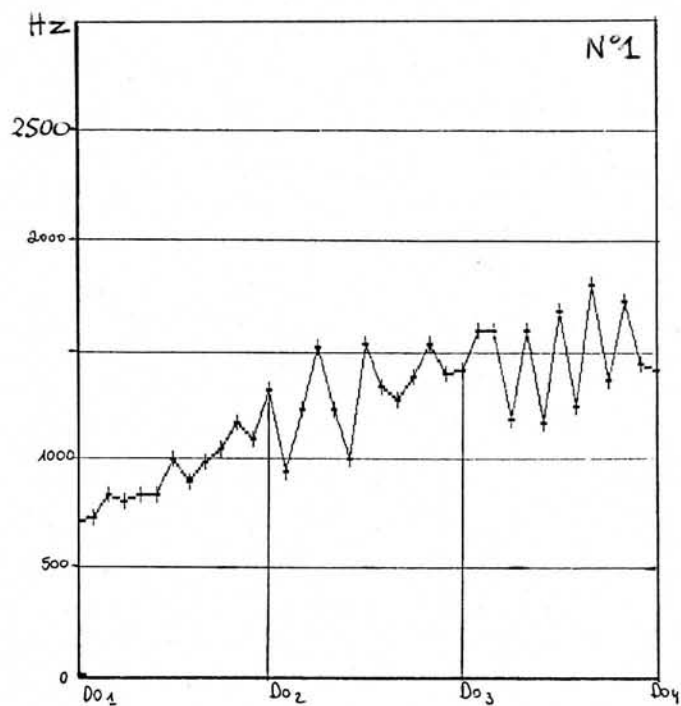
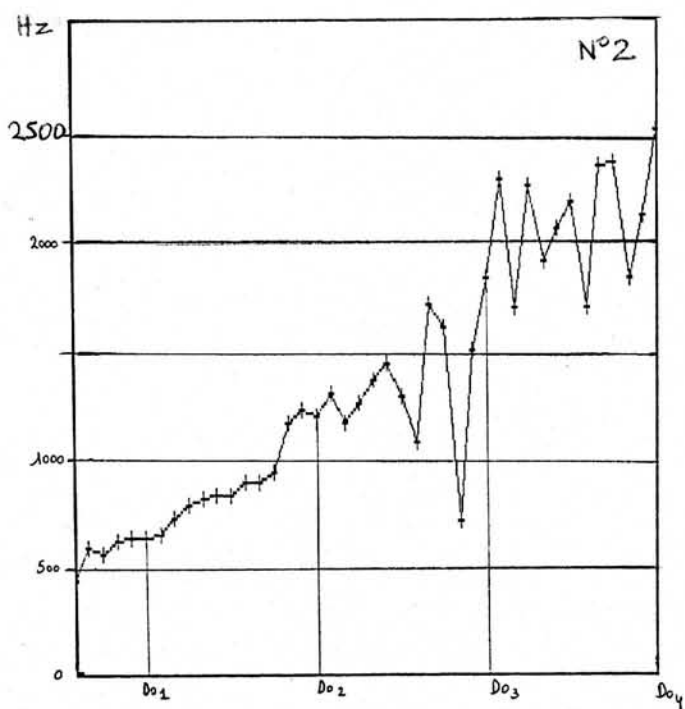
Set up N° 50



CLAVIER : Gd O
JEU : 2° TROMPETTE



Document N°11 : CGS non normalisé -

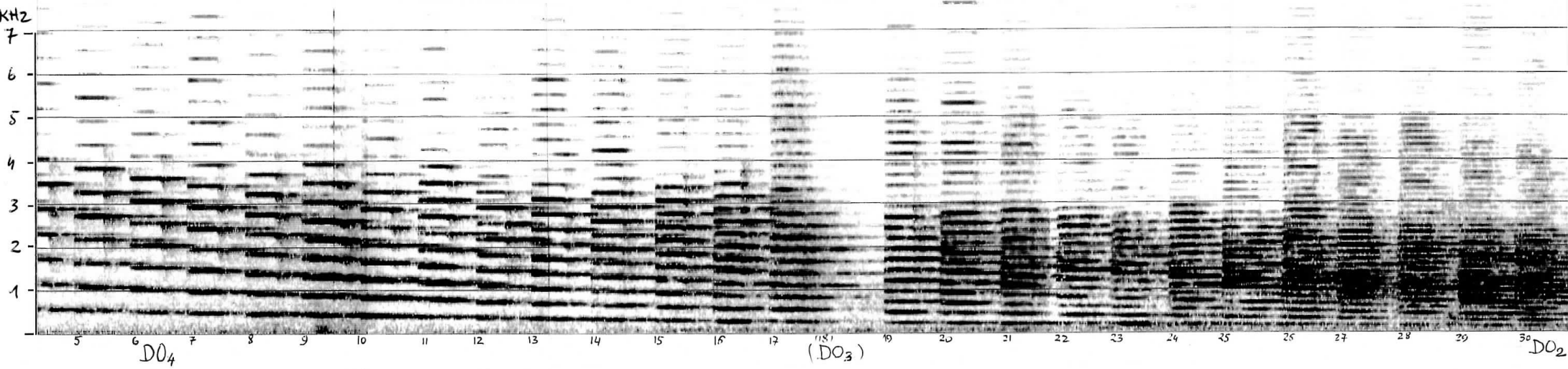
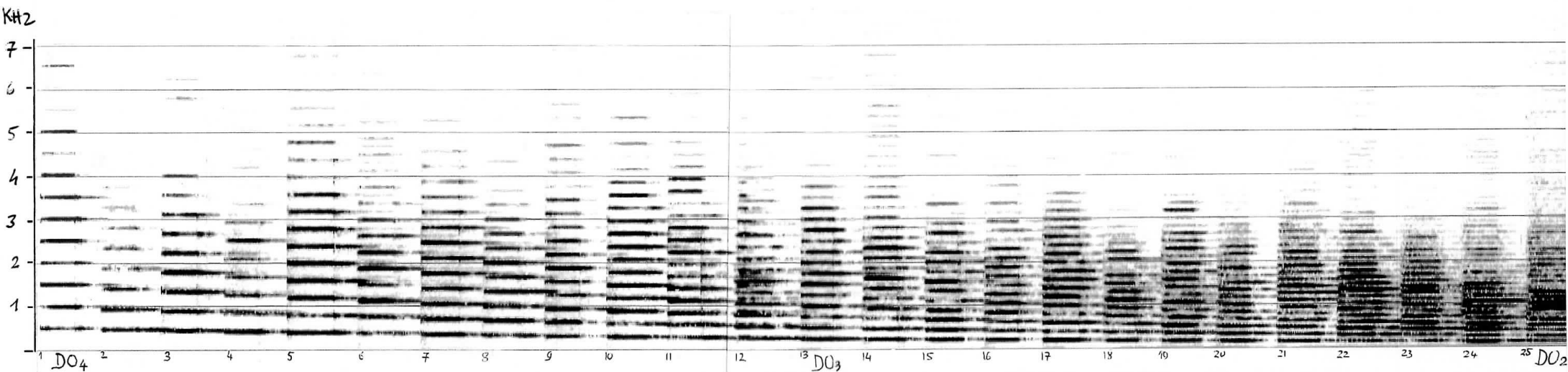


11a/ Dijon, trompettes 2 et 3

11b/ Dole, trompettes 1 et 2

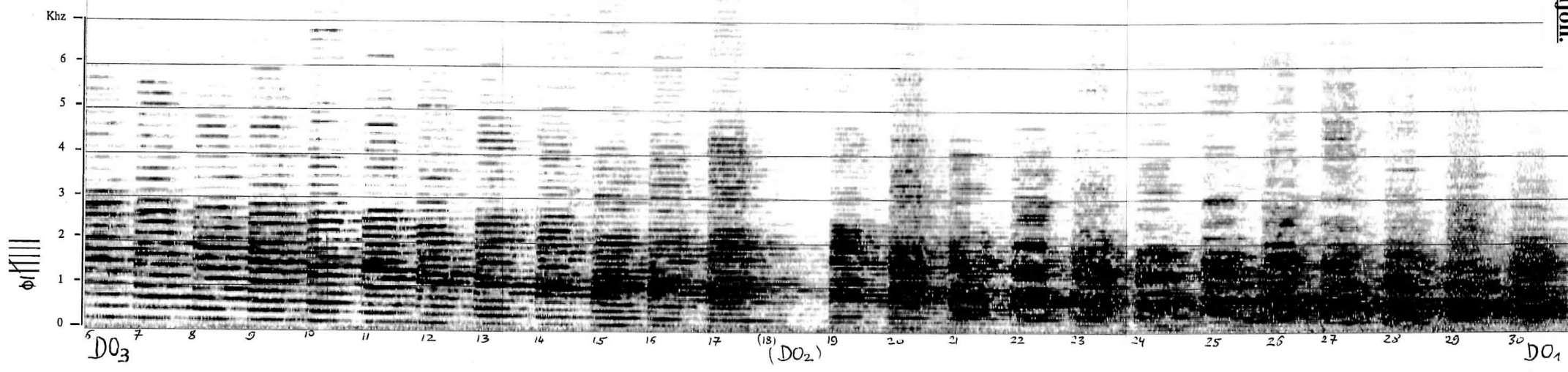
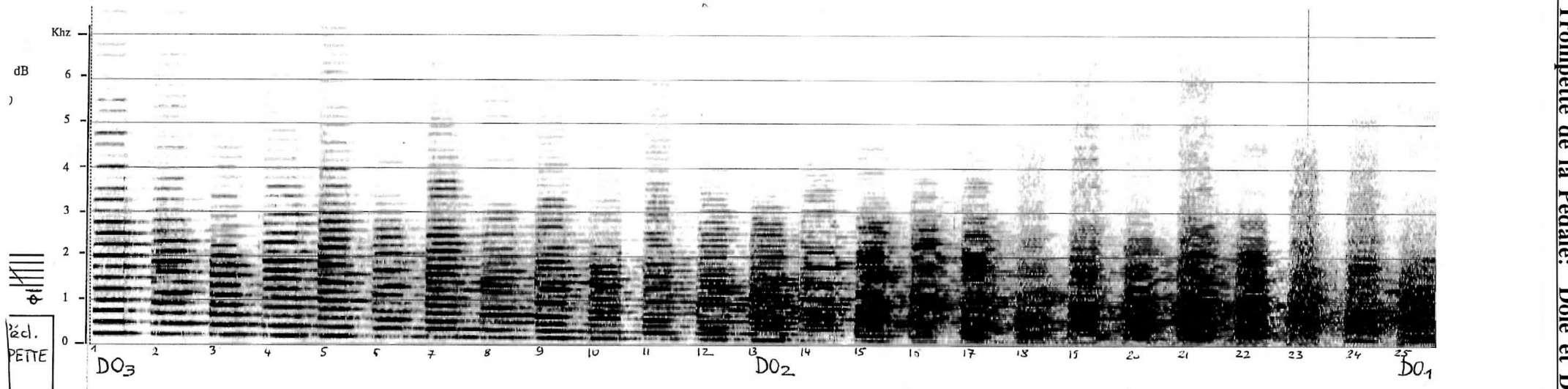
DOLE et DIJON --- CLAIRON 4' DE LA PEDALE

Janvier 1996

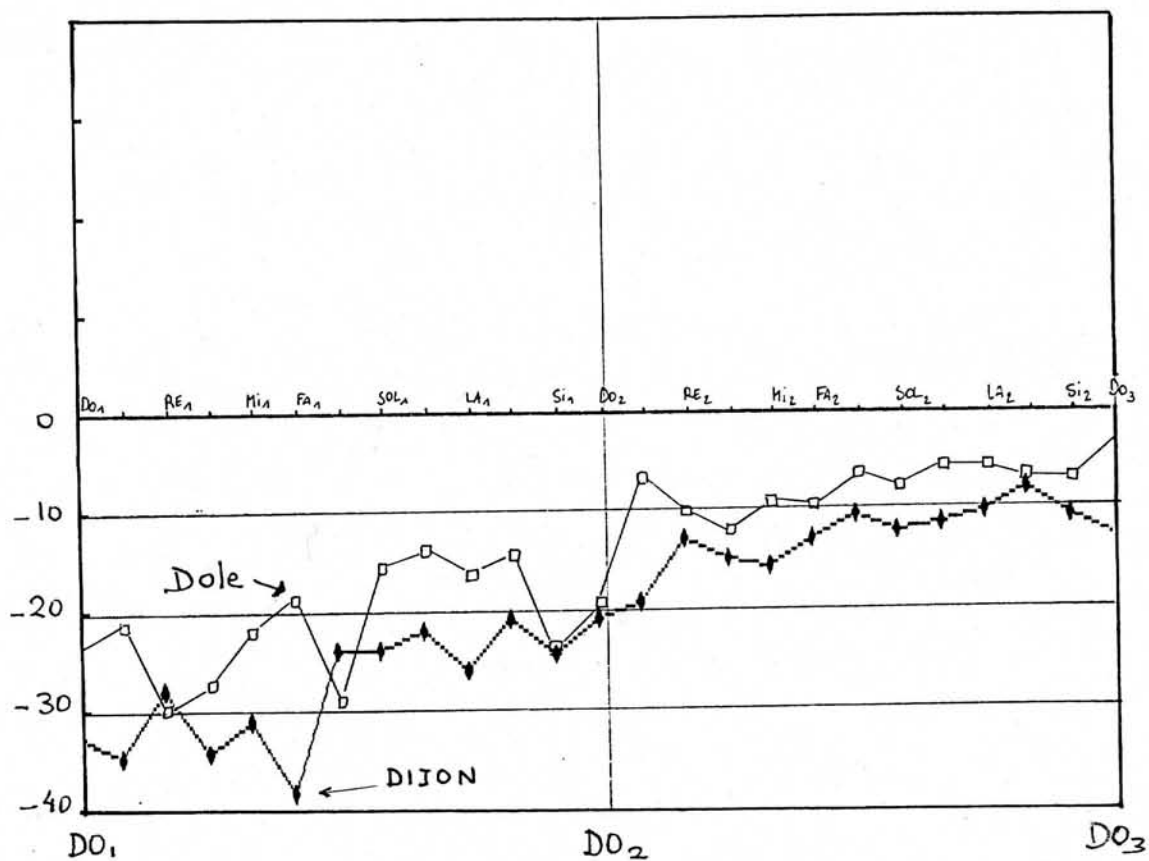
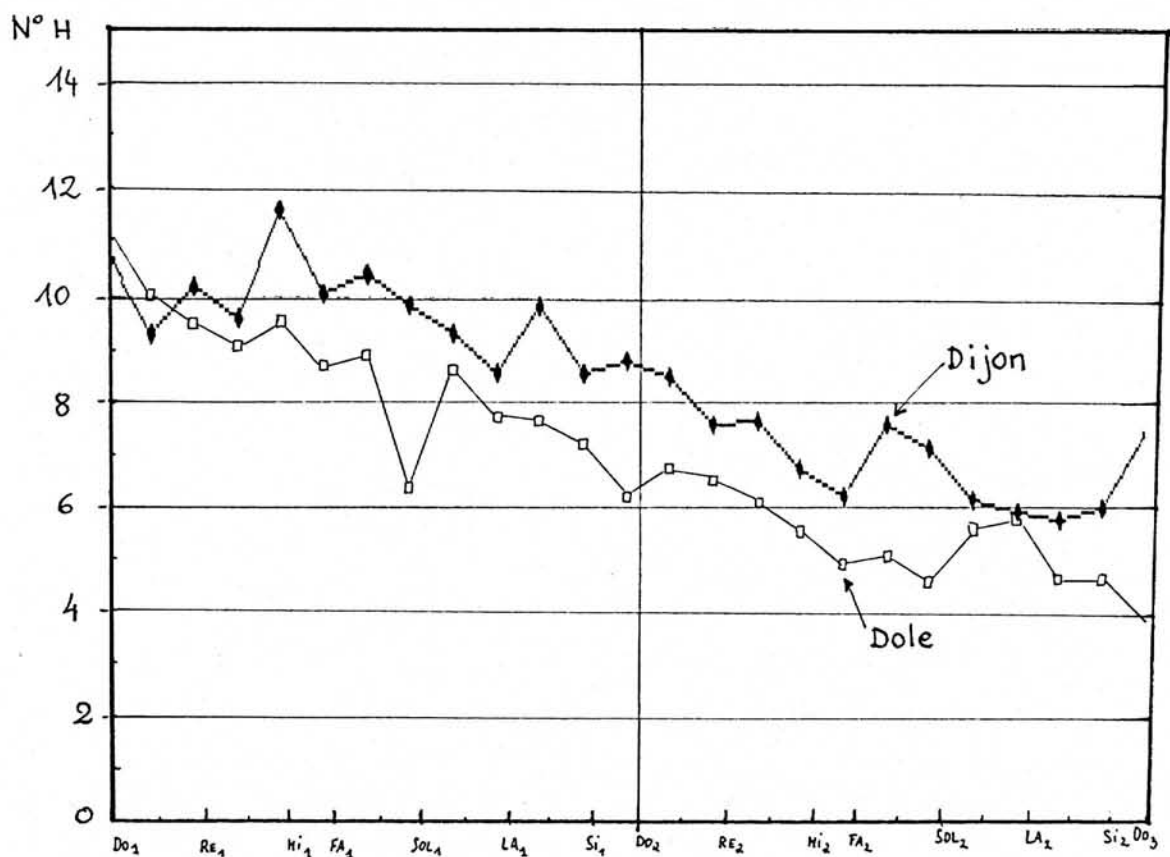


DOLE et DIJON --- TROMPETTE DE LA PEDALE

Janvier 1996



Document N°13a/ Trompette de la pédale, CGS normalisé: Dole et Dijon



Document N°13b/ Trompette de la pédale, rapport H(1+2)/tout : Dole et Dijon

