

# un diapason électronique nouveau à l'Opéra de Paris\*

par E. LEIPP (1), F. AGOSTINI (2), M. CASTELLENGO (3)

## 1) présentation

par F. AGOSTINI

Nous allons parler du diapason, c'est-à-dire de l'appareil émettant un signal sonore servant de base à l'accord des instruments et aux études vocales.

Nous n'en parlerons pas en théorie, mais de manière positive puisque nous allons vous présenter un diapason électronique, de type entièrement nouveau.

Cet appareil est le résultat de mesures précises et d'études qui ont été poursuivies pendant plusieurs années. Les relevés, analyses et constatations effectués sont basés sur des enregistrements que tous les chercheurs pourront écouter, s'ils le désirent. Nous n'avancerons donc rien dont nous ne soyons absolument certains et qui ne puisse être vérifié.

La présente réunion du Groupe d'Acoustique Musicale, qui se tient exceptionnellement à l'Opéra, consacre la participation de la Réunion des Théâtres Lyriques Nationaux aux tra-

voux entrepris par le Laboratoire d'Acoustique de la Faculté des Sciences de Paris, depuis 1963.

A cette même époque, l'Opéra et l'Opéra-Comique ont vu s'intensifier les discussions qui continuent d'ailleurs entre chanteurs et musiciens d'orchestre. Les premiers reprochent, en toute bonne foi, aux seconds de baser leur accord sur une fréquence de plus en plus élevée, ce qui est, disent-ils, de plus en plus gênant pour une bonne émission vocale.

Cette inquiétude est très compréhensible chez les chanteurs lyriques. Gênés souvent par des costumes inconfortables, contraints, pour s'exprimer, de surmonter les difficultés musicales et vocales de longues partitions, ils sont, de tous les artistes, ceux qui ont la tâche la plus périlleuse et la plus lourde responsabilité. Préoccupés par tout ce qui peut compliquer encore leur art, ils ont été troublés par les affirmations de personnes incompétentes ou mal informées qui ont accusé le diapason d'une montée constante.

Nous pouvons, aujourd'hui, dissiper leurs craintes. Certes, on sait, de manière d'ailleurs imprécise, que, dans un passé lointain, les références de base ont été souvent inférieures aux normes actuelles. Mais, plus près de nous, c'est le contraire qui s'est produit, et cela de manière certaine.

En 1855, le célèbre physicien LIS-

SAJOURS notait que le  $la_3$  donné par M. FERRAND, 1<sup>er</sup> Violon de l'orchestre de l'Opéra, était à 449 Hz, ou vibrations doubles par seconde. En 1856, le même homme de science notait 445,8 Hz pour le  $la_3$  donné par un diapason à fourche. En 1858, le  $la_3$  du hautbois de l'Opéra était à 457 Hz. En 1859, Hector BERLIOZ, animé par la même psychose que nos chanteurs actuels, en raison sans doute de l'intérêt qu'il portait à une chanteuse anglaise, prédisait que, si l'on n'y prenait garde, le diapason monterait d'1/2 ton tous les cinquante ans. Il proposait de fixer définitivement le  $la_3$  à 898 vibrations par seconde, soit 449 Hz.

Je viens de citer quatre chiffres indiscutables. Ils apportent la preuve qu'à la période évoquée, où venaient d'être créés « GUILLAUME TELL » — « LES HUGUENOTS » — « LE PROPHETE » — « LA DAMNATION DE FAUST » et d'autres ouvrages aux aigus très élevés, la fréquence moyenne de base était de 450 Hz. C'est-à-dire beaucoup plus haut que de nos jours. Il ne faut donc plus parler « d'une montée constante du diapason ».

Pour revenir aux préoccupations de l'Opéra et de l'Opéra Comique, signalons qu'elles concernent aussi la question inquiétante de l'accord des pianos de répétitions. Non seulement en raison de l'absence de tout appareil de contrôle, mais encore parce qu'on a remonté parfois des notes trop

\* Compte rendu de la réunion à l'Opéra de Paris du Groupe d'Acoustique Musicale (GAM) de la Faculté des Sciences de Paris. Février 1969 (Bulletin GAM n° 40).

\* Manuscrit remis en novembre 1969.

(1) E. LEIPP, Maître de recherche au C.N.R.S., Chef du Laboratoire d'Acoustique de la Faculté des Sciences de Paris.

(2) F. AGOSTINI, Directeur à l'Opéra de Paris.

(3) M. CASTELLENGO, Professeur de Musique d'Etat. Assistant au Laboratoire d'Acoustique de la Faculté des Sciences de Paris.

basses, sans effectuer un accord complet de l'instrument. Les rectifications partielles, lorsqu'elles se multiplient, aboutissent à une montée totale et excessive du piano. C'est ce qui s'est produit en 1964 dans cette même salle, avec le piano que voici.

Pour mettre fin à des accords de fantaisie et à des discussions constantes entre artistes, M. Georges AURIC, alors Administrateur de la Réunion des Théâtres Lyriques Nationaux, m'a adressé la note suivante :

« Il est apparu absolument indispensable que les Théâtres Lyriques Nationaux disposent d'un diapason dans la fosse d'orchestre, avec relais dans les salles de répétitions. « Je vous serais obligé d'examiner les problèmes que pose cette installation et de me soumettre le devis correspondant ».

Cette note d'allure anodine ne fait état que de problèmes de prix et d'installation, ce qui sous-entend qu'il devait suffire de se procurer un bon appareil de référence et de prévoir son utilisation pratique dans nos deux théâtres. Il n'était pas question de la hauteur du signal sonore pas plus d'ailleurs qu'il n'en sera question aujourd'hui. Le thème de notre réunion est simplement la présentation puis l'explication d'un appareil nouveau, susceptible d'émettre, dans des conditions particulières, le signal que l'on aura choisi.

J'ai donc été chargé d'une mission que je savais beaucoup plus complexe qu'elle ne paraissait. Je l'ai entreprise d'une manière volontairement naïve. Je suis entré en rapport avec le directeur du Conservatoire des Arts et Métiers qui détient les étalons officiels des poids et des mesures et j'ai demandé à entendre le diapason officiel donnant le  $la_3$ . Naturellement, le directeur du Conservatoire m'a répondu que semblable appareil n'existe pas et il m'a adressé, pour information, au Laboratoire National d'essais. Le directeur d'alors, M. BELLIER et l'un de ses collaborateurs, M. RIETY, Chef de service des Essais Acoustiques, m'ont accueilli avec la plus affable courtoisie.

La fréquence du  $la_3$  émis par l'instrument de M. DEBRAY, hautbois solo de l'Opéra, a été mesurée par M. RIETY, dans d'excellentes conditions techniques. Cette opération est dans les attributions du Laboratoire National d'Essais, qui est un laboratoire de mesures et de vérifications, mais non un organisme de recherches. Or, le relevé précis d'une note ne règle pas tout le problème du diapason. Vous en aurez des preuves, tout à l'heure. Par contre, je savais que le Laboratoire d'Acoustique de la Faculté des Sciences de Paris poursuivait méthodiquement des travaux de recherches acoustiques et musicales

qui correspondaient à mon souci de l'accord des instruments.

J'ai donc fait la connaissance de M. LEIPP, Chef du Laboratoire d'Acoustique et de son assistante, Mlle CASTELLENGO. Je dois insister ici sur la nature exceptionnelle de ces deux chercheurs qui sont à la fois des scientifiques et des musiciens, chose bien rare.

M. LEIPP est chef du Laboratoire d'Acoustique de la Faculté des Sciences de Paris, Maître de recherches au Centre National de la Recherche Scientifique, Chargé du cours d'Acoustique au Conservatoire National Supérieur de Musique de Paris ; il est aussi Membre de la Commission de l'orgue.

Mlle CASTELLENGO, Professeur de Musique d'Etat, pianiste et flûtiste, est titulaire d'un Certificat de Musicologie et de deux Certificats de psychophysiologie. Elle va présenter bientôt, en Sorbonne, une thèse sur les instruments à embouchure de flûte.

Pour faire un travail efficace dans le domaine qui nous occupe ici, il faut posséder des connaissances musicales et scientifiques. Ceci permet de mieux comprendre qu'en abordant le problème de l'accord des instruments, on étudie un fait musical. Il est donc indispensable de pouvoir lire et analyser au préalable une partition d'orchestre, puis d'examiner et de mesurer ce qui se passe au cours de son exécution, en reconnaissant instantanément la note prise comme repère, ainsi que sa nature (Tonique ou Dominante ou Sensible ascendante ou descendante). De tous ces travaux, il faut tirer enfin des principes et des conclusions pratiques.

C'est ce qui a été fait par le Laboratoire d'Acoustique, au cours de plusieurs années de recherches. La Réunion des Théâtres Lyriques Nationaux y a collaboré de son mieux. Entre autres choses, les musiciens d'orchestre et les artistes de nos deux théâtres se sont prêtés avec beaucoup de compréhension aux enregistrements scientifiques nécessaires et je tiens à les en remercier.

« LA DAMNATION DE FAUST », à l'Opéra, et « LE BARBIER DE SEVILLE », à l'Opéra-Comique, ont été enregistrés en été et en hiver, ce qui a permis de constater et de mesurer exactement, dans la réalité d'exécutions publiques, les fluctuations de la base d'accord, produites principalement par les effets de la température.

Nous avons cherché, dans tous les pays du monde, un appareil de référence qui tienne compte de ces variations indéniables. Nous n'avons eu connaissance que d'appareils, certains très perfectionnés et extrêmement chers, qui donnent tous un son garanti fixe, quels que soient les mo-

difications du courant électrique ou les changements de la température.

Aussi, pour tenir compte de tous les faits relevés dans les enregistrements, a-t-il fallu créer un appareil électronique spécial, fonctionnant de deux manières différentes.

Le prototype que voici, pratique par son volume réduit, est alimenté à volonté par le secteur, en bi-tension, ou par une pile rechargeable. Il offre d'abord une garantie absolue de fixité de la fréquence de base, suivant le système courant. Mais, et c'est là sa grande nouveauté et sa supériorité, cet appareil peut fonctionner dans une position qui fait varier la fréquence en fonction de la température, vers le haut ou vers le bas, naturellement. Il est donc le reflet scientifiquement exact de la réalité musicale.

M. LEIPP vous démontrera tout à l'heure que, dans nos salles de spectacles où la température varie de 22 à 30° centigrades, suivant les saisons, ce serait aller à l'encontre des faits musicaux constatés que de vouloir fixer la fréquence d'accord à une hauteur immuable.

Nous avons donné à cet appareil qui, en termes scientifiques, est un diapason électronique à variation thermique programmée, le nom de **DIAVAR, DIAPASON VARIABLE**.

Ce prototype est couvert par un brevet. Le modèle définitif sera encore plus petit et le constructeur M. GIRVES, ici présent, pourra vous donner toutes précisions utiles à ce sujet.

Pour terminer ce préambule, je tiens à rassurer encore nos chanteurs en leur disant que la hauteur du  $la_3$  de base va bientôt être fixée, tant à l'Opéra qu'à l'Opéra-Comique et contrôlée à tout moment par un appareil de précision, ce qui mettra fin à toute controverse. Ils savent, dès aujourd'hui, que, contrairement à ce qu'ils croyaient sincèrement, ils chantent actuellement beaucoup moins haut que certains de leurs prédécesseurs, dans ces mêmes théâtres.

M. LEIPP va maintenant nous apporter des compléments d'information utiles.

+

+ +

## 2) le diapason électronique de l'Opéra de Paris

par E. LEIPP et M. CASTELLENGO

### 1. — INTRODUCTION

Depuis février 1964, date de notre première réunion sur le problème du diapason au Groupe d'Acoustique Musicale (GAM), nous avons eu l'occasion de revenir sur cette question à de nombreuses reprises. Les recherches que nous avons faites à partir de cette époque ont été exposées en particulier au Groupement des Acousticiens de Langue Française (GALF) par Mlle CASTELLENGO (Revue d'Acoustique n° 6, 1969 (PARIS), pp. 124 à 128) et par M. LEIPP lors des réunions du GAM, en Février 1964 (Bulletin GAM n° 3) et en Mai 1968 (Bulletin GAM n° 36). Entre temps, de nombreux éléments sont venus compléter notre documentation, qui ont abouti à la conception puis à la construction d'un diapason électronique (DIAVAR) pour l'Opéra de Paris, grâce à l'initiative de M. AGOSTINI, Directeur à l'Opéra. Pour justifier les raisons d'être de cet appareil un bref rappel historique est nécessaire.

### 2. — RAPPEL HISTORIQUE

A l'origine les musiciens étaient « solistes ». Chacun fabriquait son propre instrument qu'il s'arrangeait pour rendre jouable et efficace au mieux du point de vue acoustique. Aucune normalisation de « diapason » n'était nécessaire, et les flûtes que l'on a trouvées dans les tombeaux égyptiens montrent bien que l'on ne se souciait pas de cette question.

Cependant il fallut bien définir un « terrain d'entente », un diapason, dès que deux instrumentistes se proposèrent de jouer ensemble. La solution est bien simple lorsque l'un des deux instruments peut s'accorder de façon variable : la harpe s'accorde sur la flûte et il n'y a pas, dans ce cas, de problème de diapason. Mais un moment viendra cependant où l'orchestre comportera des instruments nombreux et variés, dont plusieurs impliquent un accord fixe assez strictement déterminé, comme c'est le cas des « vents » à trous latéraux. Dès lors, le problème de la normalisation de la fréquence d'accord va se poser de plus en plus impérieusement, surtout lorsque la musique et les musiciens vont commencer à voyager d'un pays à l'autre.

Les premières données précises sont fournies par PRAETORIUS (1618). Entre les orgues anciens existant encore de son temps et les musiciens

qui, à l'époque, se « permettaient encore de monter d'un demi-ton » par rapport à leurs confrères, la dispersion était énorme au même endroit et au même moment (Saxe) : un ton et demi. De surcroît, en d'autres lieux (Italie, Hollande, etc...), les orgues étaient alors une tierce en-dessous de celles de Saxe... Bref, la **dispersion du diapason en Europe était de l'ordre de la tierce majeure au moins**, et ceci posait bien entendu de nombreux problèmes pratiques. En effet :

— Comment va s'en sortir le musicien italien qui vient à la cour de Saxe avec sa flûte trop basse d'une tierce !

— Comment vont faire les chanteurs obligés de chanter telle œuvre écrite ailleurs pour un diapason plus haut ou plus bas d'une tierce ?

Dès cette époque, musiciens et chanteurs vont commencer à se plaindre du diapason, et rien n'est résolu en 1834 lorsque le Congrès International réuni à STUTTGART tentera de porter remède à cet état de chose en décidant que la norme serait le «  $la_3$  » de 440 vibrations par seconde (440 Hz).

Les décisions prises ne furent guère suivies d'effet, et une nouvelle commission, la Commission LISSAJOUS, Centre National des Arts et Métiers (CNAM) fixa le diapason à 435 Hz, norme destinée à endiguer les plaintes des musiciens concernant la « constante montée » du diapason.

Cette commission avait au préalable fait une enquête en Europe, et demandé aux principales capitales d'envoyer un diapason à fourche correspondant aux habitudes du lieu. Ces diapasons sont conservés au Musée Instrumental du Conservatoire National de Musique de Paris et nous avons mesuré leurs fréquences respectives. Nous reviendrons sur ce diagramme tout à l'heure (figure 3), mais il faut d'ores et déjà préciser que le diapason moyen européen était manifestement voisin de 445 Hz avec une large dispersion : 435 à 455 Hz (20 savarts, soit près d'un demi-ton...). Imposer dans ces conditions une norme de 435 Hz revenait à baisser le diapason moyen de presque un quart de ton. Comme la norme était fixée par décret, donc officielle, son application supposait le remplacement de tous les instruments de musique à trous latéraux (clarinette, hautbois, basson, etc...). Beaucoup de musiciens, pour des raisons pécuniaires ou sentimentales, refusèrent de rejeter leurs instruments.

Le décret de 1859 fixant le diapason un quart de ton plus bas que la valeur statistique moyenne eut des conséquences néfastes qui se prolongent jusqu'à nos jours. En effet, certains fabricants, pour se plier à la norme, allongèrent les instruments à trous latéraux afin de les amener autour de 435 Hz. Dès lors les deux diapasons coexistèrent en fait, compliquant inutilement toutes les exécutions musicales et agrissant les discussions et les accusations réciproques entre musiciens relativement à la « hausse du diapason ».

Les congrès internationaux ultérieurs, à Londres (ISO) en 1939, puis en 1953 n'apportèrent aucune réponse satisfaisante. Les recherches statistiques montrèrent tout simplement que la norme de 435 Hz n'était respectée nulle part, comme ne le sera pas celle de 440 Hz décidée à l'époque.

En 1964, nous eûmes au laboratoire la visite de M. DUCLOS, Chef des Chœurs de l'OPERA. Il se fit l'écho de plaintes de ses chanteurs quant au diapason anormalement élevé. Ce fut l'occasion pour nous de faire des mesures sur le piano de la Salle des Chœurs, qui était effectivement trop haut à la suite de réaccordements successifs non contrôlés. Tout fut remis en ordre, mais l'idée était lancée de chercher à savoir où en était exactement le « diapason » à l'OPERA. Le décès imprévu de M. DUCLOS retarda de quelques mois le démarrage des travaux ; puis M. AGOSTINI reprit le problème en mains et nous demanda de faire des recherches systématiques à l'OPERA et à l'OPERA-COMIQUE, avec l'accord du Directeur et des musiciens. Ce fut l'occasion pour nous d'utiliser la méthode que nous avons mise au point entre temps et qui permettait d'obtenir des renseignements objectifs, à l'aide de relevés systématiques au magnétophone de haute précision et d'appareils de mesure adéquats dont nous disposons. Un point important de cette méthode consiste à ne relever que les fréquences des **toniques et des dominantes**, pour éviter les anomalies provenant de l'attraction des notes sensibles. De même, les températures sont soigneusement relevées dans la salle, dans la fosse d'orchestre et dans les coulisses. Toutes précautions prises, les diagrammes du diapason en cours de l'exécution de diverses œuvres à diverses époques montrèrent que le diapason moyen était voisin de 445 Hz, avec des fluctuations de  $\pm 5$  Hz. Ces flottements

du diapason à l'intérieur d'une marge de 10 Hz (soit près d'un quart de ton), il était absolument exclu de l'attribuer à un manque d'habileté des musiciens. L'expérience nous avait en effet montré que la plupart d'entre eux, et en particulier le hautbois sola (M. DEBRAY) avaient une mémoire des hauteurs extrêmement précise. Il était donc indispensable de rechercher les causes de ces fluctuations, dont, a priori il faut bien tenir compte si l'on se propose de « normaliser » quelque chose en ce domaine.

### 3. — CAUSES DES FLUCTUATIONS DU DIAPASON

En face des problèmes que nous étudions au laboratoire, notre position reste toujours fondamentalement pragmatique. Nous estimons qu'en toutes choses, ce que font les praticiens peut seul fournir des bases de discussion réalistes. Le dépouillement des enregistrements que nous avons faits nous a montré effectivement que les fluctuations du diapason n'étaient rien moins que gratuites. Les raisons en sont nombreuses et compliquées, car les variables sont difficiles à isoler, donc à étudier, du fait de leurs interactions réciproques.

#### 1°) Variables psycho-physiologiques.

Le diapason pose un problème de hauteur. Or dès le début, on bute à de sérieux obstacles, car les problèmes de perception de la hauteur sont fort mal connus. Les manuels de physique nous disent bien que la hauteur est fonction de la fréquence du fondamental des sons. Mais les psycho-physiologistes ont montré que les choses n'étaient pas si simples. La sensation de hauteur, pour une même note dépend de l'intensité du son, de sa richesse en « harmoniques » ; elle dépend de l'intensité relative de ses partiels quand il s'agit de sons aperiodiques comme ceux d'une cloche. De même, la sensation de hauteur est fortement influencée par le voisinage de la note considérée : le demi-ton entre sensible de tonique et tonique se réduit couramment, nous l'avons vérifié, à moins d'un quart de ton, voire 5 ou 6 savarts (un comma de Holder). D'autre part une note musicale n'est jamais fixe en hauteur. Quelle est alors la hauteur d'une note en vibrato par exemple, puisque celui-ci « balaye » couramment un demi-ton et plus ?

Dans ces conditions, que peuvent signifier des mesures de fréquence faites avec des appareils électroniques ? Il est évidemment nécessaire de les interpréter en connaissance de cause ! Et pour cela il faut être musicien soi-même. La nécessité absolue de ne mesurer que des toniques

et des dominantes dans l'œuvre s'impose alors rapidement. Quant aux notes « vibrées », nous avons des moyens faciles pour prendre la « moyenne » qui, dans notre vibrato occidental régulier, détermine la sensation de hauteur.

Malgré toutes ces précautions, des difficultés surgissent encore, venant de « l'oreille » individuelle de chaque auditeur, très largement variable de l'un à l'autre. Musicalement le mot « oreille » implique l'organe de l'ouïe, mais aussi le cerveau qui traite l'information acoustique reçue, ce qui met en cause la perception de la durée, problème compliqué et mal résolu !

Le temps physique est facile à mesurer, ainsi que le nombre de vibrations (fréquence) par unité de temps. Nos mesures nous fournissent donc des données objectives en grandeurs physiques bien définies. Mais que pense l'oreille humaine de ces nombres ? La réponse est difficile, car la sensation de temps varie avec l'état psychique de l'individu à un moment donné. L'expérience banale montre que, selon les cas, le temps « passe vite » ou « s'étire ». Cependant, le nombre de vibrations par seconde physique reste bien fixe. Prenons par exemple un son de 440 Hz, c'est-à-dire de 440 vibrations par seconde physique. Si le temps « passe vite » pour tel auditeur, il est évident que sa « seconde psychologique » sera plus courte que la seconde physique et dans ces conditions, il percevra moins de 440 Hz : le son lui semblera trop bas. S'il est instrumentiste, il jouera alors plus vite et montera intuitivement le diapason dans la mesure où son instrument le lui permet. Nous avons vérifié ce phénomène dans tous les passages de l'œuvre où une tension psychologique est en cause. Dans ces conditions, les déviations de diapason physique sont tout à fait justifiées. Mais ceci nous oblige à faire un relevé statistique moyen du diapason au cours de l'œuvre complète, comportant de très nombreuses mesures. Le problème du diapason revêt donc un aspect statistique : deux ou trois mesures isolées ne peuvent avoir aucune signification. C'est pourquoi nous avons toujours fait au moins 100 mesures dans une œuvre, et donné la moyenne et les pointes maximum et minimum.

La perception de la hauteur en fonction de la mémoire individuelle pose un autre problème difficile. La majorité des musiciens professionnels ont une mémoire extraordinaire des hauteurs, celle-ci étant profondément imprimée lors de l'apprentissage du solfège, en particulier lorsque le piano sert d'instrument usuel. En fait la plupart d'entre eux possèdent « l'oreille absolue », le musicien conservant

dans sa mémoire une « référence » probablement stockée sous forme très matérielle dans les centres supérieurs. Malheureusement, en vieillissant, notre anatomie et notre physiologie se modifient. Le vieillissement, du point de vue auditif se traduit d'abord on le sait, par une perte graduelle de sensibilité dans l'aigu et, malheureusement la sensation de hauteur en est altérée. L'expérience montre en effet qu'en filtrant un son riche en harmoniques de ses composantes aiguës, il semble sonner plus bas, problème posé par ailleurs lorsque les musiciens jouent dans les coulisses, ces dernières filtrant également l'aigu. Revenons au problème de la mémoire. Si nous avons une bonne mémoire des hauteurs, le filtrage par vieillissement devrait donc nous faire « entendre plus bas ». Or de nombreuses observations du plus haut intérêt montrent au contraire que beaucoup de musiciens professionnels entendent plus haut en vieillissant : dans de nombreux cas, un morceau joué effectivement en « si » est perçu par eux comme étant en « ut ». La différence de perception atteindrait donc un demi-ton et plus avec l'âge. M. MAILLARD pense que ce phénomène provient de la « baisse de tension » de la membrane basilaire considérée comme un « résonateur » complexe selon HELMHOLTZ. Mais une membrane excitée par un son de fréquence donnée vibre en oscillations forcées, c'est-à-dire à la même fréquence que l'excitateur... Si la membrane basilaire se détend avec l'âge on ne perçoit pas de modifications de hauteur, mais des changements de timbre.

La très intéressante observation de M. MAILLARD a, selon nous, une explication plus plausible et qui se base sur des remarques que chacun est amené à faire au fur et à mesure qu'il avance en âge.

On sait que le fonctionnement du cerveau relève de phénomènes impulsionnels électriques, liés aux échanges chimiques qui se produisent à tous les niveaux du corps humain. Ces échanges se ralentissent statistiquement avec l'âge, fait d'observation courante. Corrélativement, la sensation de durée se modifie : notre « horloge » intérieure ralentit insensiblement et dans ces conditions, l'unité perceptive de temps la « seconde psychologique » s'allonge. Mais le nombre de vibrations d'un diapason par « seconde physique » par exemple 440 Hz ne change pas. Pendant une seconde psychologique nous entendons donc plus de 440 vibrations : nous entendrons plus haut. Dès que l'écart atteint 1/4 de ton, le musicien qui a une bonne mémoire « sautera » à la tonalité diésée... Les plaintes relatives à la montée du diapason doivent être reconsidérées à la lumière

de ces faits. Elles ne peuvent nécessairement venir que de personnes d'un certain âge. Comme la modification de la sensation de durée se fait très insensiblement et à l'insu du sujet, la « constante montée » du diapason s'explique... Nous avons personnellement cette impression de montée, mais elle recommencera avec nos successeurs. D'où les plaintes qui durent depuis plus d'un siècle alors qu'objectivement, nous le verrons tout à l'heure, il n'y a aucune montée si on en croit les mesures des diapasons de LISSAJOUS par exemple. En effet, celui-ci donne 447 Hz comme valeur du diapason à PARIS à l'OPERA, en 1859; or nous avons trouvé  $445 \pm 5$  Hz dans nos mesures à l'OPERA en hiver et 448,7 Hz en été, par très forte chaleur (ce qui fait en moyenne, exactement 447 Hz en 1966 !!). La « cause » de la montée « constante » du diapason est donc absolument insoutenable; mais, par contre, les mesures que nous avons faites mettent en lumière un paramètre d'importance déterminante, celui des fluctuations liées aux effets de la température, variable objective, au sujet de laquelle il faut rappeler quelques points importants.

## 2°) La température, variable objective du diapason.

Beaucoup d'instruments sont adaptables à volonté à des diapasons variés (violons, trompettes, etc...): le problème de la température ne se pose pas pour eux, mais pour ceux qui ont un accord fixe (piano, harpe, etc.) et pour les « vents » à trous latéraux. Pour les instruments à sons fixes, on les accorde une fois pour toutes avant l'exécution; les autres instruments qui jouent simultanément règlent au mieux leur justesse grâce à leur champ de liberté. Mais pour les instruments à perce latérale le problème est difficile.

En effet, la célérité du son varie avec la température et le son monte dans un tuyau donné selon une loi bien connue que résume le diagramme suivant (fig. 1). Comme toute précision est illusoire dans le cas de la musique, puisque la plupart des musiciens de l'orchestre modulent continuellement la hauteur de leurs notes pour des raisons esthétiques, on retiendra la règle approximative suivante :

au voisinage de la fréquence du  $la_2$  (440 Hz), une montée de température de  $1^\circ\text{C}$  détermine approximativement une montée de 1 Hz, celle-ci correspondant à son tour à une augmentation de hauteur de 1 savart (rappel : un demi-ton = 12,5 savarts).

On peut toujours accorder le « la » d'une flûte en tirant sur le bouchon, mais comme tous les instruments à trous latéraux, elle se fausse. Tous

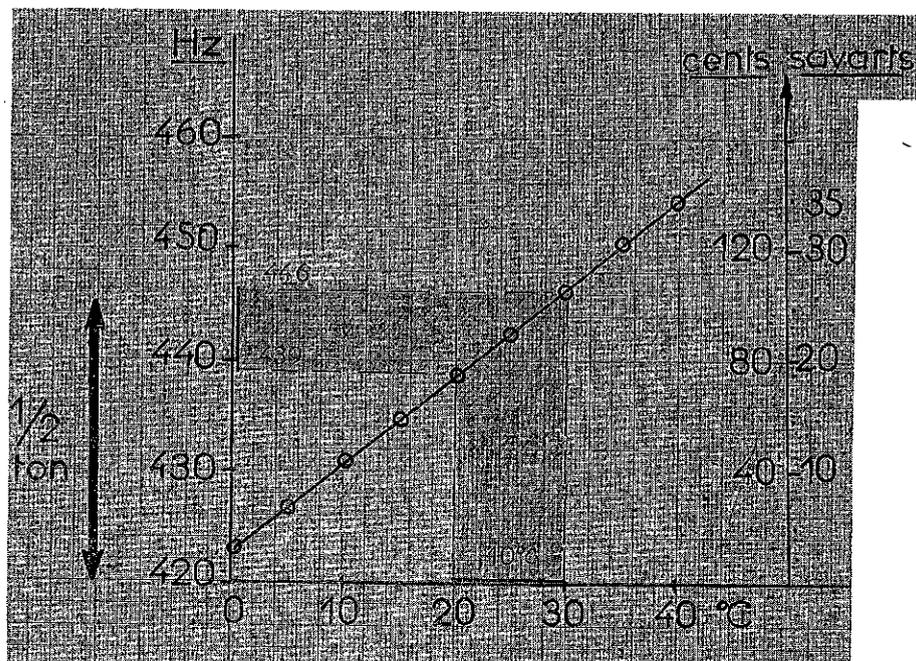


FIG. 1. — HAUSSE THEORIQUE DU DIAPASON AVEC LA TEMPERATURE. Entre 10 et 30°C la montée est voisine du quart de ton... Entre 20 et 30°C le diapason passe de 439 à 446 Hz... Règle pratique : autour de 440 Hz une montée de  $1^\circ\text{C}$  correspond à peu près à une montée de 1 Hz du diapason !

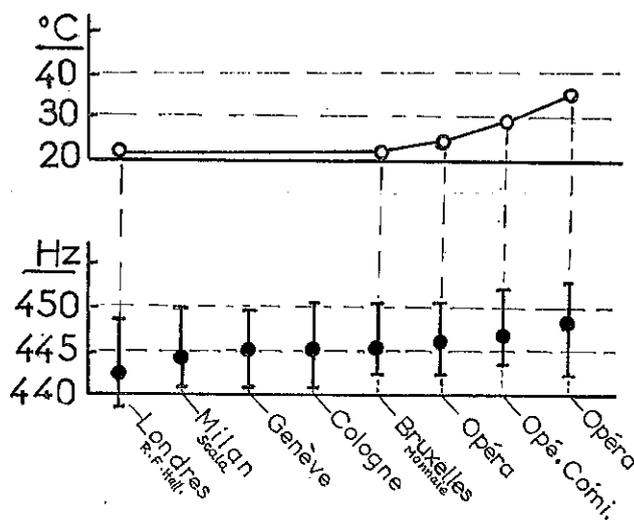


FIG. 2. — MESURES SUR LE DIAPASON FAITES EN 1966 par le Laboratoire d'Acoustique de la Faculté des Sciences de Paris. Si on ramène toutes les mesures à la température de  $20^\circ\text{C}$ , on vérifie que le diapason est sensiblement le même partout et correspond à quelque 444 Hz à  $20^\circ\text{C}$ .

ces instruments ne peuvent donc jouer juste que si l'on adopte un diapason variable avec la température. Bref, si on veut que les musiciens réalisent une interprétation de qualité, il faut absolument qu'ils soient à l'aise pour jouer, qu'ils n'aient pas besoin de « forcer » pour corriger leurs notes et dans la mesure où on ne peut pas leur demander d'utiliser deux ou trois instruments de « diapasons » différents, il est indispensable de leur fournir une référence d'accord varia-

ble, par exemple 440 à  $18^\circ\text{C}$ , de 445 à  $25^\circ\text{C}$ , de 450 à  $34^\circ\text{C}$ , etc... On vérifie que c'est ce qu'ils font empiriquement et ils ont raison, car on ne peut rien contre la loi de la température. La figure 2 montre le résultat d'un grand nombre de mesures que nous avons faites sur le diapason en divers pays européens en corrélation avec la température. On voit en haut de la courbe des températures aux lieux considérés, en bas, le diapason moyen avec les marges de dispersion

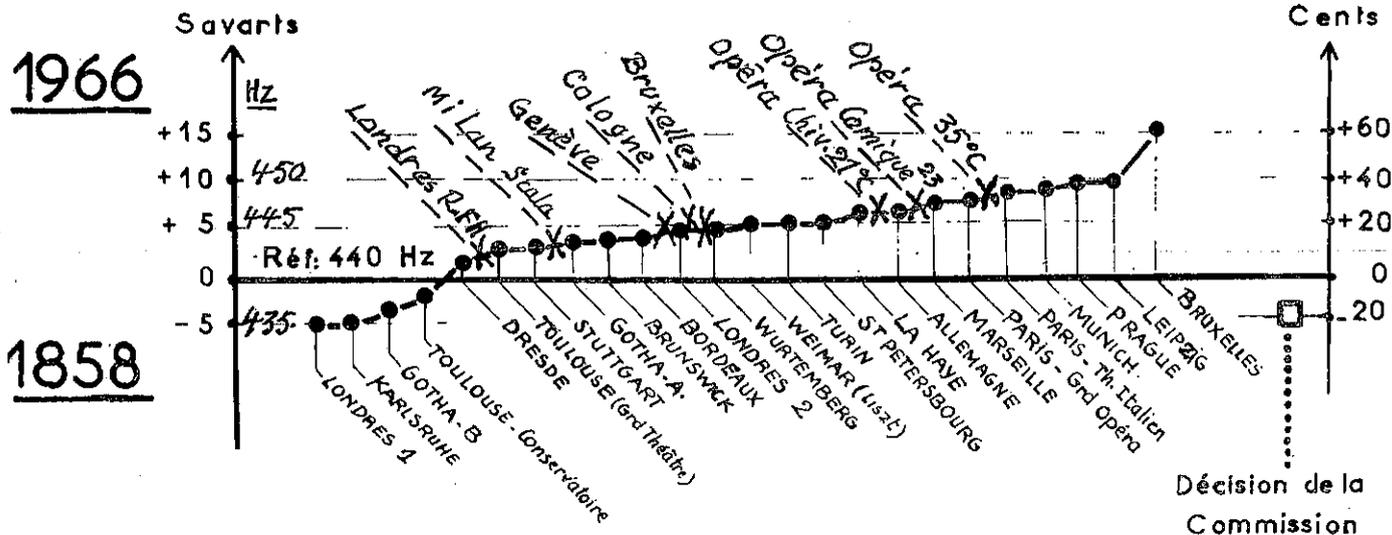


FIG. 3. — Les mesures faites en 1858 par la commission LISSAJOUS (noms de villes sous la ligne des abscisses) et celles de notre laboratoire, en 1966 (noms au-dessus de la ligne des abscisses) se recouvrent strictement. Le diapason moyen n'a donc pratiquement jamais varié, sinon momentanément, au début du 20<sup>e</sup> siècle, à la suite du décret LISSAJOUS, dont la norme n'était manifestement pas très réaliste.

dans chaque cas. La relation est évidente: si on ramène tous ces résultats à la température de 20°C, le diapason sera, pour tous, très voisin statistiquement de 445 Hz. Si l'OPERA, sur le diagramme est plus haut que le ROYAL FESTIVAL, cela ne veut pas dire que le diapason à PARIS soit plus haut que celui de LONDRES. Cela veut dire qu'à PARIS il faisait plus chaud qu'à LONDRES lors des mesures. Mais le diapason à 20°C est partout le même à peu de chose près. Les musiciens qui voyagent beaucoup nous ont confirmé qu'ils n'avaient pas de problèmes de diapason. Ils ne s'en soucient pas et jouent entre 440 et 450 Hz selon la température. Ce serait une grosse erreur que de vouloir leur imposer une fréquence fixe à toutes températures, car par la force des choses ils ne respectent pas la norme, sauf si la température des lieux est normalisée à 20°C environ.

Tout cela nous permet de tirer diverses conclusions :

— Il n'y a aucune « constante montée » du diapason ; la confrontation du diagramme des diapasons à fourche de LISSAJOUS et de nos résultats est tout à fait instructive de ce point de vue (fig. 3) et il n'est pas opportun de renouveler l'erreur commise en 1859 en baissant inconsidérément la norme par rapport avec la réalité existante dont il faut nécessairement tenir compte dès le départ.

— Il est impossible de fixer le diapason à une valeur rigide sans donner les marges de dispersion, imposées si la température n'est pas normalisée.

— La température joue un rôle déterminant dans le problème du diapason ; les variations qu'elle détermine sont importantes, voisines du quart de ton entre 20 et 35°C [qui représentent les conditions de températures

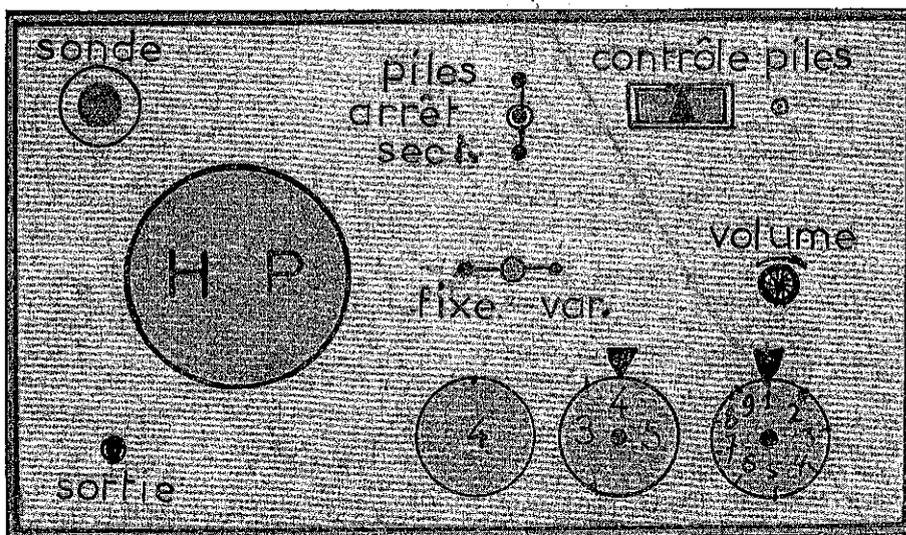


FIG. 4. — L'appareil fonctionne sur secteur ou sur pile rechargeable ; on peut donc l'utiliser en toutes circonstances et en tous lieux. Le haut-parleur délivre un signal carré-harmoniques impairs, dont le timbre rappelle la clarinette ; le volume est réglable à volonté et une sortie « son » permet d'envoyer le signal sur une ligne quelconque vers d'autres haut-parleurs. On a deux possibilités différentes : — Pousser le bouton de commutation sur la position « fixe » et afficher sur les cadrans la fréquence fixe désirée (actuellement l'appareil est réglé sur 440 Hz). On entend alors la fréquence affichée. — Commuter sur « variable » et tirer la sonde. Celle-ci relève la température ambiante et corrige automatiquement la fréquence affichée en fonction de la température. Au lieu de 440 Hz affichés on entend par exemple 450 Hz s'il fait 35°C. Il s'agit ici d'un prototype en cours de perfectionnement. Ainsi, on a prévu la possibilité d'obtenir d'autres notes que le « la » ; par exemple ut et ré. Ceci facilite l'accord de certains instruments. Tel qu'il est, l'appareil tranche le problème objectif du diapason : celui de sa fluctuation avec la température ambiante.

normales en cours d'exécution). Elles sont même susceptibles dans les cas extrêmes de faire « basculer » auditivement la tonalité un demi-ton plus haut ou plus bas selon le cas. Il faut insister sur le fait que toutes les mesures faites sur le diapason, où l'on ne précise pas la température, sont dénuées d'intérêt. Les chercheurs qui indiquent la température ont trouvé

des résultats identiques aux nôtres (CONDAMINES, LARACINE à l'ORTF : 446 Hz à 23°C en moyenne). Par contre le tableau des moyennes données dans le rapport de SALZBOURG ne peut que fausser les idées, car il donnerait à penser que le diapason est plus bas à BRUXELLES qu'à PARIS, alors que la température des relevés n'est pas précisée.

— Pour éviter toutes discussions et toutes accusations réciproques entre musiciens de bonne foi, un seul remède est possible : construire un « diapason » variable avec la température. C'est ce que nous avons projeté avec M. AGOSTINI, puis réalisé pour l'OPERA, et en voici une description.

#### 4. — LE DIAVAR, DIAPASON VARIABLE AVEC LA TEMPERATURE

L'électronique est actuellement capable de nous fournir des composantes et des appareils d'une précision, d'une stabilité et d'une fiabilité plus que suffisante pour ce qui nous concerne ici.

L'appareil dont il s'agit ici (fig. 4) est un générateur de signaux acoustiques carrés (à harmoniques de rang Impair) qui « sonne » quelque peu la clarinette. Entièrement transistorisé, il est utilisable soit sur secteur, soit sur accumulateur incorporé rechargeable.

Il est susceptible de donner une **fréquence fixe**, indépendante de la température ambiante, mais que l'on peut régler à volonté entre 431 et 459 Hz. On peut donc écouter directement cette hauteur, la comparer à l'oreille avec un son instrumental, dire que celui-ci est trop haut ou trop bas, en préciser au besoin la hauteur exacte en « accordant » le Diavar sur le son entendu.

D'autre part, l'appareil possède une sonde télescopique qui comporte un

thermocouple, c'est-à-dire une cellule sensible à la température, qui règle automatiquement la fréquence du générateur selon la loi précisée plus haut. L'appareil commuté sur « variable », affiche 440 Hz par exemple, mais on entend 450 Hz lorsque la température est de 38°C par exemple. Le problème de l'adaptation du diapason à la température est donc résolu.

Il va sans dire que le DIAVAR ne résoudra pas les difficultés du métier de musicien et de chanteur qui restent **énormes**. En particulier, lorsqu'il s'agira d'interpréter des œuvres anciennes, écrites pour un diapason beaucoup plus bas, il faudra toujours des chanteurs exceptionnels, capables de monter beaucoup plus haut que la moyenne de leurs collègues ; la Reine de la Nuit n'est de toutes façons pas à la portée de tout le monde ! Le problème de l'entrée d'instruments à sons fixes (piano, harpe) etc... restera toujours délicat à affronter comme ceux qui relèvent de la psychophysologie de la perception des hauteurs évoqués plus haut. Il est certain que le hautboïste, en donnant le « la » avec le DIAVAR, ne fera pas mieux qu'en utilisant son instrument, mais il disposera d'une référence objective, sûre, qui mettra enfin un terme à toutes les discussions passées.

#### 5. — CONCLUSIONS

Le DIAVAR, diapason asservi à la température est l'aboutissement nor-

mal de nos recherches sur ce problème entreprises il y a cinq ans maintenant. Basé sur la pratique européenne des musiciens et une interprétation pragmatique de la réalité à la lumière de ce que nous savons de la psycho-physiologie perceptive de la musique, il devrait apaiser les nombreux musiciens professionnels que l'on a inconsidérément sensibilisés sans leur apporter ni preuves ni moyen de vérification. Fiable, léger et autonome, on peut facilement le placer partout où il peut être utile. Dans les coulisses par exemple, accordé systématiquement plus haut, il permettra de compenser les effets du filtrage des décors responsables de la sensation de baisse observée lorsque les fanfares sont placées en cet endroit. De même l'appareil permettra de faire périodiquement des sondages dans le cas où des différents se feraient jour pour une raison ou pour une autre.

Le modèle du DIAVAR que nous avons présenté n'est qu'un prototype. Sur la suggestion de M. THEVET, cor solo, nous pensons par exemple nécessaire de rajouter d'autres notes que le « la », certains instruments ne pouvant pas aisément s'accorder sur cette note. Mais tel qu'il est, le DIAVAR est susceptible de rendre déjà service aux musiciens en éliminant l'un des innombrables problèmes qu'ils doivent trancher dans l'exercice de leur art.