



## Symphonie pour orgue en deux temps et trois mouvements

*Jean-Claude Leroulley, organiste  
et  
Antoine Pascal, facteur d'orgue*

I - Rappels d'acoustique musicale	2
II - L'orgue : la manip qui chante	19
Présentation de la manip	22
Les plans sonores	27
Le « sommier »	32
Acoustique des tuyaux sonores	53
L'orgue virtuel	64
III - Concert d'orgue	75



**Recherchons collaborateurs bénévoles....**

**Les deux manips interactives insérées en pages 7 et 65, ne sont pas fonctionnelles. Nous recherchons un bénévole pour développer l'interactivité des 2 manips. Les collègues intéressées peuvent prendre contact dès maintenant avec :**

**Jean-Claude LeRoulley**

**téléphone : 01 69 82 43 44**

**courriel : [jclr@lsce.cnrs-gif.fr](mailto:jclr@lsce.cnrs-gif.fr)**

**...par avance, un grand merci.**

## Mouvement I - RAPPELS D'ACOUSTIQUE MUSICALE

« do ré mi fa sol la si do », c'est quoi ?

### Au fond du lagon,...

Venise, sous le ciel gris d'une fin d'hiver. Dans leur costume aux couleurs bigarrées des musiciens masqués emplissent les ruelles saturant l'air tiède et humide des musiques de Vivaldi, de Corelli ou de Spaggiari. C'est Carnaval ! Emportés par le courant d'une brise légère, des flots de notes sont canalisés par les façades écaillées des Palais jusque sur les places où ils virevoltent et s'entrechoquent avec les rires sonores d'une insouciant jeunesse pour le plaisir de nos oreilles et la joie de notre coeur. Entrons dans le flot, et tant pis si notre raison se laisse un moment griser par la magie de la fête.

Bientôt, notre besoin de comprendre reprend le dessus ; la curiosité nous incite à soulever quelques masques. Nous sommes surpris de découvrir que, sous leur déguisement de **note**, se cachent des personnages que nous, physiciens, avons maintes fois rencontrés. Dans nos laboratoires, ils s'appellent tout simplement des **sons** caractérisés par une variation sinusoïdale de la pression de l'air d'**amplitude a** et de **fréquence f**, tel que :

$$a = a_0 \sin(2\pi n f t) \quad (I)$$

Pauvres sinusoïdes qu'un physicien, maître du temps, peut faire vivre ou mourir d'un simple basculement ON/OFF d'interrupteur sur la face avant d'un générateur de Basses Fréquences: « slavii ex machina ». Si vous voulez savoir à quoi elles ressemblent, décrochez votre téléphone : un LA3 vous répondra : « laaaaaaaaaaaaaa ». Certes, on a rien à lui reprocher sur le plan professionnel mais reconnaissons qu'il n'est pas bien beau. Pas la vibration d'humanité!

En tête du cortège, dissimulés sous leur faux air de notes de musique, il n'y a que des sinusoïdes comme le LA3 ; comme si toutes avaient réussi à s'extraire du générateur. Seule la hauteur de leur son monocorde les distingue. On comprend bien volontiers leur désir de se déguiser pour échapper à une aussi morne existence. « **Comment d'aussi pâles figures peuvent-elles produire une belle musique?** ». A peine le temps de se poser la question que déjà apparaissent, dans un silence menaçant, des déguisements vraiment timbrés. Pas un bruit ne s'échappe de ce défilé d'objets apparemment hétéroclites. Outre la grande variété des

instruments de musique figurant en bonne place, on voit de minuscules anches en bois ou en métal, des phonolithes, des cordes vocales au fond de bouches, de gueules ou de becs grand ouverts et muets, un fouet, une porte qui claque. Emergeant de la horde compacte, des arbres élèvent leur canopée couverte de myriades de feuilles, toute scintillantes d'éclats de lumière comme un banc de sardines...et, aussi silencieuses. Dans le ciel, un énorme cumulo-nimbus crache des éclairs éblouissants dans le même silence. Au milieu de ce chaos, la Castafiore, privée de sa voix, terreur des miroirs, se fraie un chemin dans une vibration de chair fondante. Un silence angoissant enveloppe cette aphonie généralisée. Seule la brusquerie des gestes manifeste le ressentiment et la colère. En dépit de leur glorieuse image, ces objets sans voix jalourent les tristes sinusoïdes au chant monocorde. L'affrontement semble inévitable.

Entre les deux groupes le ton monte (c'est le cas de le dire!) et bientôt s'engage une belle bagarre! Et vlan, un bon coup de trompette sur la tête de la sinusoïde « 440 Hz » qui, toute vacillante, chante tant bien que mal son 440 Hertz en s'agrippant à ses voisines ; déstabilisées, elle-mêmes résonnent à leur tour. Et vlan encore un autre coup! Une pluie de coups de violon, de clairon, de miroir et autres instruments tombent sur les malheureuses sinusoïdes. Pour chaque coup donné sur la tête d'une seule sinusoïde, c'est toute une série d'autres sinusoïdes qui résonne en même temps. La violence de la scène n'est pas belle à voir mais quelle belle musique à entendre! Et puis, tous les coups ne sont pas aussi violents que ceux du rugissement des ouragans ou des éclats du tonnerre : la douce flûte, par exemple, n'en fait tituber que 2 ou 3 ; une brise légère dans les feuilles d'arbres effleurent délicatement les plus petites des sinusoïdes provoquant un léger bruissement confus tandis qu'un ruisseau les chatouille jusqu'à ce qu'on perçoive des gargouillis cristallins joyeusement sauter ça et là comme des feux follets par une chaude nuit d'été.

Voilà tout le secret de la résonance naturelle en général, et des notes de musique en particulier. Qui n'a pas fait « toc, toc » sur un objet pour tenter d'en deviner ses propriétés? Les amplitudes des différentes harmoniques déterminent le **timbre** d'un son : sa signature sonore en quelque sorte. Les timbres sont la couleur des notes, leur poésie : timbres tantôt riches en harmoniques comme ceux des violons ; tantôt pauvres comme ceux des gros tuyaux en bois de l'orgue!

Les sons portant très loin sur l'eau, notre badinage allégorique, contraire à la rigueur scientifique, irrite Monsieur Joseph qui manipule sur ses chères ondes au milieu de la lagune. Accostant assez durement sa gondole, agacé, le savant vient nous rappeler vertement qu'un physicien n'a nullement besoin de vagues digressions poétiques pour décrire ce phénomène : « J'ai énoncé dans un fameux théorème que tout mouvement périodique de fréquence  $f$  (dont bien sûr, la résonance naturelle fait partie) peut être décomposé en une somme de sinusoïdes de fréquences  $f, 2f,$

$3f$  ,  $4f$  ,  $5f$  , etc, appelées **harmoniques**. » :

$$F(t) = a \sin ft + a_2 \sin 2ft + a_3 \sin 3ft + a_4 \sin 4ft + a_5 \sin 5ft + \dots \quad (\text{II})$$

Certes le théorème est très « beau » au sens scientifique du terme et la fierté de son géniteur est tout à fait légitime mais la route que nous nous sommes fixée n'est pas orientée vers la recherche en acoustique ; elle doit nous amener à découvrir le pays dans lequel poussent les fleurs de sons avec lesquelles sont composées presque toutes les musiques.

Le « prince des ondes » s'en étant retourné « gondoler » sur les ondes, engageons-nous sur la bonne route en nous demandant ce qui peut nous intéresser du point de vue musical dans cette série : les variables sont l'amplitude et la fréquence. On connaît le rôle de l'amplitude : on sait faire la différence entre une trompette et les murmures d'un ruisseau quelque soit le niveau sonore! Ce n'est pas de ce côté là que devraient venir les ennuis. Et si, par moments, le conférencier vous « casse les oreilles », demandez lui de diminuer l'amplitude ; le contenu de ses conclusions n'en sera pas altéré.

Par contre, le rôle de la fréquence dans notre expérience du monde sonore est moins évident. Mais avant un nouvel effort, accordons-nous un peu de repos et jouissons de toutes ces airs de carnaval qui enchantent nos oreilles.

Malheureuses paroles qui interrompent le plaisir à peine entamé! Un scientifique ne peut s'empêcher de se demander : « Comment faisons-nous pour distinguer sans efforts conscients la trompette, la flûte ou les vocalises de la Castafiore au milieu de ce joyeux tintamare ? Par quel processus notre cerveau est-il capable de reconnaître les ondes de la trompette, de la flute ou des vocalises de la Castafiore sans que nos neurones surchauffent dans d'interminables calculs de série de Fourier?

On ne peut laisser de telles questions sans réponses : la pause est finie ; courage!....

## ... écoutons ...

Lorsque notre oreille perçoit un son, les millions de cils vibratiles de la cochlée se mettent à vibrer en résonance avec les différentes composantes fréquentielles du son. Sans démonter l'oreille du petit frère ou de la petite soeur, vous pouvez reproduire le phénomène avec un piano : appuyez sur la pédale « forte » pour écarter les étouffoirs des cordes, chantez fort une note grave près des cordes. Si les décibels de votre voix ne vous ont pas rendus sourds, vous entendrez alors vibrer les cordes correspondant aux harmoniques de la note chantée. Amusez-vous à mesurer les intervalles entre fondamental et harmoniques. Si la puissance acoustique de votre voix n'est pas suffisante, appuyez sur la pédale « forte », jouez assez énergiquement une note grave puis étouffez le son de la cord frappée d'un revers de main. L'effet sera le même. Les cils de la cochlée et les cordes du piano fonctionnent de la même façon. Le son perçu par l'oreille a été décomposé en une somme d'harmoniques. L'analyseur de Fourier n'est pas dans le cerveau : il est dans l'oreille interne. Le rôle du cerveau est d'enregistrer les vibrations des différents cils et de mémoriser les termes de la série pendant une durée plus ou moins longue en fonction de l'intérêt qu'on y porte.

Lorsque la fréquence d'un son est multipliée par 2, le cerveau reconnaît instantanément la similitude des termes paires de la série : ç'est-à-dire les termes de forme  $a_{2n} \sin 2\pi nft$ ,  $n$  étant un nombre entier. Le lien de parenté est établi et le cerveau instinctivement donne le même nom au deuxième son en précisant que l'un est plus grave que l'autre. Physiologiquement, le monde sonore est découpé en intervalle  $[F, 2F]$  à la manière d'une cage d'escalier découpée en étage identique (au moins dans les immeubles assez démocratiques pour dérouler le tapis jusqu'au dernier étage). Le distrait qui ne regarde pas le numéro du palier, ne sait plus à quel étage il est arrivé<sup>1</sup>! Cet extraordinaire cadeau de la nature va considérablement simplifier notre repérage dans le vaste monde sonore de l'oreille humaine, entre 20 Hz et 20 KHz. En effet, il suffit que les musiciens choisissent le décor de l'escalier d'un étage pour connaître le décor de toute la cage d'escalier. Traduction musicale : l'échelle musicale d'une seule octave permettra à notre oreille de se repérer dans tout le domaine fréquentiel. Le changement d'octave ne perturbe pas la reconnaissance des notes par notre oreille!

Une harmonie juste, nous procure un certain plaisir ; à l'inverse, une harmonie discordante est douloureuse. Ceci est également dû à la physiologie de notre oreille : la consonance entre 2 sons est d'autant plus forte qu'ils partagent les mêmes harmoniques.

---

<sup>1</sup> A moins qu'il ait pris soin de ne pas laisser dans le 4x4 qui le conduit de son domicile dans le 6ème ardt à son bureau dans le 9ème, le Navigateur GPS Altimétrique, la face avant de l'autoradio multimédia et le kit hands-off du véhicule.



MANIP I : D'un clic, chaque personnage chantera une note. Quels sont les personnages dont les notes sont distantes d'une octave?

---

## ... Ces fleurs de sons...

Quelle prétention pousse les musiciens à souhaiter une échelle de fréquence différente de celle des physiciens : le « cycle par seconde, le hertz » ?

Contrairement à ce que sous-entend la question, les musiciens travaillant avec les fichiers MIDI sur ordinateur utilisent le « hertz » et autres unités équivalentes. Et des compositeurs contemporains utilisent ce qu'on appelle des « micro intervalles » dont la notation est très complexe. Mais reconnaissons que le musicien « lambda », serait un peu perdu si la musique utilisait toutes les fréquences contenues dans l'intervalle  $[F, 2F]$  : elles sont en nombre infini ! Lorsque les violonistes tziganes font chavirer les coeurs en faisant glisser un doigt sur une corde ou que les pianistes balaient le clavier d'un revers de main, les notes ne sont pas écrites sur la partition : il est seulement indiqué : **glissando**.

Alors dans quel mystérieux jardin poussent les « fleurs de sons » ?

Le savoir rationnel se construit en ajoutant les nouvelles connaissances aux anciennes en oubliant au fond des tiroirs les cahiers de manips qui racontent l'histoire de leur découverte. Si bien qu'aujourd'hui, un acousticien serait étonné d'apprendre que l'ancien nom de sa profession était « **musicus** » alors que celui qui pratiquait un instrument de musique était un « **cantor** »<sup>2</sup> !

Tablette d'argile mésopotamienne  
représentant un joueur de luth à pointe.  
(env. 2500 av JC)



Dès la Haute Antiquité, environ 2500 ans avant JC, les civilisations développées possédaient déjà un large éventail d'instruments de musique très perfectionnés à vents, à cordes ou à percussion. La fonction de la musique était de charmer les dieux ou les rois avec de belles mélodies qui, lorsqu'elle étaient jouées à plusieurs jouaient, devaient former ensemble une belle harmonie. Ce n'est donc pas tant la valeur numérique d'une fréquence qui compte que l'**intervalle** entre les notes : si l'**intervalle** est harmonieux, il est conservé ; s'il est discordant, il est rejeté. Le besoin de faire toujours plus « joli » est la motivation du musicien (au moins dans l'ancien temps !). Il existait une gamme naturelle qu'on utilisait de façon empirique pour chanter ou pour jouer d'un instrument mais à la manière de monsieur Jourdain

<sup>2</sup> « Entre ordre et désordre : mathématiques et religion dans la musique au Moyen Age » d'E. Roubanovitch (sur ce même site et Actes d'E2PHY 2004)

faisait de la prose, sans le savoir.

Il faut attendre l'an 550 av JC, pour que Pythagore et ses disciples **mathematikoi** se demande pourquoi certains sons s'harmonisent bien entre eux alors que d'autres sont discordants. La grande découverte de Pythagore est d'avoir établi les bases de la théorie des sons musicaux en même temps que les bases de la physique. Les lois qu'il a découvertes, sont toujours enseignées aujourd'hui.

Que devons-nous retenir de cette théorie?

1. Pythagore généralise les résultats de ses expériences avec le monocorde en disant que le phénomène de la corde vibrante fait partie d'un processus plus général appelé « résonance naturelle ».
2. Il démontre physiquement que la vibration d'une corde de longueur  $L$  est la somme des vibrations des longueurs  $L$ ,  $L/2$  et  $2L/3$ .
3. Il fait l'hypothèse qu'il doit en être de même pour chacune des 2 fractions de corde mais il ne peut le vérifier expérimentalement : « si une corde vibre à la fois sur la moitié de sa longueur et sur les  $2/3$  de sa longueur, il doit en être de même pour la longueur  $2/3$  ; et ainsi de suite... ».
4. Grâce à ses connaissances en mathématiques, il développe mathématiquement son hypothèse et calcule la série des fréquences harmoniques.
5. Il démontre que les fréquences qu'il a calculées recoupe l'échelle empirique employée avant lui, et la complète. C'est la gamme pythagoricienne.
6. Allant encore plus loin, il généralise à l'homme et à l'univers entier la théorie de la résonance. Mais laissons Pythagore s'envoler vers l'harmonie des sphères et regardons comment à partir des 2 harmoniques découvertes par Pythagore, il tente de nous convaincre de la pertinence de sa proposition.

### La gamme pythagoricienne.

L'intervalle en musique est défini par les rapports des fréquences qui le bornent.

La démarche de Pythagore est synthétisée dans la tableau I :

- Les colonnes B et C sont l'application numérique de l'hypothèse de Pythagore (point 3 ci-dessus)
- colonne D et E : changement d'octave en accord avec la physiologie de notre oreille (cf. la conclusion du paragraphe « **écoutons** »).
- dans la colonne F, les valeurs de la colonne E sont classées par ordre croissant entre  $[f, 2f]$ .

- Application numérique de la colonne F avec  $f = 264$  Hz.

TABLEAU I : La résonance d'une corde vibrante d'après Pythagore.

A	B	C	D	E
Nb de pas de calcul	Fraction de L	Fréquence (f)	Nombre de divisions par 2	Fréquence dans $[f, 2f]$ .
0	1	1	-	1
1	$3/2$	1,500	-	1,500
2	$(3/2)^2$	2,250	1	1,125
3	$(3/2)^3$	3,375	1	1,687
4	$(3/2)^4$	5,062	2	1,265
5	$(3/2)^5$	7,593	2	1,898
6	$(3/2)^6$	11,390	3	1,424
7	$(3/2)^7$	17,086	4	1,068
8	$(3/2)^8$	25,629	4	1,602
9	$(3/2)^9$	38,443	5	1,200
10	$(3/2)^{10}$	57,665	5	1,802
11	$(3/2)^{11}$	86,497	5	1,351
12	$(3/2)^{12}$	129,746	6	2,027

	F	G
Note dans $[f, 2f]$	Fréquence (Hz) dans $[f, 2f]$ .	Fréquence (en Hz) dans $[f, 2f]$ avec $f = 264$ Hz
1 (fondamental)	1,000	264,00
2	1,068	281,92
3	1,125	297,00
4	1,200	312,89
5	1,265	334,13
6	1,351	352,00
7	1,424	375,89
8	1,500	396,00
9	1,602	422,88
10	1,687	445,50
11	1,802	469,33

	F	G
12	1,898	501,19
13 (octave $\cong 2f$ )	2,027	535,13

Au bout de 12 divisions par  $2/3$ , on obtient la fréquence = 129,746 f qui, après 6 transpositions vers les octaves graves, devient 2,027 F. Nous avons dépassé de 27 millièmes, l'octave 2f. L'idéal aurait été de trouver 128,000 f qui est la valeur exacte de la fréquence du 7ème octave de f : en effet,  $(2)^7 = 128$ . Autrement dit, un intervalle de douze quintes est très voisin d'un intervalle de sept octaves avec une erreur de  $129,746 f / 128 f = 1,013$  ; soit 1,3 %. Cette valeur est appelée **coma pythagoricien**.

Très fier, Pythagore classe par ordre croissant les fréquences de la colonne E ; il obtient la colonne F et déclare : « musiciens, voici votre échelle! ». La **gamme de Pythagore** divise l'octave en 12 degrés séparés par un intervalle d'un **demi-ton**.

### La proposition d'Aristoxène<sup>3</sup>

Nul mieux que Jean-Jacques ROUSSEAU n'a su mieux présenter la seconde proposition de gamme. Il écrit <sup>4</sup> : « Aristoxène, disciple d'Aristote, voyant combien l'exactitude des calculs de Pythagore était nuisible au progrès de la Musique, & à la facilité de l'exécution, prit l'autre extrémité. Abandonnant presque entièrement ces calculs, il s'en rapporta uniquement au jugement de l'oreille, & rejetta comme inutile tout ce que Pythagore avoit établi. »

Aristoxène n'est pas **musicus** (i.e. mathématicien théoricien) ; il est **cantor**, donc, instrumentiste! Cette ambiguïté sémantique est d'autant plus savoureuse qu'Aristoxène, en choisissant un critère musical va faire une splendide manip de physique. En effet, il classe les intervalles en fonction du plaisir musical ressenti. Or, depuis le paragraphe « écoutons », nous savons que le plaisir à l'écoute d'une belle consonance s'explique par la physiologie de l'oreille. Le classement d'Aristoxène, complété par de nombreuses contributions ultérieures (en particulier, celle de Zarlino - Venise, XVI ème siècle), est donné sur le tableau II . Comme Pythagore, Aristoxène mesure la fraction de la corde vibrante qui produit l'intervalle étudié ; ce qui permet d'en déduire la fréquence correspondante.

### TABLEAU II - Les intervalles d'Aristoxène

<sup>3</sup>Disciple sicilien d'Aristote Aristoxène de Tarente (IV<sup>e</sup> siècle) , auteur d'une théorie proprement *musicienne de la musique* (et non plus mathématique, physique ou philosophique comme celle de Pythagore).

<sup>4</sup> " Encyclopédie ou Dictionnaire Raisoné des Sciences, des Arts et des métiers " de Diderot et d'Alembert (1751-1776)

Intervalle	Fraction de la corde entière (longueur = 1)	largeur de l'intervalle exprimé en rapport de fréquence
Les octaves	$\frac{1}{2}$ ; $\frac{1}{4}$ ; $1/8$ ; etc.	2 ; 4 ; 8 ; etc.
Quinte	2/3	3/2
Quarte	3/4	4/3
Tierce	4/5	5/4
Sixte	5/8	8/5
Septième	8/15	15/8
Ton	8/9	9/8
Demi-ton	15/16	16/15

### Lorsque Dyonisos se métamorphose en Apollon...

Si Fourier avait vécu au IV<sup>ème</sup> siècle avant JC, il aurait félicité Aristoxène : « Je vous remercie. Vous venez de vérifier expérimentalement la validité de mon théorème ».

.....Comment ça?

Il est temps de rappeler la forme analytique de la série de Fourier :

$$F(t) = a_1 \sin ft + a_2 \sin 2ft + a_3 \sin 3ft + a_4 \sin 4ft + a_5 \sin 5ft + \dots$$

Série dans laquelle  $F(t)$  est l'équation du mouvement de résonance; le premier terme  $a_1 \sin ft$  est le **fondamental** ; les termes suivants sont les **harmoniques**.

La série des intervalles d'Aristoxène correspond exactement à ceux de la série de Fourier! Exemple : la fréquence de l'octave est bien double de celle du fondamental (harmonique 1 de la série) ; la largeur du second intervalle, la quinte, est bien 3/2 ; celle de l'intervalle suivant la quarte, est bien 4/3 ; etc. Voilà pourquoi la gamme du musicien Aristoxène porte également le nom de « gamme des physiciens! ».

La figure I montre la résonance naturelle d'un fondamental à 66 Herz. Les termes de la série sont repérés par leur rang harmonique, leur fréquence, leur position sur des portées de musique et leur position sur un clavier de piano (ou de synthétiseur).

5

---

<sup>5</sup>Les 2 dernières présentations des résultats sont très claires pour un musicien mais attention, ne nous méprenons pas! Les « notes bleues » ne sont pas des notes de musique produites par la résonance naturelle ; ce ne sont que de pures sinusoïdes comme celles du Carnaval. Les 3 représentations sont en fait identiques, seul le design du cadran du générateur de signaux change.

---

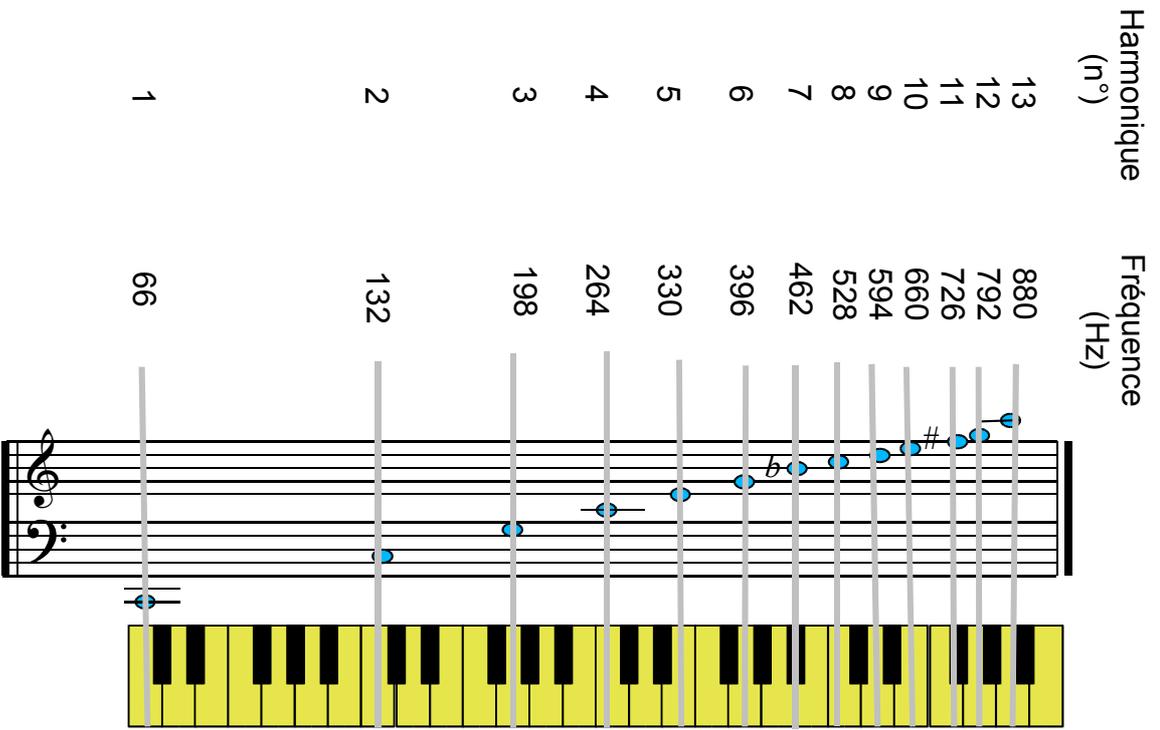


FIGURE I - Résonance naturelle du fondamental 66 Herz.

Le tableau III indique la fréquence des 12 degrés calculés à partir du critère d'Aristoxène :

TABLEAU III. Gamme naturelle d'Aristoxène ( $DO_3 = 264$  Hz)

Note	gamme naturelle (Aristoxène)
1 (fondamental f)	264,00
2	275,00
3	<b>297,00</b>
4	316,80
5	<b>330,00</b>
6	<b>352,00</b>
7	371,25
8	396,00
9	412,50
10	440,00
11	475,20
12	495,00
13 (octave = 2f)	<b>528,00</b>

### Comparaisons de 3 gammes

Dans le tableau IV sont reportées les fréquences des 12 degrés des gammes de Pythagore et d'Aristoxène et celles d'une gamme dont l'écart entre les 12 degrés est rigoureusement égal : l'intervalle de fréquence est exactement de 1.05947 entre chaque degré. Cette gamme est appelée « gamme tempérée ».

Tableau IV. Comparaisons des 3 gammes.

Note	Gamme d'Aristoxène dite naturelle (Herz)	Gamme Pythagore (Herz)	Gamme tempérée (Herz)
1	264,00	264,00	264,00
2	275,00	281,95	279,70
3	297,00	297,00	296,33
4	316,80	316,80	313,95
5	330,00	333,96	332,62
6	352,00	356,66	352,40
7	371,25	375,93	373,35

Note	Gamme d'Aristoxène dite naturelle (Herz)	Gamme Pythagore (Herz)	Gamme tempérée (Herz)
8	396,00	396,00	395,55
9	412,50	422,93	419,07
10	440,00	445,37	443,99
11	475,20	475,73	470,39
12	495,00	501,07	498,37
13 (octave)	528,00	535,13	528,00

Connaissant la génèse de ces gammes, nous ne sommes pas surpris de trouver des valeurs identiques dans la gamme de Pythagore et celle d'Aristoxène. Mais à part cela, on constate des différences notoires. Ces différences sont not es en % dans le tableau V . Et malheureusement, la précision de l'oreille exerc e est meilleure que les différences observ es dans ce tableau :

- on admet que 2 notes jou es séparément peuvent être diff renci es par l'oreille si leur intervalle est supérieur à 1,16%. Un survol rapide du tableau V montre que cette valeur est d pass e dans de nombreux cas. De même, l'oreille refusera l'octave pythagoricienne (coma pythagoricien = 1,3%).
- entendus simultanément, des battements désagréables se produisent entre les sons. Ils sont détectés par l'oreille lorsque leur fréquence est supérieure à 2 Herz ; ce qui est très peu. Il est donc impératif de trouver une solution au problème.

Tableau V : Largeur (en%) des 12 demi-tons dans les 3 gammes :

Demi-ton	Largeur du demi-ton (%) Gamme naturelle d'Aristoxène	Largeur du demi-ton (%) Gamme Pythagore	Largeur du demi-ton (%) Gamme tempérée
1-2	6.80	4.20	5.94
2-3	5.30	8.00	5.94
3-4	6.60	6.60	5.94
4-5	5.40	4.20	5.94
5-6	6.80	6.60	5.94
6-7	5.40	5.50	5.94
7-8	5.30	6.60	5.94
8-9	6.80	4.20	5.94
9-10	5.30	6.60	5.94

Demi-ton	Largeur du demi-ton (%) Gamme naturelle d'Aristoxène	Largeur du demi-ton (%) Gamme Pythagore	Largeur du demi-ton (%) Gamme tempérée
10-11	6.80	8.00	5.94
11-12	5.30	4.20	5.94
12-13(octave)	6.80	6.60	5.94

### Le tempérament des gammes.

Les écarts observés dans les 2 derniers tableaux posent un problème qui ressemble à la quadrature du cercle des anciens grecs, au « tonneau des Danaïdes », ou au Rubix's cube. Le musicien recherchant de belles consonances sans battement pour plaire aux dieux, aux rois ou au jury de la StarAc', choisirait volontiers la gamme d'Aristoxène (Tableau V : colonne de gauche). Mais quelles contraintes! Pour quelques intervalles justes, beaucoup d'autres ne le seront pas ; la belle quinte entre les notes 1 et 6 sera fausse entre 2 et 7 ou 3 et 8. Imaginez un escalier dont toutes les marches n'auraient pas la même hauteur! On comprend le besoin d'avoir des intervalles égaux comme ceux que propose la gamme de la colonne de droite (dite « tempérée égale»). Mais dans cette dernière, à part l'octave, tous les intervalles sont « faux » (au moins, un peu). Le problème est insoluble! Entre les colonnes de droite et de gauche, il y a un espace infini dans lequel les théoriciens, les musiciens, les accordeurs vont devoir tricher sur la hauteur des intervalles pour tromper le mieux possible la sensibilité de notre oreille. Tricher de cette façon, s'appelle « tempérer une gamme ».

Le nombre de tempéraments qui ont été inventés pendant la Renaissance et la période baroque est considérable ; ils peuvent se répartir en 4 catégories, selon les principes mis en œuvre (mais d'autres critères de répartition sont possibles) :

1. les tempéraments mésotoniques ;
2. les tempérament inégaux ;
3. le tempérament égal ;
4. les tempéraments par division multiple.

On parle de tempéraments réguliers lorsque les corrections apportées aux intervalles s'appliquent identiquement à tous : ce sont donc les tempéraments mésotoniques dont le tempérament égal n'est qu'un cas particulier. Les tempéraments inégaux sont dits « irréguliers ».

Dans le cadre d'un tempérament inégal, toutes les quintes (et conséquemment

toutes les tierces) n'ont pas la même hauteur : chaque tonalité possédait donc une « couleur sonore » particulière. Joie, tristesse, sérénité, mélancolie, etc. s'expriment dans le choix de tonalités censées mieux les représenter : ce critère est mis en pratique par les grands compositeurs tels que Bach et Couperin qui y attachent beaucoup d'importance. Le choix du tempérament utilisé peut, à l'inverse, être déterminé par la tonalité choisie et les modulations envisagées au cours d'une même pièce, certains étant mieux appropriés que d'autres.

## Conclusion

Arrivés au terme de notre ascension, il nous faut bien reconnaître que le paysage dans lequel poussent nos fleurs de sons, est un peu tourmenté. Et pourtant, du fond des sombres vallées abritant de frileux villages qui attendent que le soleil les sèche du brouillard matinal, montent les complexes harmonies de l'activité des hommes. Le spectacle de ce paysage serait un vrai bonheur si quelques collègues n'avaient pas refusé de terminer l'ascension en découvrant les tortures que nous faisons subir à la physique dans la traversée du ravin dit « du tempérament ». Le physicien aime que ses efforts débouchent sur de « belles lois », simples et rigoureuses dans leur formulation. Le tempérament n'en fait pas partie.

Que l'on soit physicien ou musicien, profitons de la richesse de ce paysage pour en faire un terrain de jeu. Les ressources technologiques de notre époque nous rendent accessibles l'exploration de ce monde subtil : le souci d'authenticité musicologique pousse certains interprètes à jouer sur des instruments accordés selon les tempéraments en vigueur au moment de la composition. Des sites sur la « toile » permettent d'écouter des exemples musicaux joués avec des tempéraments inégaux <sup>6</sup>. L'orgue de la chapelle de l'université de Stanford en Californie possède des séries de tuyaux complémentaires qui permettent de jouer en tempérament égal ou inégal. Des logiciels d'éducation musicale peuvent également permettre différentes sortes de tempérament. Et n'oublions pas, qu'en dépit de nos outils « high tech », l'accord d'un piano est toujours confié aux 2 oreilles d'un cerveau humain!

---

<sup>6</sup> Le site remarquable : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rament\\_in%C3%A9gal](http://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rament_in%C3%A9gal) propose 11 tempéraments inégaux commentés. A visiter également, le site : <http://perso.wanadoo.fr/fbessac/temperament/>.

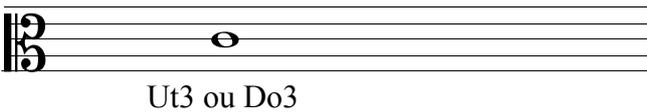
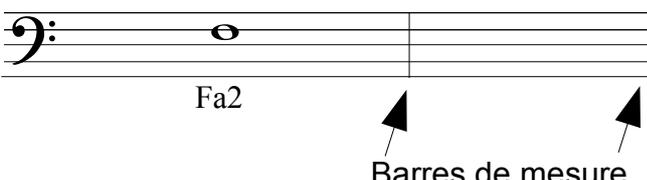
## ... et, bouquetons pour toi, des chansons.

### Ecrire et jouer la musique.

La **partition** pour écrire et lire la musique n'est qu'une forme particulière de représentation graphique des notes jouées en fonction du temps :

- en abscisse, le temps ; mais l'échelle hh:mm:ss est remplacée par une échelle qui compte les cellules rythmiques appelées **mesures**.
- pour indiquer la hauteur des notes, l'axe des ordonnées est divisé en lignes. 5 lignes forment une **portée**. Les notes peuvent être placées soit sur les lignes soit dans les **inter-lignes** : l'intervalle musical entre 2 **lignes** est de 1 **ton**. Une **clé** en début de portée étalonne celle-ci. Le tableau VI ci-dessous indique les 3 clés utilisées (Fa, sol et Ut) ainsi que leur position les plus courantes sur la portée :

Tableau VI : portées et clés musicales

Clé	note repère
SOL	
UT	
FA	

### Le clavier

L'histoire de la musique occidentale peut se résumer à une conquête des harmoniques de la résonance naturelle. Avant notre ère, seuls les intervalles d'octave, de quinte et de quarte étaient considérés comme consonants. A la fin du

Moyen-Age, la tierce acquiert à son tour cette distinction ; les Romantiques usent et abusent de la septième tant et si bien que le jazz considère la septième comme un minimum qu'il convient d'enrichir d'une neuvième, d'une onzième et même d'une treizième.

Le clavier instrumental a bien évidemment suivi cette évolution. Ainsi le clavier, qui ne possédait que quelques touches ou « claves » au XII<sup>ème</sup> siècle (Figure 2), a t'il évolué en se dotant d'un Sib, première note altérée de la série puis des autres notes altérées.

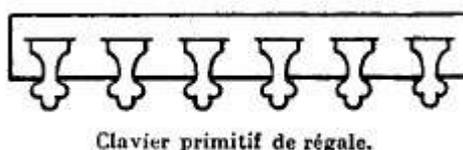


FIGURE II - L'ancêtre du clavier

Ces dernières étant moins utilisées, se sont insérées entre les notes de la gamme diatonique sur une ligne en retrait et un peu surélevées pour une meilleure ergonomie (bien que le mot n'existât pas en ces temps reculés!).

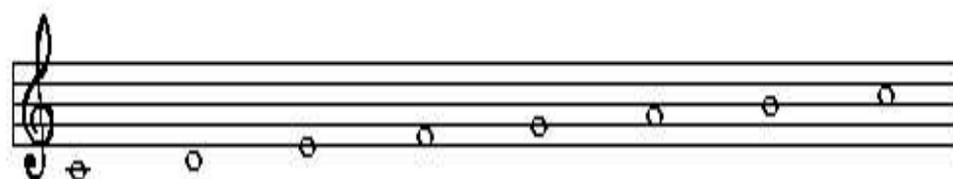
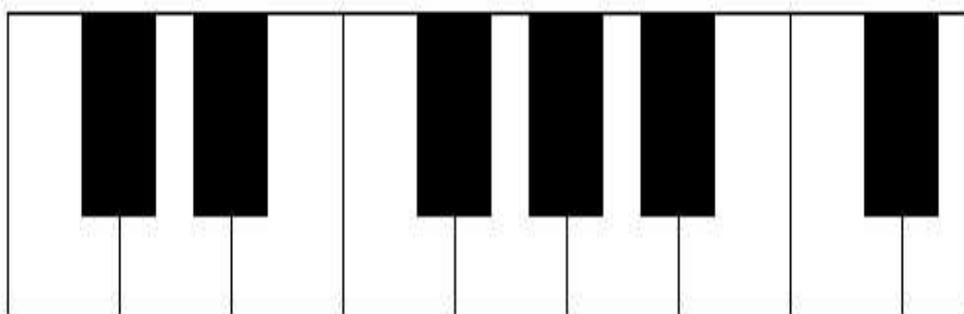
Le clavier chromatique de 12 touches par octave, tel qu'il se présente de nos jours, existe depuis le XIV<sup>ème</sup> siècle. Les 7 touches blanches (tableau III) vont avoir droit à un nom bien à elles : DO, RE, MI, FA, SOL, LA, SI<sup>7</sup>. Quant aux autres, elles devront se contenter de n'être considérées que comme des altérations des notes blanches. Pour cela, on prend le nom de la note blanche la plus proche auquel on ajoute un signe indiquant si la note altérée se trouve en-dessus ou en-dessous de la note blanche. Si la note se trouve au dessus de la note blanche, on ajoute le signe # (dièse); si elle est en dessous, on ajoute le signe b (bémol) : "Do# ou Réb - Ré# ou Mib - Fa# ou Solb - Sol# ou Lab - La# ou Sib ".

Pour résumer, la figure 3 situe ces notes sur un clavier de piano.

<sup>7</sup> D'après les premières syllabes des hémistiches des premiers vers de l'hymne des vêpres de l'office de St Jean-Baptiste.

FIGURE 3- Le clavier moderne

ou Do dièse Ré dièse Fa dièse Sol dièse La dièse  
 ou Ré bémol Mi bémol Sol bémol La bémol Si bémol



Do Ré Mi Fa Sol La Si Do

## Mouvement II - L'Orgue : une manip qui chante!

### Introduction

Nous avons choisi l'orgue parce que sa taille monumentale en fait un support pédagogique privilégié pour illustrer le thème « physique et art ». Mais tous les instruments de musique sont les fruits d'une heureuse collaboration entre physique et art. Deux domaines de la physique nous suffiront pour comprendre l'essentiel du fonctionnement de « notre grosse manip »: la mécanique et l'acoustique.

Commençons par un peu d'Histoire...

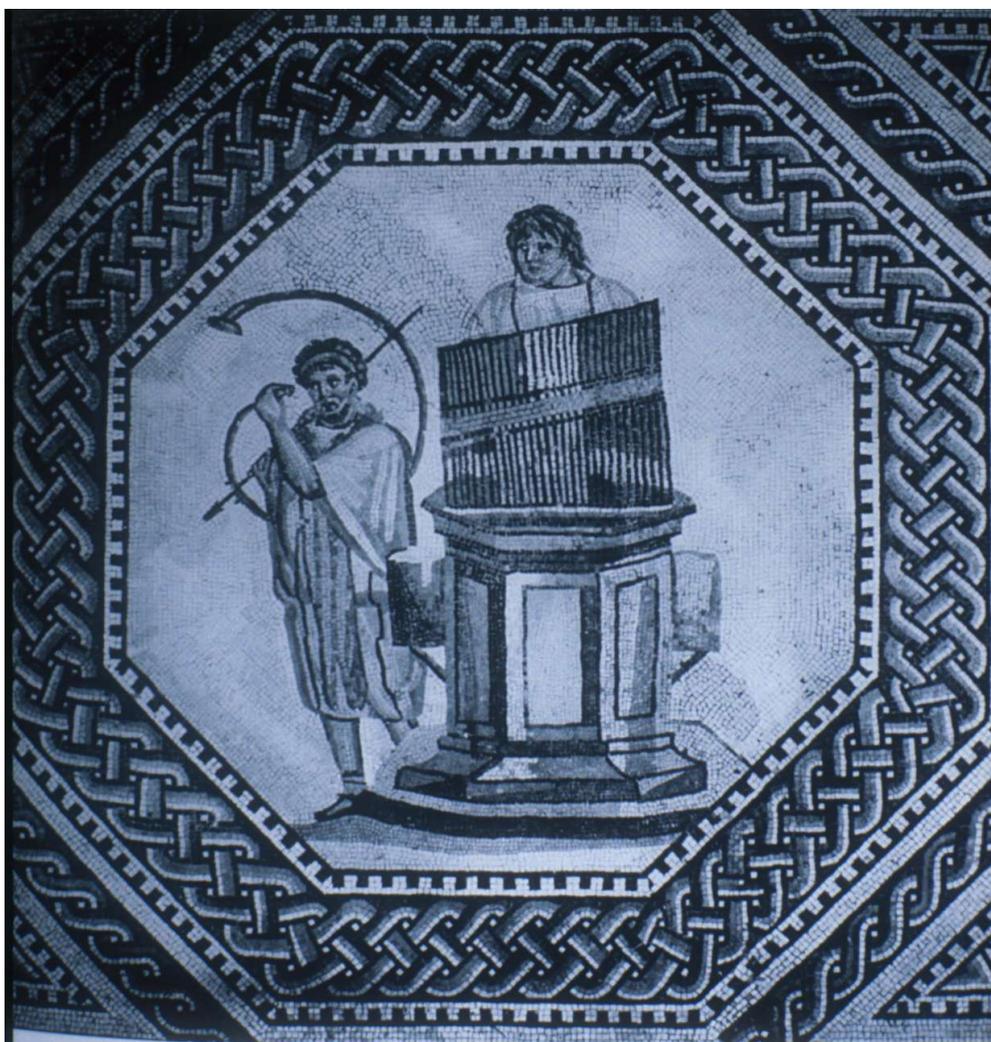


Figure 4. Mosaique romaine



Figure 5. Lampes à huile carthagoises en forme d'orgue hydraulique



Figure 6. Pièce de monnaie à l'effigie de l'hydraule.

L'histoire de l'orgue commence au troisième siècle avant J.C, en Alexandrie. Ctésibios<sup>8</sup>, fils d'un coiffeur, est un inventeur doué et ingénieux. On lui doit jouets mécaniques, jeux d'eau, automates, pompes à incendie. Tout ce qui passe entre ses mains subit des transformations liées à son imagination fertile.

C'est ainsi qu'un jour de l'an 246 avant J.C, Ctésibios détourne de son usage traditionnel l'aulos, petit instrument à vent, à **anche** double, très répandu à l'époque et qu'il entreprend de faire fonctionner avec de l'eau. Il construit une ingénieuse machine à faire de la musique, avec pompe, contrepoids, pistons, soupapes et une rangée de 8 à 10 aulos de différentes tailles qu'il plante sur un sommier recevant l'air par pression hydraulique. L'ancêtre de l'orgue est né, il s'appelle hydraulos.

Les hydraulos qui produisent des sons très puissants, auront une vocation musicale grâce à Thaïs, la femme de Ctésibios. Elle est musicienne et devient ainsi la première organiste ou hydraularia.

Pendant plus de 4 siècles, l'orgue hydraulique régnera sur tous les empires d'Orient et d'Occident. Cicéron découvre l'hydraulos au cours d'un séjour en Asie mineure en 78 avant J.C. Il le compare aux épices orientales inconnues. Subjugué par ses sonorités, il parle de la voix de l'orgue comme une délicate friandise apportant les jouissances les plus sensuelles. A cette époque, Rome méprise la musique instrumentale, il faudra attendre l'an 50 après J.C pour que l'orgue hydraulique soit connu des Romains. Le pouvoir magique de cet instrument provoque alors une véritable frénésie. Il devient un objet de luxe.

Pour en savoir plus :

<http://coll-ferry-montlucon.pays-allier.com/gdscient.htm>

<http://frederic.chapelet.free.fr/>

<http://perso.wanadoo.fr/eisenberg/>

---

<sup>8</sup> cf.<http://coll-ferry-montlucon.pays-allier.com/gdscient.htm>

## Présentation de la « manip » : les différentes parties.

Chaque orgue est unique : il est conçu comme une oeuvre d'art devant donner le meilleur d'elle-même dans l'édifice pour lequel elle est conçue. Plusieurs artisans collaborent à l'oeuvre : menuisier, ébéniste, électricien, tuyautier, harmoniste et facteur d'orgue<sup>9</sup>. On serait en droit de penser que les instruments qui sortiront de cette collaboration complexe, n'auront aucun lien commun entre eux hormis d'être des instruments à tuyaux et à claviers. Heureusement, chaque époque et chaque pays va contraindre l'équipe à honorer les canons esthétiques à la mode. Ce qui nous permet de dire, en simplifiant outrageusement, qu'il y a eu, depuis le XV<sup>ème</sup> siècle, un type d'orgue par siècle et par grande nation d'Europe.

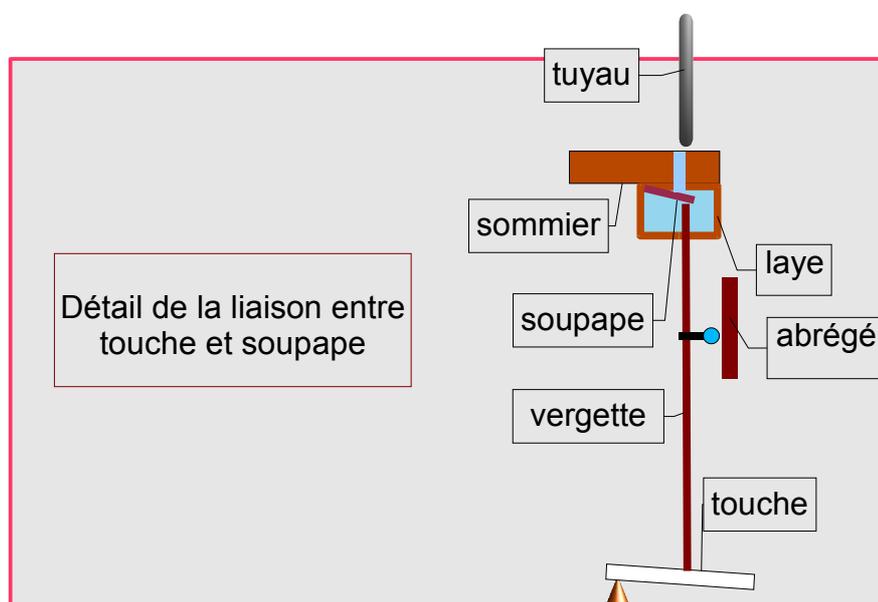
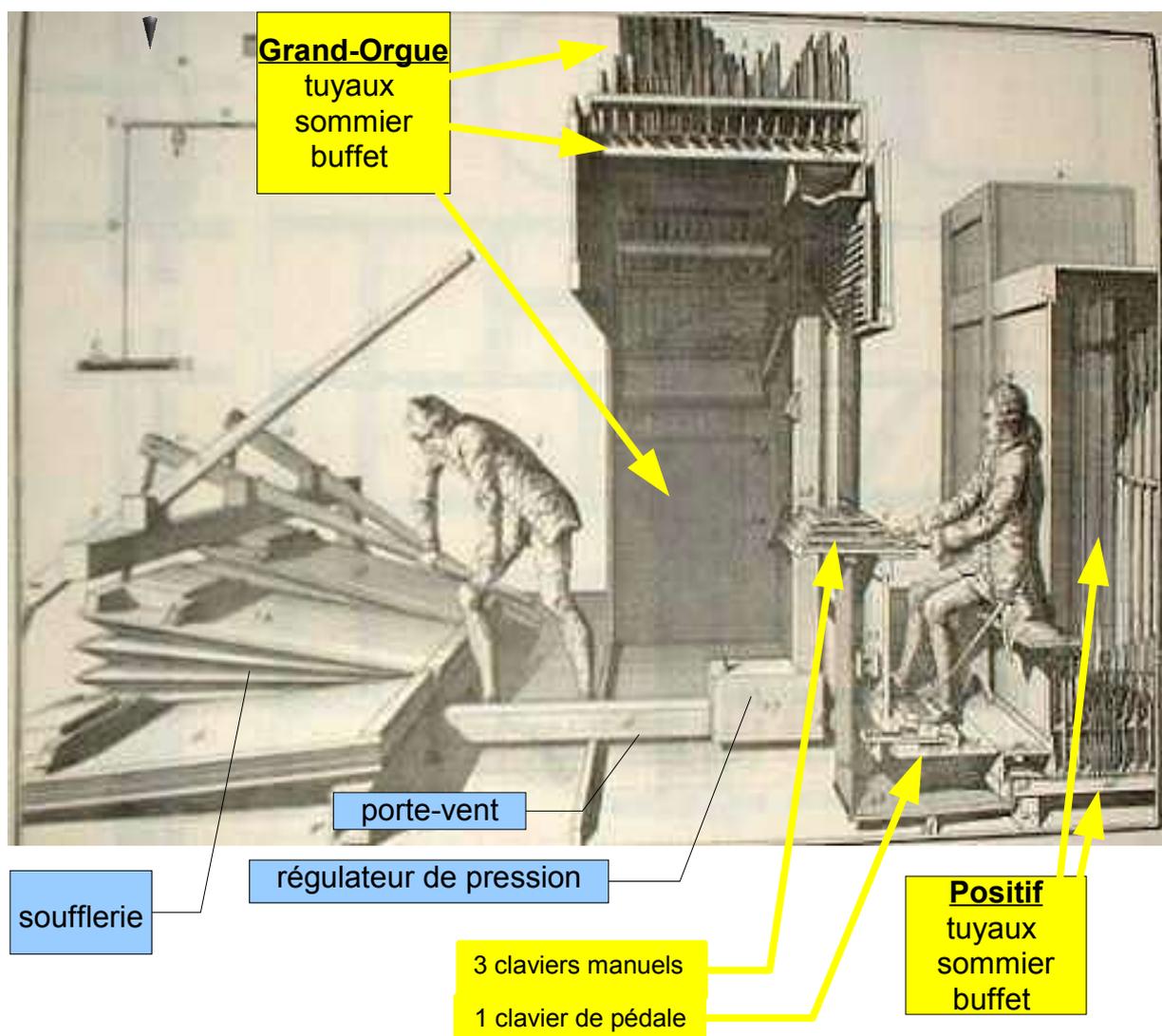
Il va donc être nécessaire, pour traiter le thème général qui nous réunit ce soir, de choisir choisir un type d'orgue qui sera notre cas d'école. Nous allons choisir l'orgue baroque français (XVIII<sup>ème</sup> siècle) pour les raisons suivantes :

- la conception de l'orgue de St Pierre St Paul de Lille s'inspire des principes de l'orgue baroque,
- Les lumières de ce siècle n'ont pas oublié d'éclairer l'atelier du facteur d'orgue. La logique et le souci du respect des lois mécaniques et acoustiques ont présidé à la conception des instruments de cette époque. La compréhension du fonctionnement de cette machine complexe s'en trouve donc grandement facilitée!
- L'exigence de clarté de cette époque réussit même à rendre la lecture d'un Traité de facture d'orgue aussi passionnante que la lecture d'Alice au Pays des Merveilles! Nous emprunterons 2 gravures extraites de l'Encyclopédie de Diderot pour montrer la logique de la disposition intérieure d'un orgue.

---

<sup>9</sup>Depuis quelques années, l'informaticien apporte son savoir-faire dans les grands instruments. Certes à l'époque baroque, il n'y avait ni électricité ni informatique ; mais ces techniques n'interviennent dans l'orgue moderne qu'en tant d'auxiliaires de confort sans incidence sur les principes généraux.

Figure 7 - Vue longitudinale (Traité de facture d'Orgue - don Bedos) et détail de la liaison mécanique (vergette) entre touche et soupape.



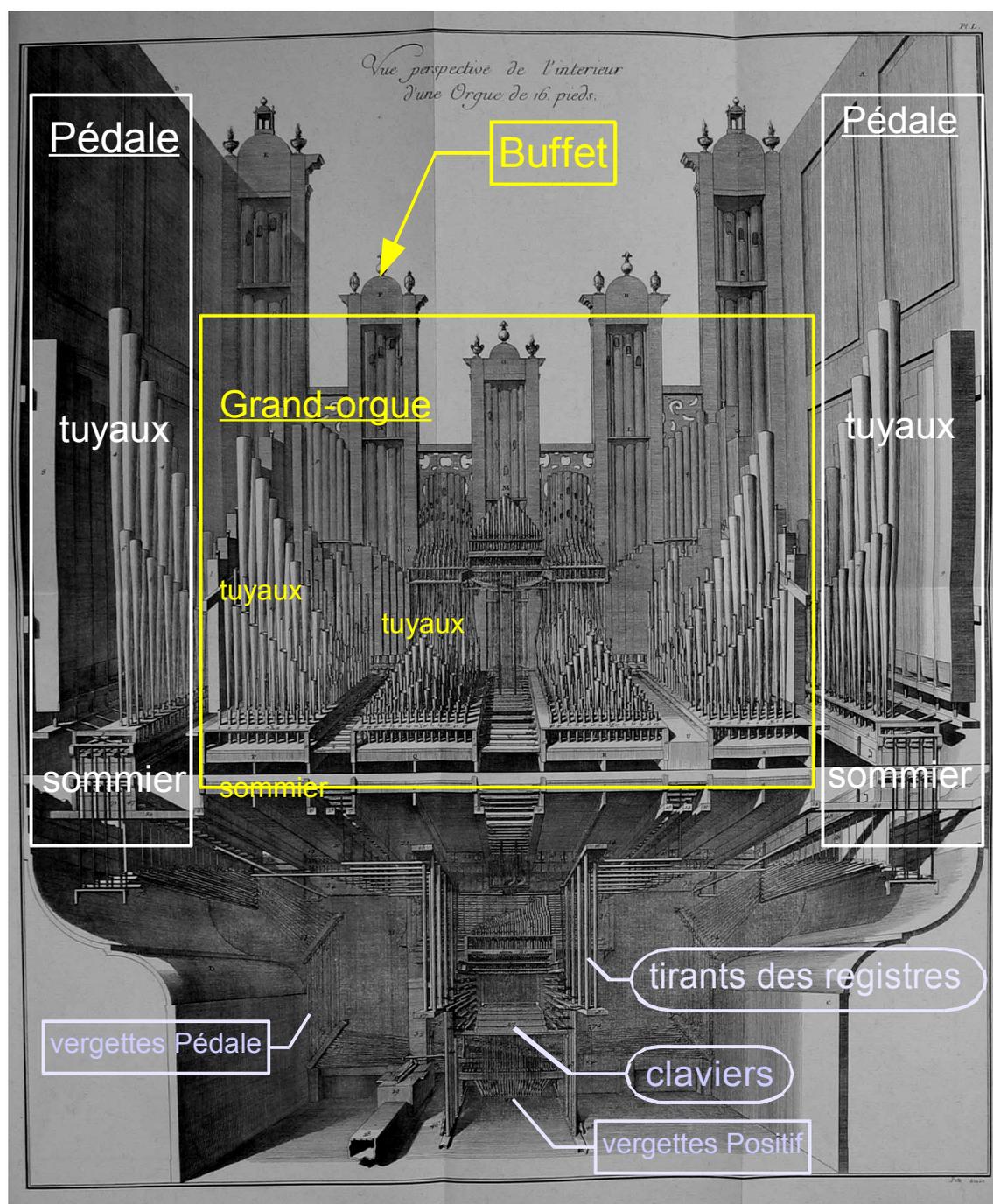


Figure 8 - Vue transversale (Traité de facture d'Orgue - don Bedos).

A partir des Figures 6 et 7, essayons d'acquérir une image tri-dimensionnelle de l'espace occupé par un orgue:

- Figure 6, l'observateur regarde une coupe de l'orgue parallèle à l'axe de l'église, la nef étant à droite.

- première constatation : l'orgue ne se réduit pas à la rangée de tuyaux aperçue depuis la nef <sup>10</sup>; cette rangée est l'orée qui cache la forêt (de tuyaux),
- à gauche, derrière l'orgue, un homme gonfle de gros soufflets. La face supérieure des soufflets est lestée de poids en plomb pour comprimer l'air expulsé dans le **porte-vent** (gros conduit carré, au milieu de l'image) ; la grosse boîte en bout du porte-vent est un régulateur de pression. En sortie du régulateur, la pression est de l'ordre d'une centaine de millimètres d'eau. De nos jours, la fonction ingrate du souffleur est assurée par une turbine mue par un moteur électrique.
- La **console** devant laquelle est assis l'organiste, regroupe de 4 **claviers** : 3 claviers manuels et un **pédalier**. Chaque clavier servant à jouer une partie de cet instrument, on peut donc en déduire que ce grand-orgue est formée de 4 parties indépendantes. Quatre orgues, donc : 4 « forêts » de tuyaux (sur les 4, 2 seulement ont été dessinées pour ne pas surcharger la gravure). Détaillons un peu chacun des claviers :
  - le clavier manuel inférieur sert à jouer le **positif**. On aperçoit une série de lamelles minces en bois de sapin descendant verticalement à l'aplomb du clavier, passant ensuite sous le banc de l'organiste pour aller vers le **positif**. Ces lamelles, appelées **vergettes**<sup>11</sup>, transmettent les mouvements des touches du clavier aux soupapes qui contrôlent l'entrée du vent dans les tuyaux : autant de touches, autant de vergettes. Grâce à elles, le jeu de l'organiste sur le clavier de positif est transmis à l'orgue **positif**<sup>12</sup>.
  - le clavier du milieu est le clavier de **grand-orgue** dont on voit les vergettes monter verticalement à l'aplomb des claviers vers la « forêt » de tuyaux du grand-orgue. L'encadre rouge de la figure reproduit ce cheminement. Le **grand-orgue** est haut placé pour 2 raisons : (i) sa voix puissante ne sera pas masquée par le **positif**, (ii) le volume libéré dans la partie basse permet d'y installer une grande partie des commandes mécaniques. Il est appelé « grand-orgue » parce qu'il est doté des sonorités les plus puissantes de l'instrument.
  - le clavier supérieur actionne un petit orgue (non représenté) appelé

<sup>10</sup> Cette rangée visible de la nef s'appelle pour cette raison la « **montre** »

<sup>11</sup> **vergettes** : liaisons mécaniques entre les notes d'un clavier et les soupapes du sommier correspondant. Si le cheminement en ligne droite n'est pas possible, l'**abrégé** permet la translation et l'équerre, le changement de direction du cheminement.

<sup>12</sup> L'origine du positif remonte au Moyen-Age. Un petit orgue porté en bandoulière servait de guide-chant pendant les processions, les « **mystères** » qui parcouraient la ville. Entrant dans l'église, le musicien montait en tribune, **posait** son petit orgue sur la balustrade et pouvait à l'occasion, renforcer les ressources sonores de l'orgue de tribune. D'où le nom de **positif**.

**récit** car, à l'origine, il n'était doté que de quelques jeux permettant d'y jouer des « récitatifs » ou « récits ».

- le **pédalier** est un clavier actionné par les pieds de l'organiste. On appelle « marche » les touches du pédalier; mais à part ce détail, le pédalier fonctionne comme les autres claviers : un faisceau de vergettes relie les marches aux soupapes du sommier de **pédale**.
- Chacune des « forêts » repose sur un épais plateau creux appelé « **sommier** ». Nous reviendrons ci-dessous sur le fonctionnement du **sommier**.
  
- Figure 7, l'observateur est placé derrière l'orgue en regardant vers la nef.
- Cette fois-ci on ne voit plus le **positif** caché par la console. Par contre on découvre les 2 moitiés de l'orgue de **pédale** réparties de part et d'autre du **grand-orgue**. On peut admirer la disposition claire et aérée des différentes parties de l'orgue à l'intérieur du grand meuble appelé **buffet** qui assure les fonctions de protection et de caisse de résonance.

## Les PLANS SONORES

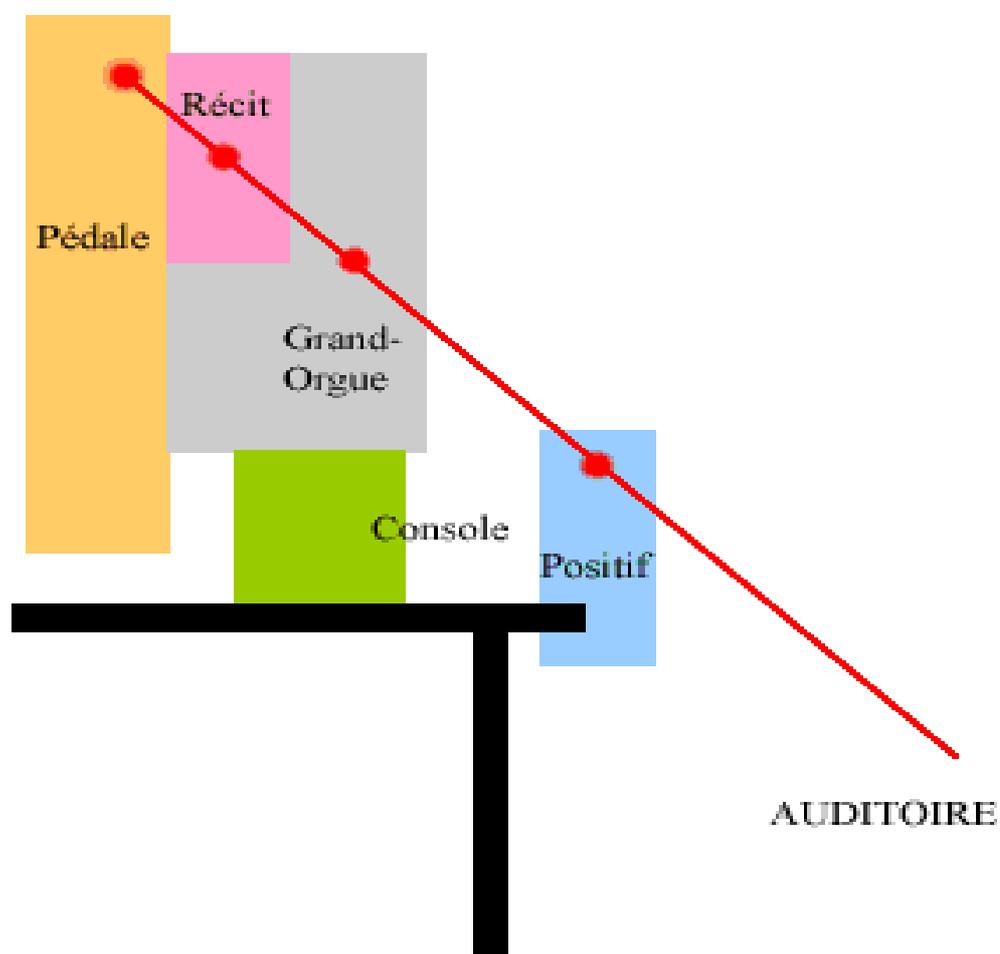


Fig 9. Les plans sonores (coupe transversale)

L'observateur est placé dans la même position que dans la figure 6. Cette vue schématisée montre bien l'intérêt acoustique d'avoir plusieurs claviers au lieu d'un seul. Grâce à l'aptitude de notre oreille à localiser spatialement une source sonore, l'auditeur un peu attentif saura distinguer les sons provenant des différents claviers. Le **positif** sonnera très clair et avec précision. Par contre, les sons du **récit** seront plus atténués et nimbés d'un halo de réverbération. Le relief sonore ainsi créé offre d'innombrables possibilités sur le plan artistique puisque chaque plan est indépendant des autres : chaque plan possède sa palette sonore, chaque plan a son clavier. Cette autonomie permet le dialogue entre plans sonores (comme dans un concerto) : elle permet également de confier un rôle d'accompagnement à l'un des plans sonores pendant qu'un autre se verra confier un rôle de soliste. A l'inverse, des dispositifs mécaniques permettent d'accoupler les claviers pour faire chanter ensemble plusieurs plans sonores simultanément soit pour augmenter la puissance du

son soit pour associer des palettes sonores incomplètes. L'analogie avec l'orchestre est donc recevable.

Les 4 plans sonores représentés sur cette figure 8, correspondent à peu près aux 4 plans sonores de l'orgue de St Pierre St Paul. Plus généralement, les plans sonores varient en nombre, en dimensions et en disposition d'un instrument à un autre.

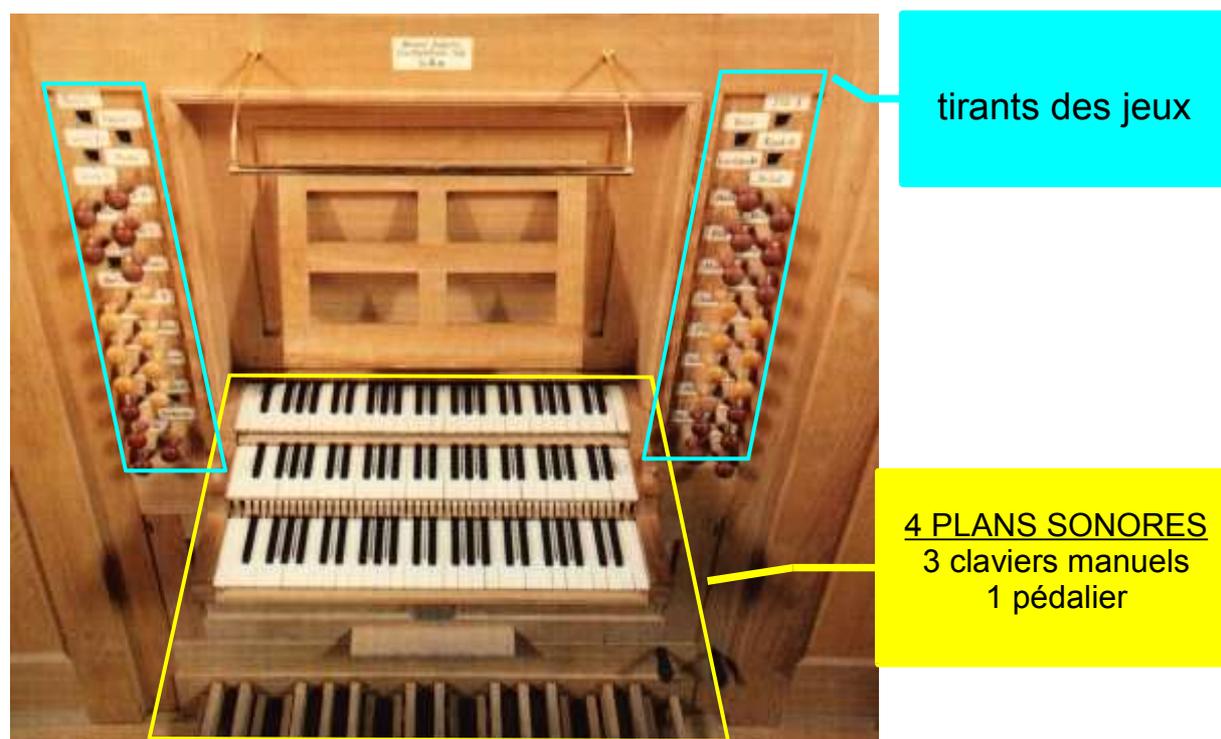


Figure 10. La console

Sur la console, sont rassemblées toutes les commandes de l'orgue :

Au centre, les 3 claviers manuels superposés (60 notes) ; en bas, on distingue le pédalier. Cet instrument a donc 4 plans sonores :

- clavier supérieur, le RECIT
- clavier milieu, le GRAND-ORGUE
- clavier inférieur, le POSITIF
- pédalier de 32 touches (ou marches)

Reprenons notre analogie : ces 4 claviers commandent 4 orgues que l'on peut comparer à 4 petits orchestres dont l'organiste sera le chef. Il aura donc la responsabilité de choisir les instruments pour chacun des 4 orchestres. Mais, où sont les instruments de ces orchestres ? Où sont les flûtes, les trompettes, les hautbois, les gambes, etc... puisqu'ici il n'y a que des tuyaux, encore des tuyaux et

toujours des tuyaux?

Puisqu'une console n'est qu'un pupitre de télécommande, inutile d'y chercher les instruments des orchestres ; par contre, on voit ce qui sert à les commander : ce sont les petits boutons de part et d'autre des claviers. Si nous pouvions zoomer sur les étiquettes en dessous de chaque bouton, nous pourrions lire « hautbois », « trompette », « contre-basse », « flûte », etc. tout comme les vrais!

Ces boutons, appelés **boutons de registres, registres ou jeux**<sup>13</sup> ont la même fonction que le chadburn que le capitaine d'un navire utilise pour transmettre ses ordres à la machine. Lorsque l'organiste tire un **jeu**, il transmet l'ordre à ce **jeu** de se tenir prêt à jouer lorsque les touches du clavier seront enfoncées. Les **boutons de registres** ont donc 2 positions :

- position poussée, le jeu reste muet même si les touches du clavier sont enfoncées (le musicien se repose)
- position tirée, le jeu est actif (le musicien est à son poste, prêt à jouer)

Avant de jouer une pièce de musique, l'organiste sélectionne les instruments de chacun de ses orchestres en tirant sur les boutons de registre : on dit que l'organiste prépare sa **registration**.

Il est temps maintenant de descendre « à la machine » pour voir à quoi ressemble ces étranges « musiciens à tuyaux » qui reçoivent leurs ordres de la console! On aura beau chercher partout, on ne trouvera pas de trompette jouée par un musicien qui, avec son unique bouche, est capable de jouer toutes les notes de la trompette. De même, il n'y a pas de violoncelle joué par un musicien qui, avec son unique archet, est capable de jouer toutes les notes du violoncelle. Idem pour tous les jeux de l'orgue. Il faut donc substituer au couple « une bouche/un instrument » le couple « autant de bouches/autant d'instruments » qu'il y a de notes dans l'instrument. Le nombre de notes se limite au nombre de touches du clavier : environ 60 notes pour les claviers manuels (et 32 notes pour le pédalier) ; ça fait quand même 60 tuyaux de trompette pour un seul jeu de trompette. Idem pour tous les instruments de l'orgue : 60 tuyaux de hautbois pour un seul jeu de hautbois ; 60 tuyaux pour imiter un violoncelle ; etc. ; etc.

On commence maintenant à se faire une idée de l'importante quantité de tuyaux nécessaire à la construction d'un instrument et pourquoi il est un peu encombrant.

---

<sup>13</sup>Cette ambiguïté sur le sens des mots est assez fréquente en facture d'orgue ; les mots orgue et clavier sont parfois synonymes ; il en est de même pour le couple de mots jeu et registre.

**TRAVAUX DIRIGES : Quel est le nombre total des tuyaux de l'orgue de St Pierre St Paul?**

Cet instrument est riche de 3 claviers manuels de 60 notes et d'un pédalier de 32 notes :

<u>Plan sonore</u>	<u>Nombre de jeux</u>	<u>Nombre de notes / clavier</u>
récit	14 jeux	60 notes
positif	10 jeux	60 notes
grand-orgue	10 jeux	60 notes
pédale	8 jeux	32 notes

**Soit un Total Général de 2 296 tuyaux**

Ce nombre peut dépasser les 7000 tuyaux dans les grands instruments : Notre Dame ou Saint Sulpice à Paris. Pour l'anecdote, le plus grand orgue du monde est à New-York (Wanamaker Store) ; il est doté de 451 jeux (soit 30 067 tuyaux) répartis sur 6 claviers.

## Le Sommier d'Orgue

### Disposition des tuyaux sur le sommier

Puisque nous connaissons le principe du jeu d'orgue, allons voir dans l'instrument à quoi cela ressemble :

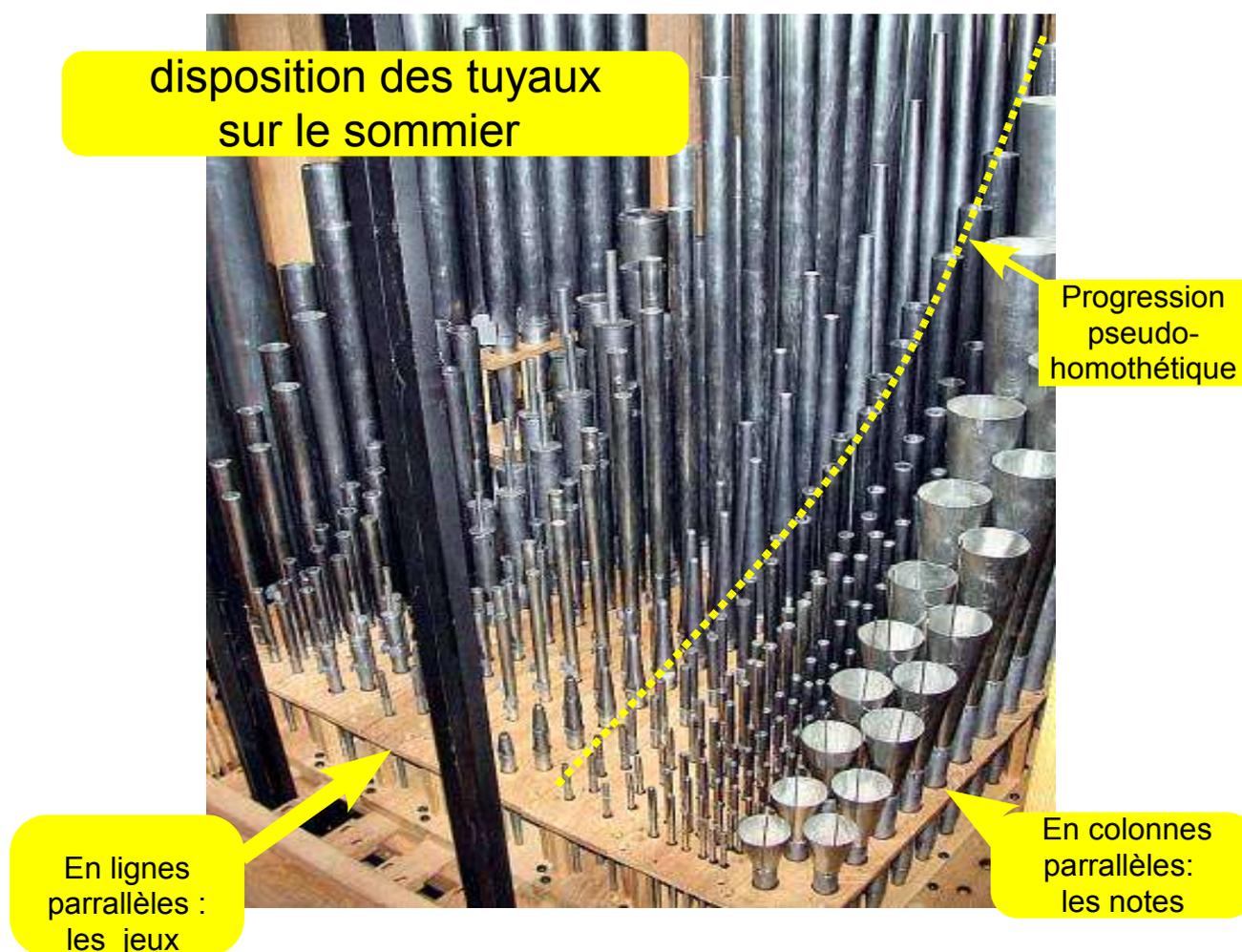


Figure 11. Disposition des tuyaux sur un sommier d'orgue

La Figure 11 montre les tuyaux reposant sur un **sommier** : ce n'est pas la « forêt » de Robin-des-Bois. Cela ressemble plutôt à une pépinière dans laquelle toutes les plantes d'une même espèce sont bien alignées parallèlement entre elles. Bien qu'il ne soit pas très facile sur cette photographie de distinguer chaque rangée, on peut quand même remarquer que les tuyaux d'une même ligne ont à peu près la même « forme » ; seule leurs dimensions diffèrent. Ils sont rangés par taille croissante de la gauche vers la droite :

- chacun ligne de la pépinière est l'un de nos musiciens : un jeu d'orgue.
- chaque ligne est formée de 60 tuyaux dont la progression homothétique des tailles permet de faire varier la fréquence de résonance tout en

conservant le même timbre sur toute l'étendue du clavier.

Par analogie avec une matrice mathématique, on peut dire que, si les jeux sont rangés en lignes parallèles, chacune des colonnes correspond à une touche d'un clavier ; les aigus étant à gauche, au premier plan ; les graves à droite vers l'arrière plan.

On peut remarquer également que, du fait de l'encombrement croissant des tuyaux en allant vers les graves, la largeur des colonnes est variable ; ce qui risque de poser un sérieux problème lorsqu'il faudra relier les colonnes aux touches du clavier!

### Sommier d'orgue : vue extérieure



REGISTRES  
coulissants

SOMMIER

FAUX-SOMMIER :  
planche servant à  
maintenir  
les tuyaux  
verticalement

Figure 12. Sommier d'orgue : vue extérieure

De l'extérieur, on voit surtout les tuyaux et il n'est pas facile de voir le sommier. Disons simplement que, vu de l'extérieur, le sommier ressemble à un grand plateau assez épais sur lequel repose les tuyaux<sup>14</sup>.

En réalité, le sommier est l'ouvrage de menuiserie le plus complexe de l'orgue dans sa fabrication et dans son fonctionnement. Mais votre formation scientifique va vous permettre de comprendre rapidement de quoi il retourne grâce à l'analogie

<sup>14</sup> La plupart des tuyaux sont réalisés en alliage de plomb et d'étain ; les plus grands sont parfois en bois.

avec la matrice mathématique! Car en réalité, le sommier d'orgue est bel et bien une matrice avec lignes et colonnes. Voyons cela...

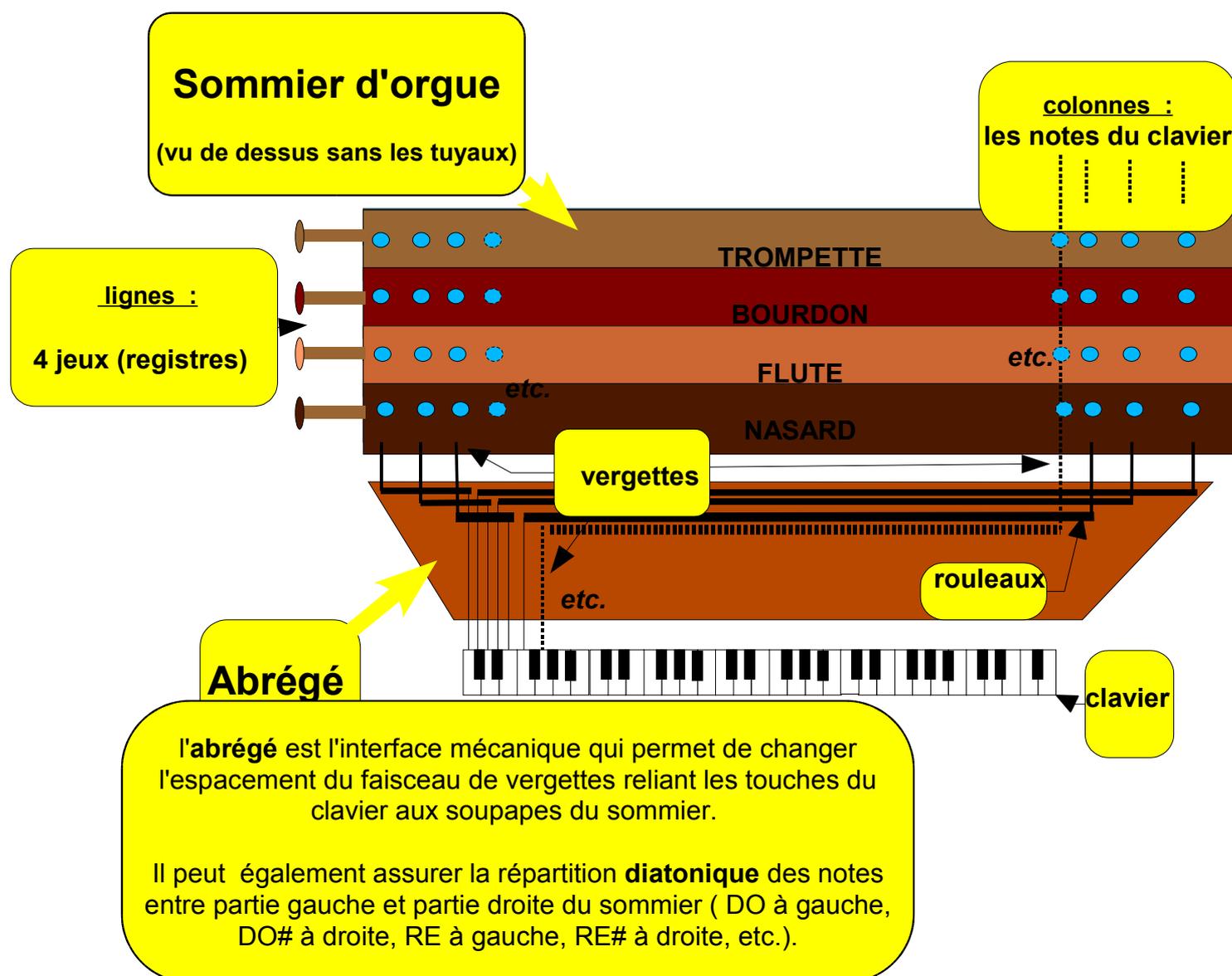


Figure 13. Schéma conceptuel de la mécanique de l'orgue

Sur cette vue schématique, chaque colonne du sommier est maintenant reliée à une touche du clavier. On retrouve le problème d'espacement évoqué sur la figure précédente. Le problème est résolu grâce au dispositif mécanique appelé **abrégé**, allusion à sa fonction qui amène au clavier un beau faisceau de vergettes bien parallèles dont l'écartement correspond exactement à celui des touches. Chaque extrémité d'un rouleau d'**abrégé** se termine par un bras de levier de quelques centimètres. La rotation du rouleau de longueur  $L$  translate le mouvement de cette même longueur  $L$ .

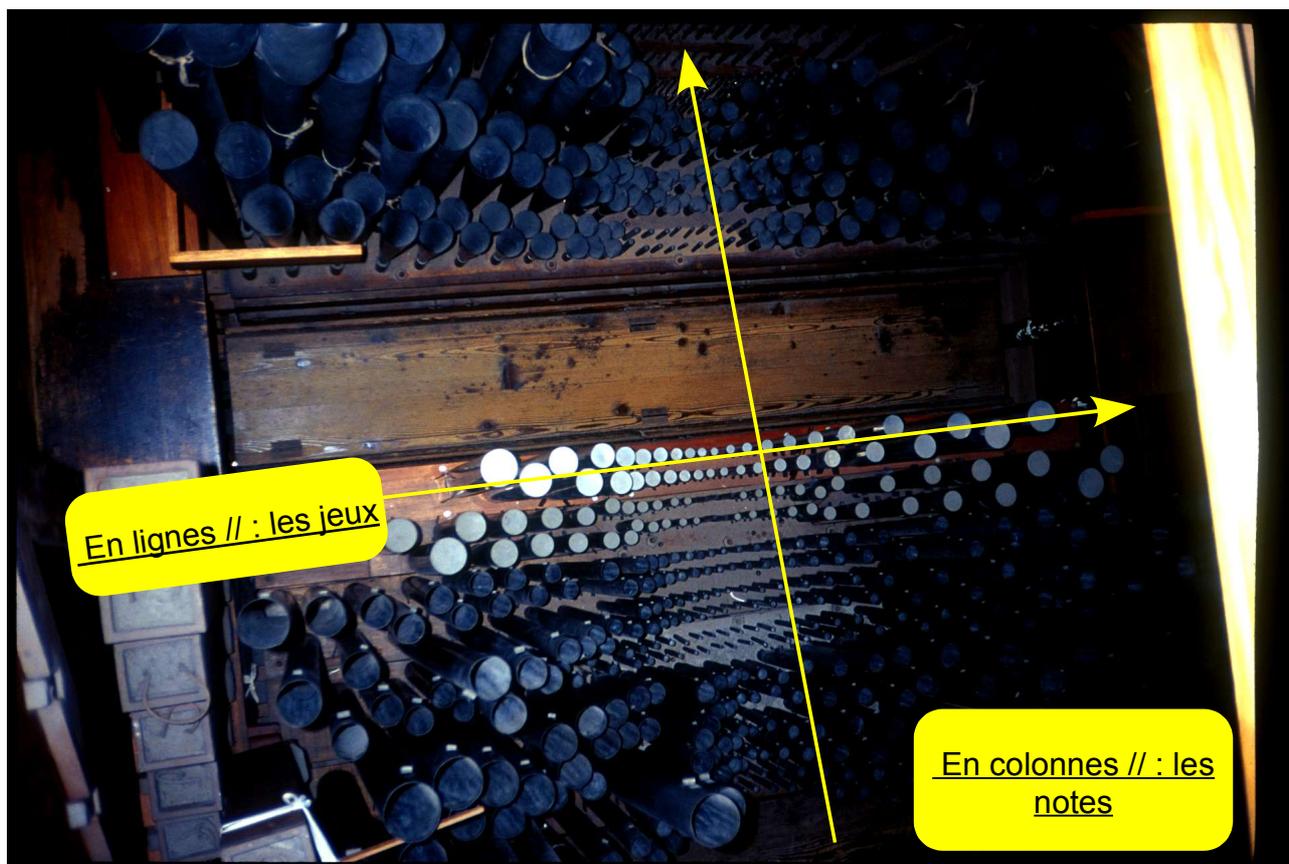


Figure 14. Sommier vu de dessus avec ses tuyaux

Cette photo montre (Figure 14) la répartition diatonique des tuyaux. La grande planche ne fait pas partie du sommier ; c'est une allée de circulation pour permettre à l'accordeur d'accorder les tuyaux de trompette situés de part et d'autre de l'allée.



Figure 15. Le grand-orgue de St Pierre St Paul à Lille (photo D. Hennequin).

**TRAVAUX DIRIGES** : Levons les yeux vers le roi... des instruments et essayons de voir si nos nouvelles connaissances nous permettent d'avoir un regard plus expert sur l'orgue de St Pierre St Paul.

**Première observation** : cet orgue n'a pas de buffet! Sur les gravures de Don Bedons, le buffet de l'orgue baroque enveloppait tous les tuyaux même les plus grands. Ici, rien de tel : le buffet se réduit à un socle dissimulant la mécanique. C'est un choix esthétique assez courant après la seconde guerre mondiale, qui valorise l'aspect visuel des tuyaux. Ce choix ne durera qu'une quinzaine d'années car il sous-estime la fonction de caisse résonance du buffet sans parler de son rôle de protection et de régulateur thermique contre les variations de température qui désaccordent l'orgue.

**Seconde constatation** : sur les 4 plans sonores que compte cet instrument, 2 sont très faciles à distinguer. Un orgue plus petit se détache en avant d'un plus grand. Nous savons maintenant que le plus petit est le positif ; le plus grand étant le

grand-orgue.

Concernant le plan sonore du pédalier, on voit juste le haut des tuyaux qui dépassent à droite et à gauche derrière les plus grands tuyaux du grand-orgue. Quant au quatrième, le récit ; il est entièrement caché derrière le grand-orgue.

## Réalisation pratique d'un sommier

L'analogie entre matrice mathématique et sommier étant assimilée, il ne nous reste plus qu'à regarder à l'intérieur pour voir comment ça marche. Et pour cela, le plus pédagogique est d'en construire un (au moins virtuellement) en nous disant que notre matériau de base sera le bois. On devra pouvoir faire reposer quelques jeux sur ce sommier ; disons, 3.

1° étape : construction des colonnes :

Nous savons qu'un clavier ayant 60 touches, il nous faut fabriquer 60 colonnes qui amèneront le vent aux tuyaux lorsque l'organiste appuiera sur les touches. Puisque notre matériau est le bois, nous allons fabriquer une grille avec 64 tasseaux : 60 pour les colonnes et 4 pour le cadre extérieur. Notre grille est terminée.

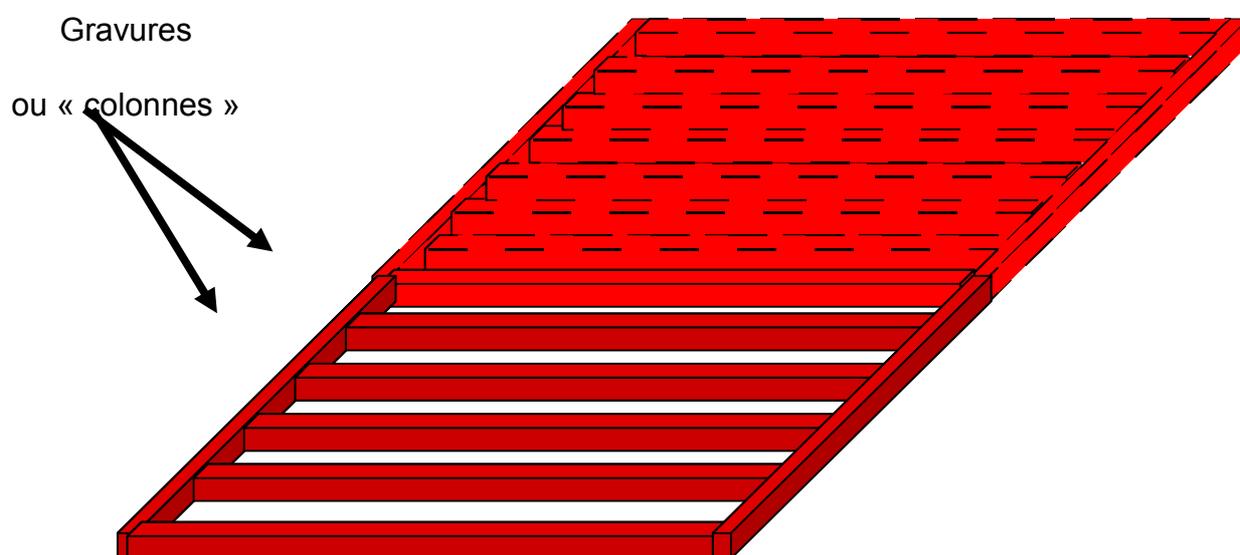


Figure 16. Grille du sommier

Ensuite, on colle sur la face supérieure et inférieure de la grille une feuille de contre-plaqué pour fermer les colonnes. Nos 60 colonnes sont terminées. Les facteurs d'orgue ne disent pas colonnes mais **gravures**.

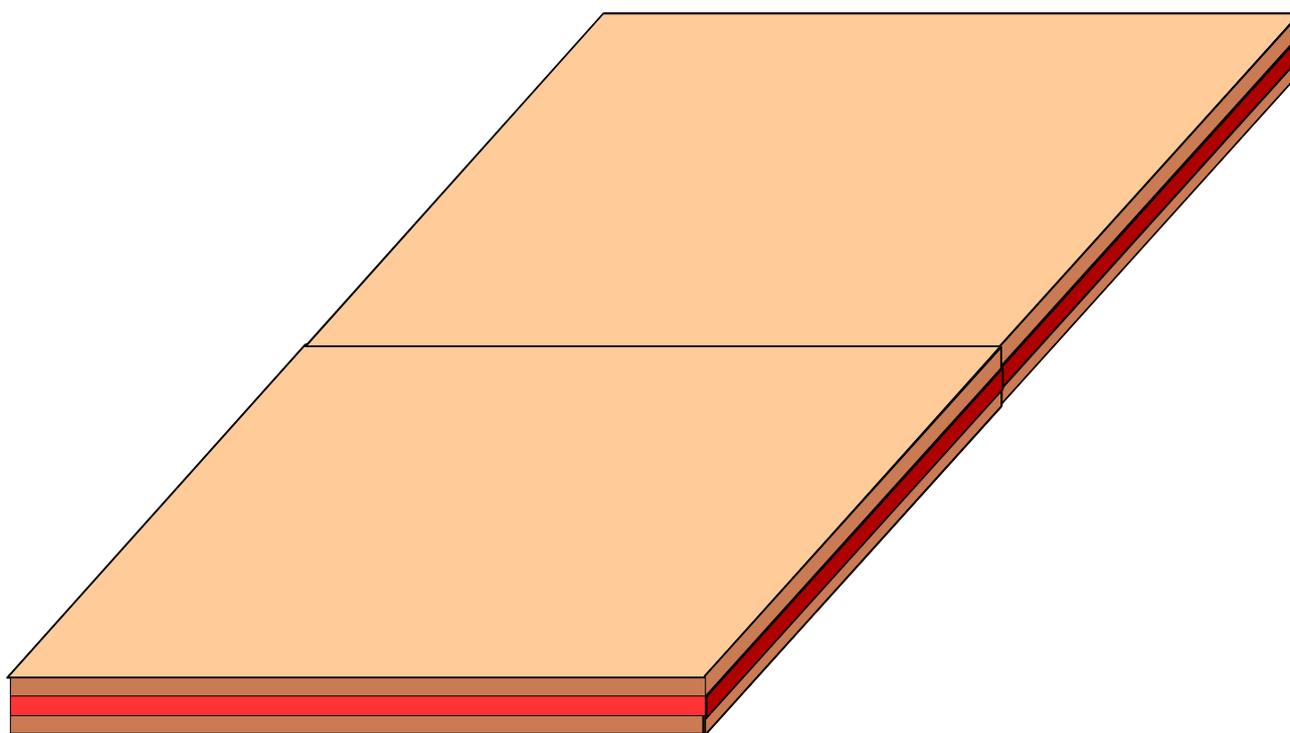


Figure 17. Grille fermée

Il est temps de penser à la façon de faire rentrer l'air dans chacune des colonnes lorsqu'on enfoncera les touches.

Il est assez naturel d'imaginer une soupape en bout de chaque colonne qu'il suffira de tirer avec une « ficelle » reliée à la touche, qui faisant fonction de bras de levier, permettra au vent de rentrer dans la colonne. C'est effectivement le principe retenu. Cependant, les bouts de ficelle aux médiocres propriétés mécaniques seront remplacées par les vergettes que nous connaissons déjà.

On peut suivre ces étapes de construction à l'aide des Figures 18 et 19.

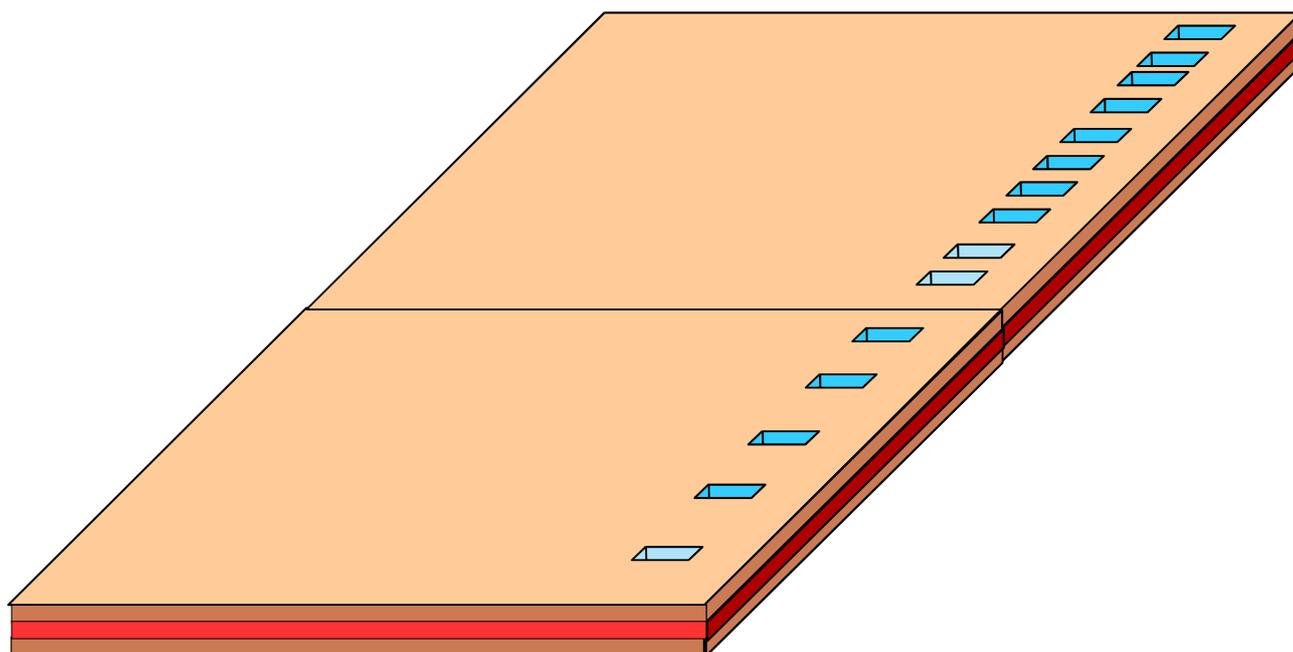


Figure 18. Perçage des colonnes

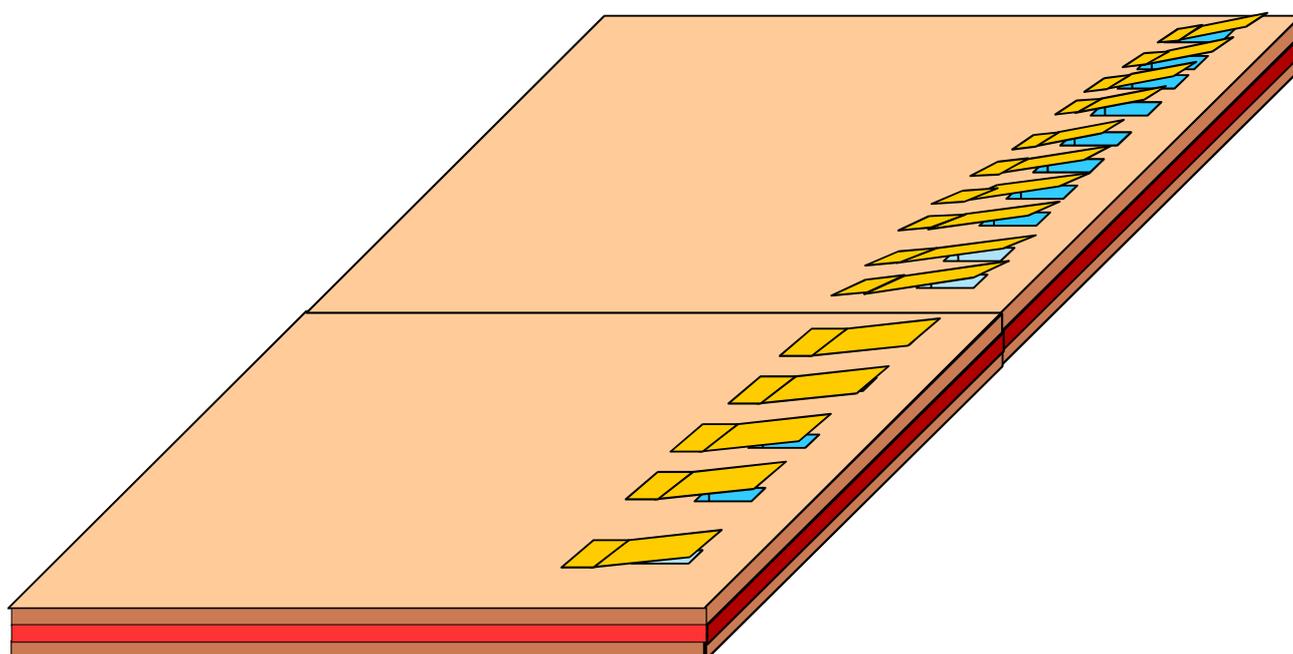


Figure 19. Pose des soupapes

Les soupapes étant posées, il faut les alimenter en vent. Sur la Fig. 7, on voyait un porte-vent, sorte de gros tuyau en bois de section rectangulaire, qui partait des soufflets et allait se perdre on ne savait pas trop où à l'intérieur de l'orgue. Le moment est venu de préciser, qu'il se divise en plusieurs branches dont chacune va alimenter en vent chaque sommier de l'instrument.

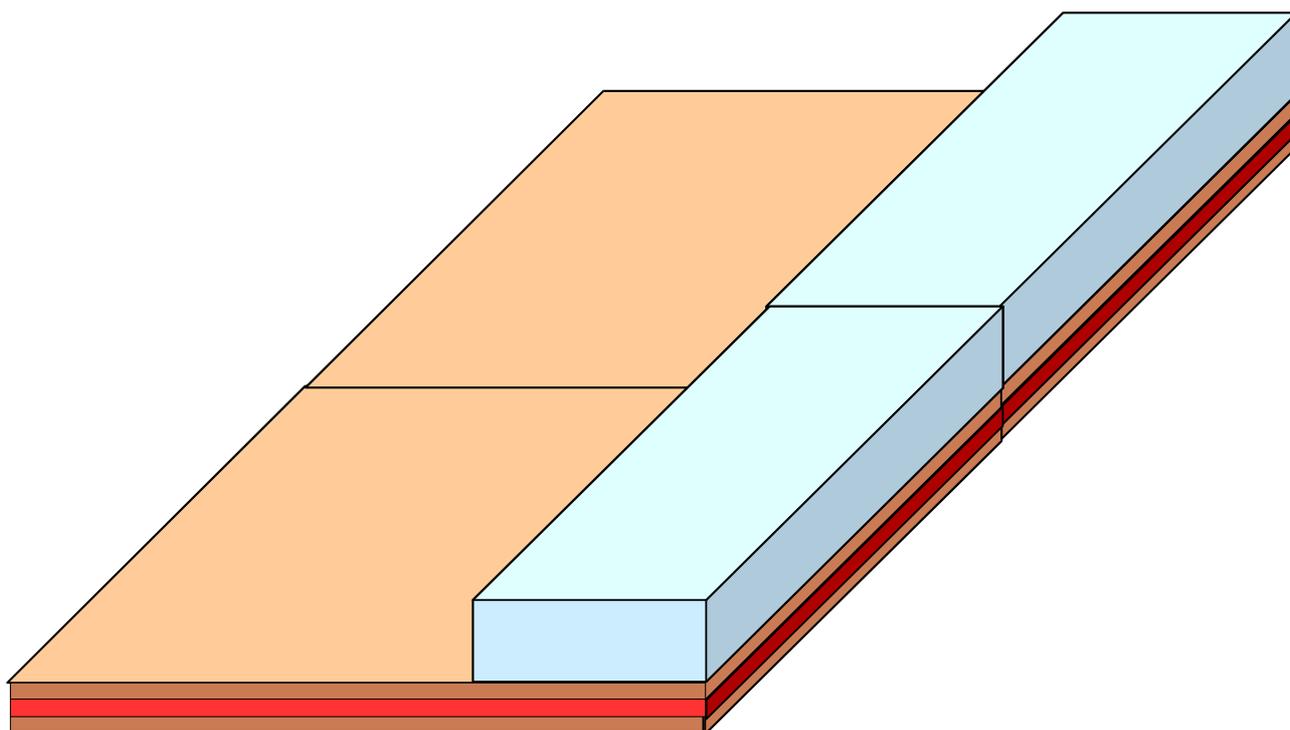


Figure 20. Pose de la **lade**

La partie du porte-vent qui tangente le sommier en enfermant toutes les soupapes à la fois prend le nom de **lade**.

La lade est posée mais nous avons perdu l'accès aux soupapes. Reconnaissons que c'est un petit problème. Il va donc falloir traverser la lade pour relier les soupapes aux vergettes, comme on le voit sur la Figure 20, sans provoquer de fuite de vent grâce au joint étanche réalisée en peau très fine appelée **boursette**.

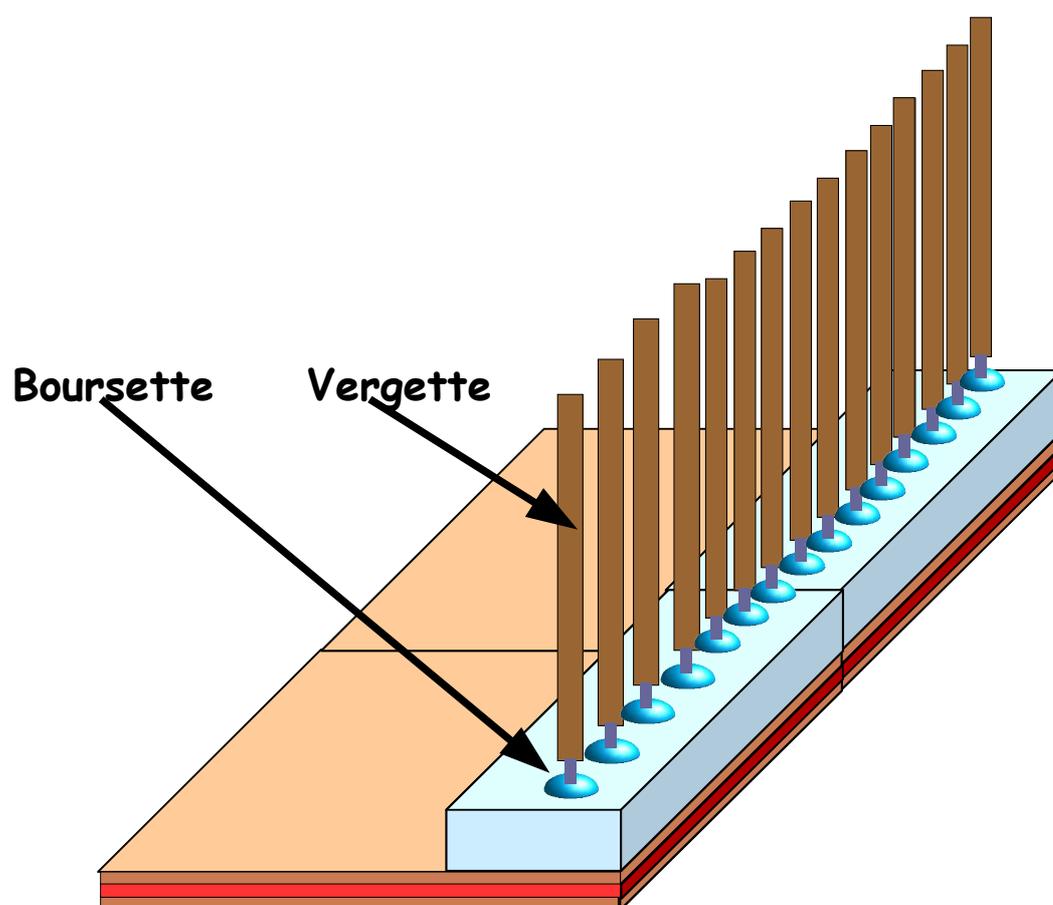


Figure 21. Les **vergettes** traversent la **laye** et sont « accrochées » aux **soupapes** avec une **esse**.

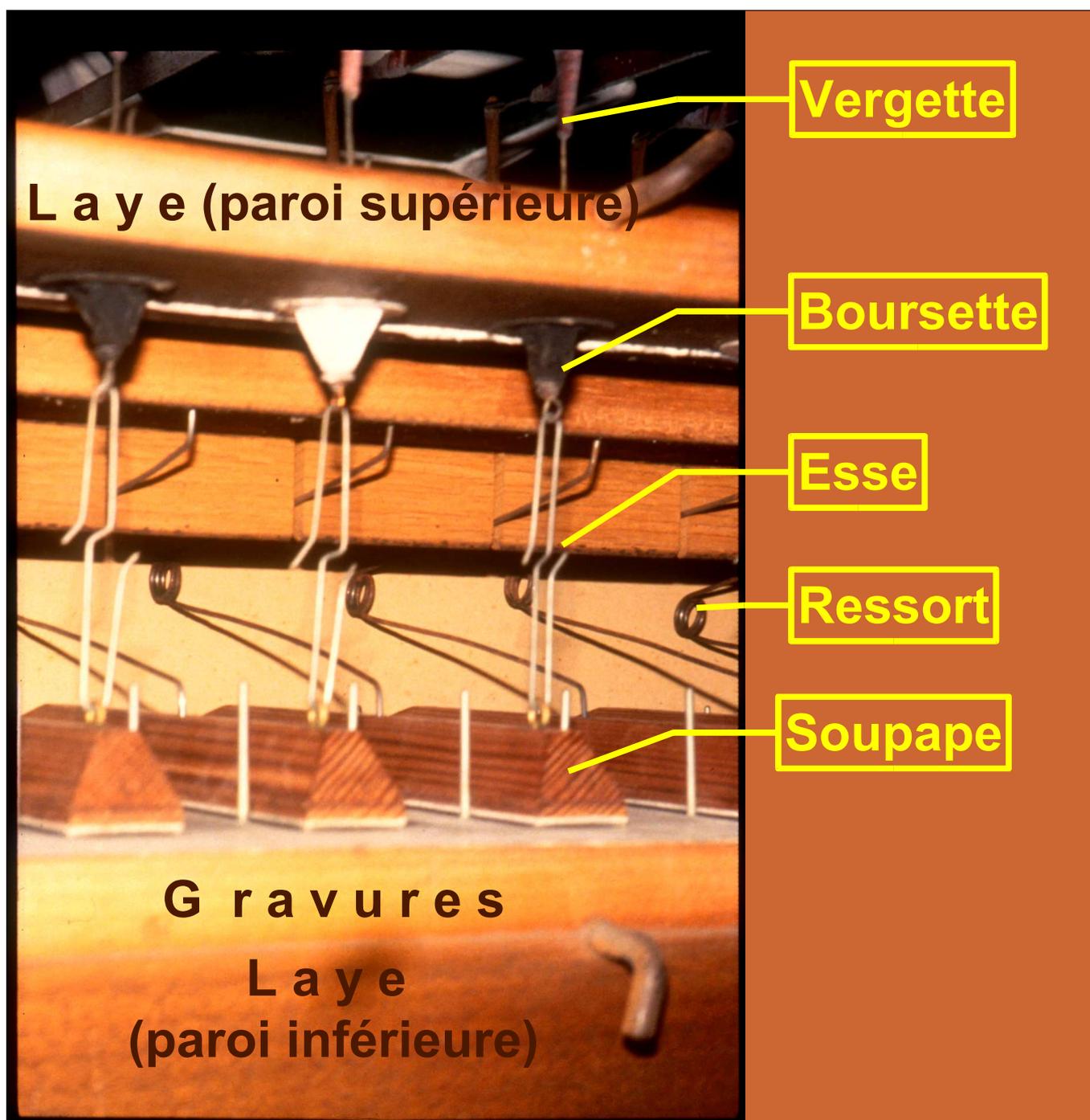


Figure 22. Liaison entre **vergettes** et **soupapes** à l'intérieur de la **laye**.

Figure 22 : par la trappe de visite ménagée dans la laye, nous apercevons la manière dont est réalisée la traversée étanche de la laye. L'angle de vue est le même que celui de la Figure 21. L'extrémité des **vergettes** traverse la **laye** pour venir s'accrocher à la **soupape** à l'aide d'une **esse**. L'étanchéité est assurée par un petit soufflet en peau très fine, appelé **boursette**.

2° étape : perçage des lignes

L'alimentation en air des colonnes étant résolu, nous pouvons entreprendre le perçage des lignes. Pour cette opération nous pouvons choisir soit la face déjà

occupée en partie par la laye soit la face opposée. Sur la Figure 6, au Positif, laye et tuyaux se partagent la face supérieure ; au Grand-orgue, la laye est fixée sur la face inférieure, les tuyaux sont posés sur la face supérieure ; ce n'est qu'une question de simplicité mécanique. Pour changer un peu, nous allons faire le perçage des lignes sur la face opposée à celle de la laye. A cet effet, nous retournons le sommier : Figure 23.

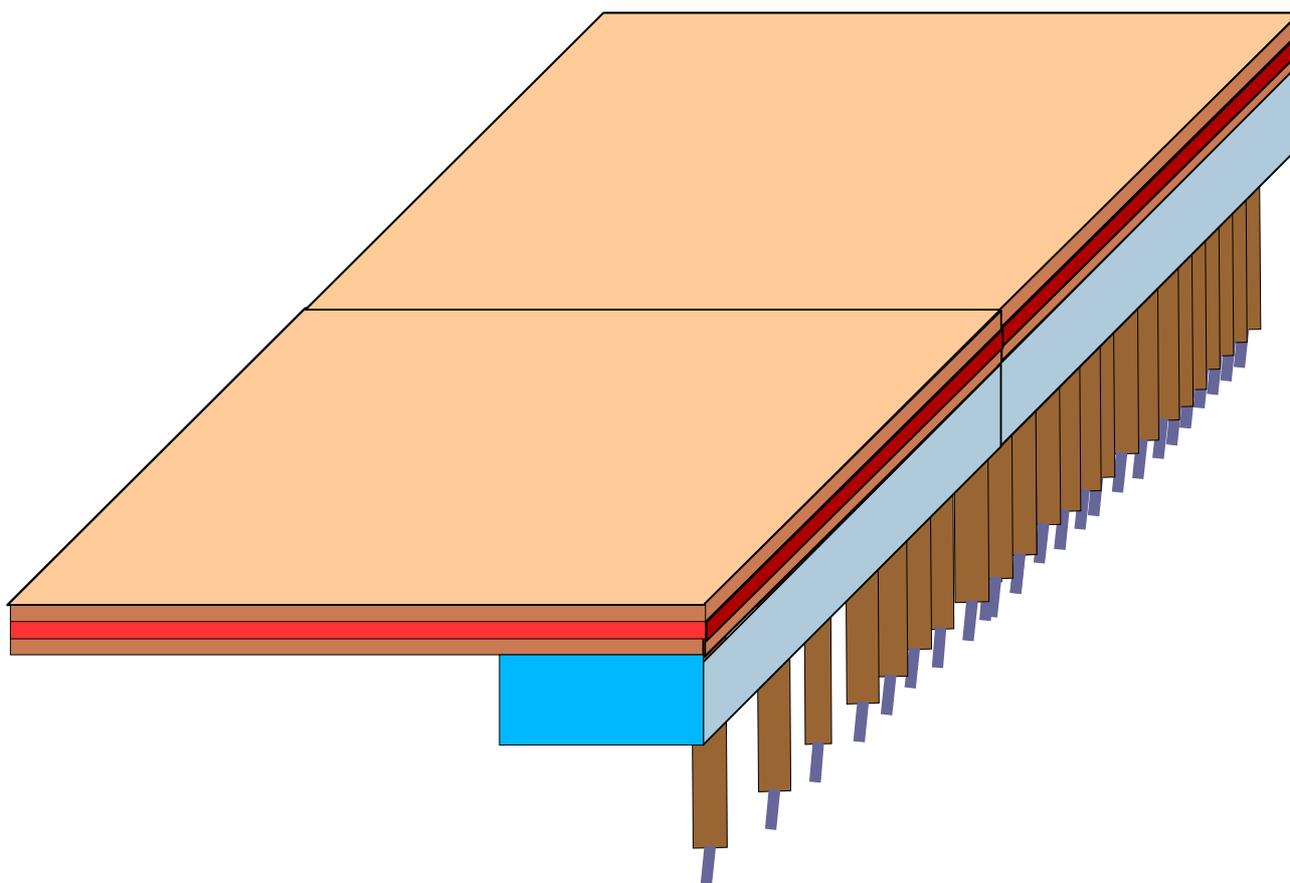


Figure 23. Le Sommier est retourné

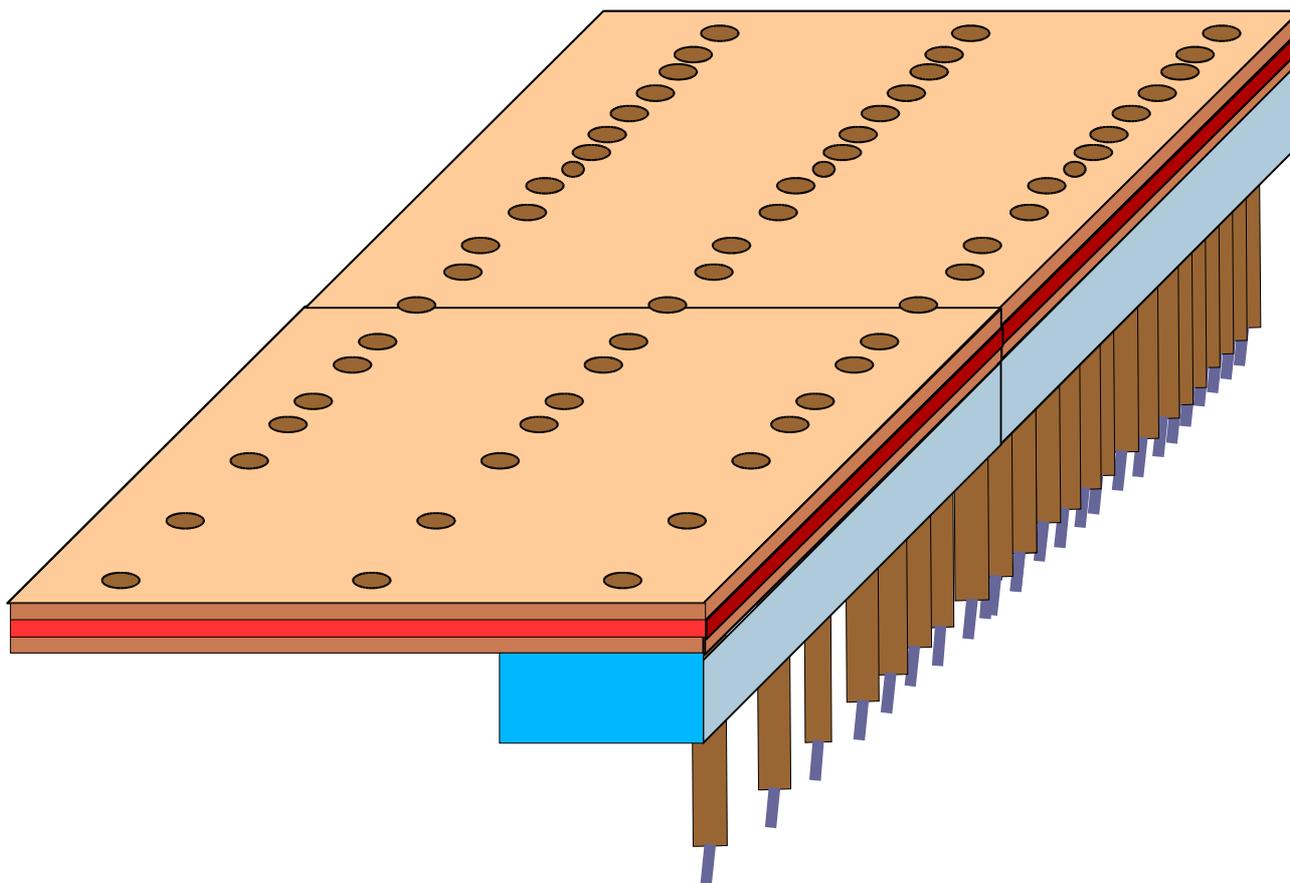


Figure 24. Perçage des lignes

Notre objectif étant de pouvoir installer 3 jeux sur ce sommier. Nous perçons 3 rangées de 60 trous. Pressés d'essayer notre sommier tout neuf, nous posons les 3 jeux de tuyaux : Figure 25.

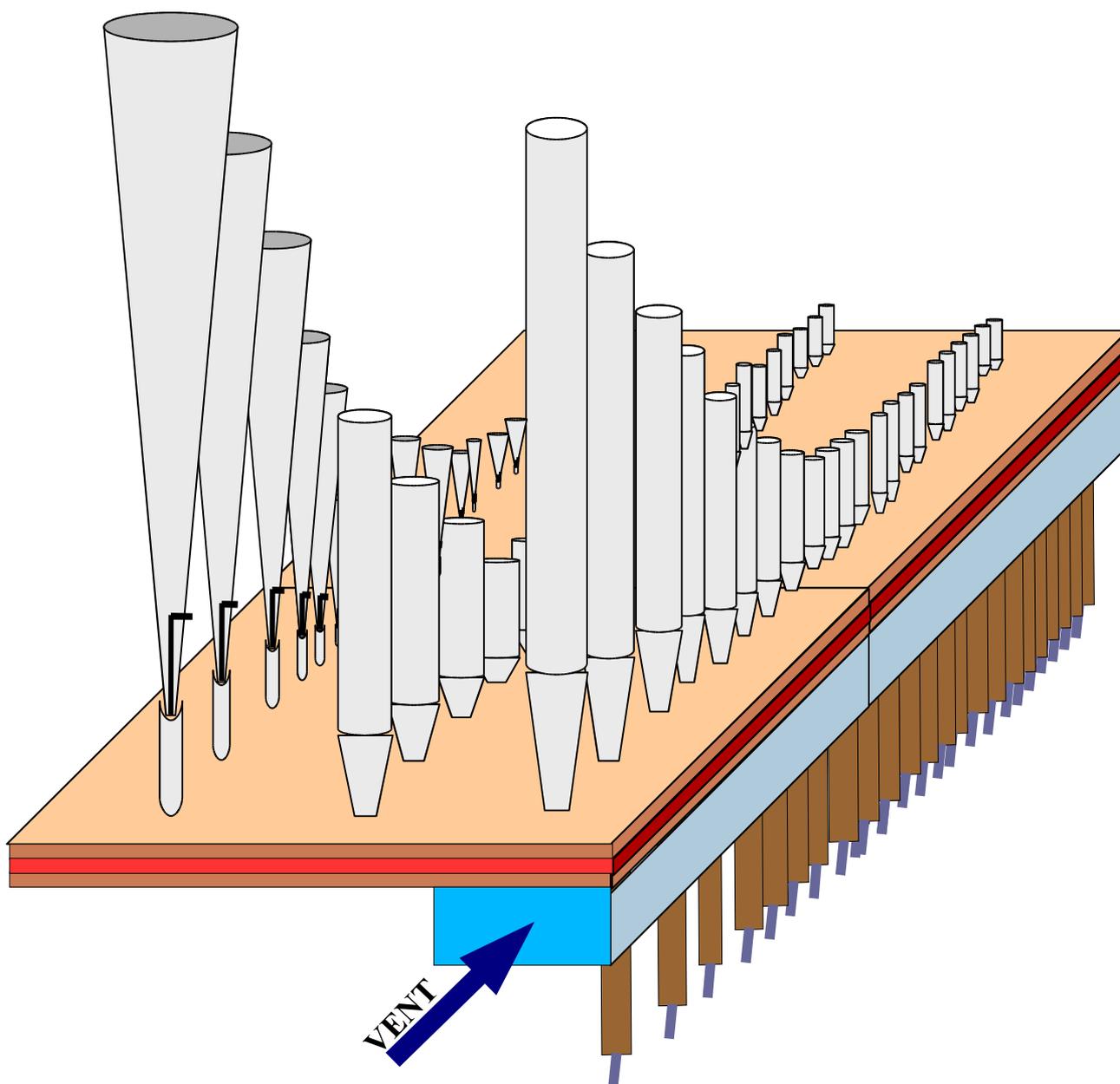


Figure 25. Le sommier avec ses 3 jeux

1. La soufflerie est mise en route ; le vent arrive dans la laye. Il n'y a plus qu'à jouer sur le clavier « Au clair de la lune » pour s'imaginer être Jean-Sébastien Bach! Mais , surprise! Lorsqu'on joue une note, les 3 tuyaux de la colonne parlent en même temps. Ce n'est pas ce que nous voulions : nous voulions pouvoir faire entendre chacun des **jeux** séparément. Il faut donc 3 lignes ; or ici, il n'y a qu'une ligne! Notre précipitation nous fût fatal. Il manque quelque chose! Il manque un étage mécanique entre **gravures** (les colonnes) et tuyaux dont la

fonction sera d'individualiser les lignes. La Fig. 26 montre comment la face supérieure du sommier est dédoublée pour insérer entre ces 2 niveaux, une « planche » assez large pour boucher simultanément les 60 trous d'une ligne. Mais comme cette « planche » est elle-même percée de 60 trous au même écartement que les trous des autres niveaux : un coulissement de la « planche » dans l'axe de la ligne d'une longueur égale au diamètre d'un trou suffira pour faire parler un jeu ou au contraire le rendre muet. Cette « planche » coulissante s'appelle un **registre** ; raison pour laquelle, les mots **registre** et **jeu** sont souvent synonymes en facture d'orgue.

2.

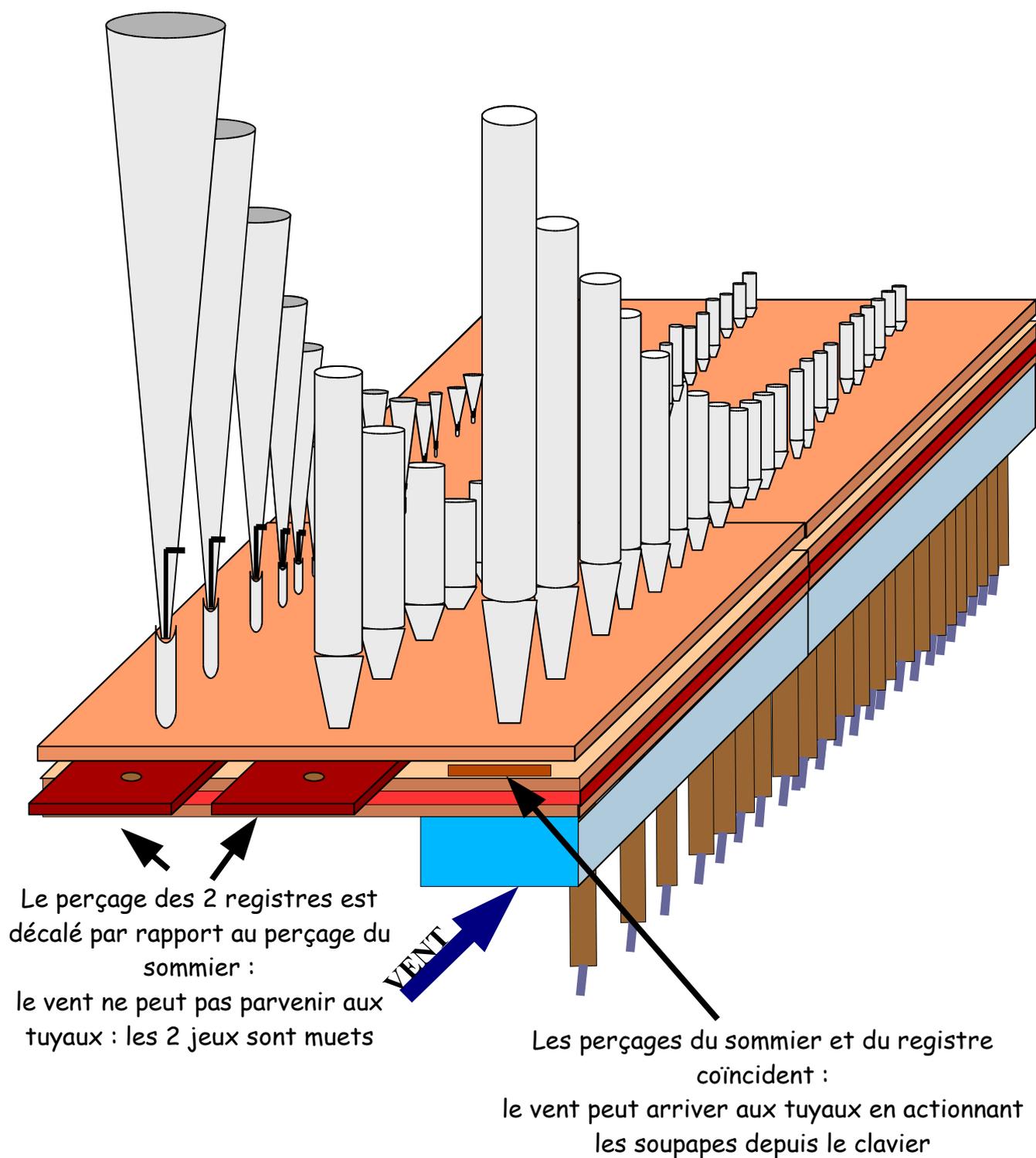


Figure 26. Le registre coulissant



Figure 27. Photographie montrant 2 registres fermés : la couleur orange est déposée sur la face supérieure du registre en bas de l'image .



Figure 28. Le registre en bas de l'image est maintenant ouvert : la couleur orange a disparue et à la place, on aperçoit l'intérieur des gravures.

Vous avez certainement déjà fait le rapprochement entre les registres du sommier et les boutons de registre de la console (Fig. 10). Effectivement, un système mécanique (dans les orgues anciennes) ou électro-mécaniques (dans les orgues modernes) relie chaque registre du sommier à un bouton de registre pour permettre à l'organiste de configurer les timbres des plans sonores sans quitter la console.

Outre la simplification mécanique, l'électricité permet l'emploi de combineurs électroniques dans lesquels sont mémorisées toutes les registrations que l'organiste va utiliser pendant un concert : une simple pression sur un bouton suffira pour passer d'une registration à une autre.

Par contre, la traction purement mécanique des claviers est préférée aux solutions électro-mécaniques. Car dans l'état actuel de la technique, la transmission par tout ou rien du relais fait disparaître les subtilités du toucher de l'organiste expérimenté.

Pour conclure, il est intéressant de préciser que le sommier à gravure existe depuis le 16ème siècle, qu'il est essentiellement réalisé en bois, avec ou sans garnitures d'étanchéité (même entre faces coulissantes). La pression de l'air est un paramètre important déterminant l'esthétique acoustique d'un instrument ; selon les instruments, elle varie entre 50 et 130 mm d'eau.

Les 2 coupes de la Figure 29 montrent les 3 fonctionnalités d'un sommier d'orgue :

- Niveau inférieur : la laye amenant l'air aux soupapes
- Niveau intermédiaire : la grille avec ses gravures (colonnes)
- Niveau supérieur: le registre coulissant (lignes)



La Figure 30 montre les sous-ensembles tuyauterie/sommier/clavier/boutons de registre reliés entre eux et formant un ensemble fonctionnel.

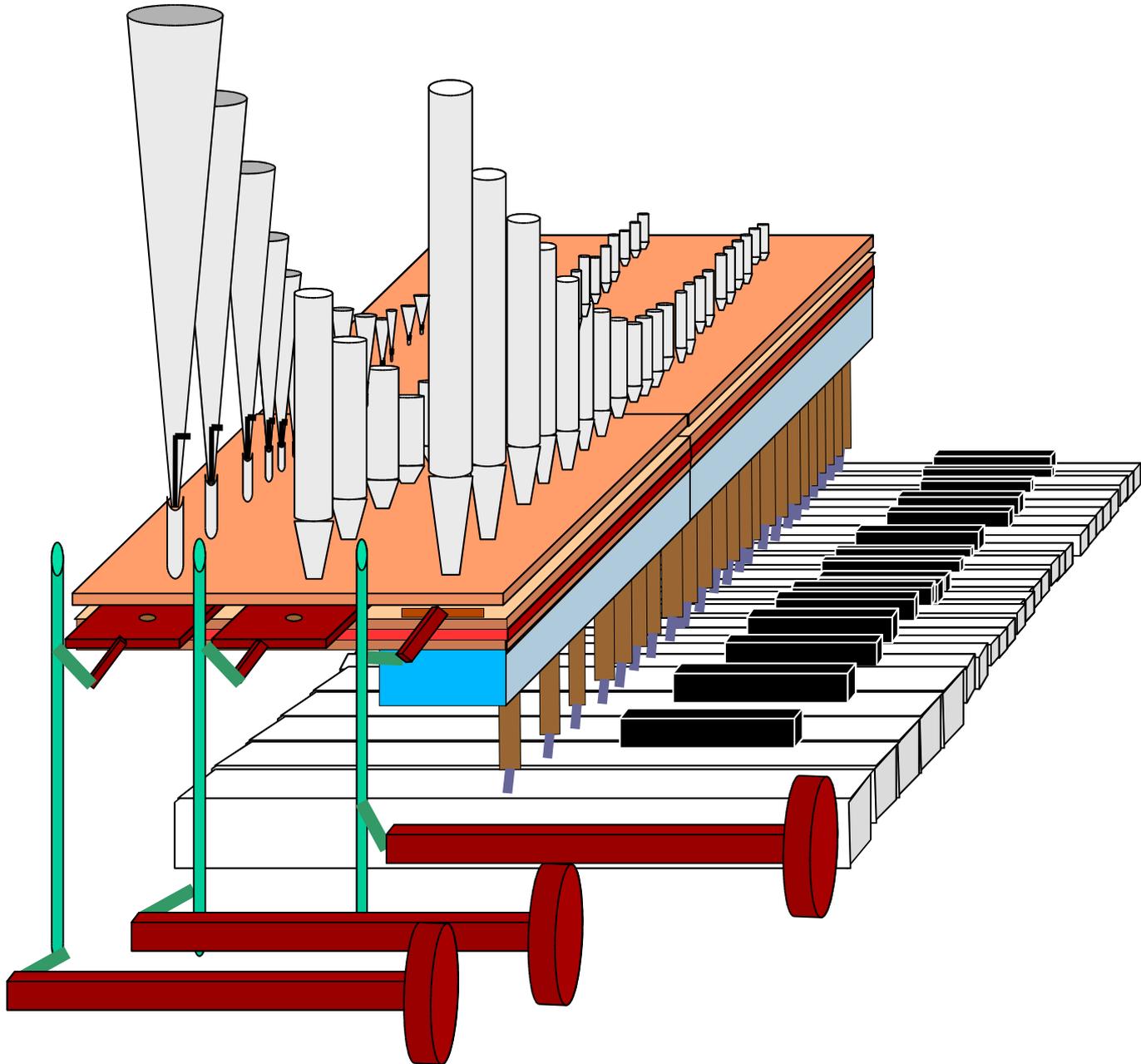


FIGURE 30 : L'orgue de 3 jeux est terminé ; un jeu est préparé.

## Dispositions des tuyaux sur le sommier

Il y a plusieurs manières de ranger les 60 tuyaux d'un jeu sur un registre du sommier. La figure 31 montre la manière la plus simple. Les tuyaux sont rangés dans l'ordre des notes du clavier. L'histogramme est calculé pour un jeu dont la hauteur des notes correspondent aux notes d'un clavier de piano (LA3 à 440 Hertz). Cette disposition est appelée « chromatique » : par demi-ton de la note la plus grave vers la note la plus aiguë. La conception de l'abrégé est simple : il devra simplement modifier l'écartement des vergettes qui viennent du sommier pour le ramener à l'écartement des touches du clavier.

La disposition « chromatique » convient par sa simplicité, aux petits instruments. Mais dès que l'orgue prend en importance des problèmes apparaissent :

- dans la disposition « chromatique », tous les sons graves de tous les jeux viennent d'un même côté et les sons aigus de l'autre. Dans un édifice assez grand pour qu'on puisse localiser une source sonore, l'effet résultant risque d'être désagréable pour les auditeurs. Pour éviter la lourdeur acoustique qui en résulterait et les possibles interférences, les tuyaux sont répartis de la façon suivante :
- de plus, toute la charge des gros tuyaux pèse sur la même partie du sommier ce qui entraîne une conception mécanique plus compliquée.

On préférera donc la disposition de la figure 32 dans la quelle les tuyaux sont répartis alternativement entre la gauche et la droite et de l'extérieur vers l'intérieur. Cette disposition particulière s'appelle **diatonique** ; chaque tuyau est distant de son voisin d'un ton.

Sur la figure 15, on observe déjà la disposition diatonique des tuyaux de la façade du positif<sup>15</sup>. A part les 5 tuyaux au centre de la grande façade disposés en « mitre épiscopale », on observe la même disposition diatonique au grand-orgue.

<sup>15</sup> Puisqu'ils sont apparents, les tuyaux de façade sont appelés « montre ». Par extension, le jeu auquel ses tuyaux appartiennent, s'appelle « Montre ». C'est en général un jeu de principal.

Figure 32. disposition des tuyaux sur un sommier chromatique

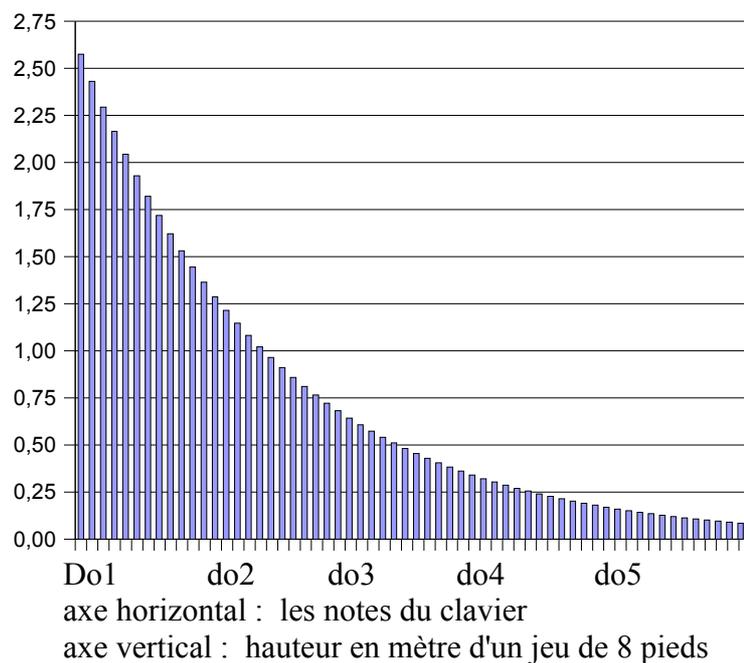
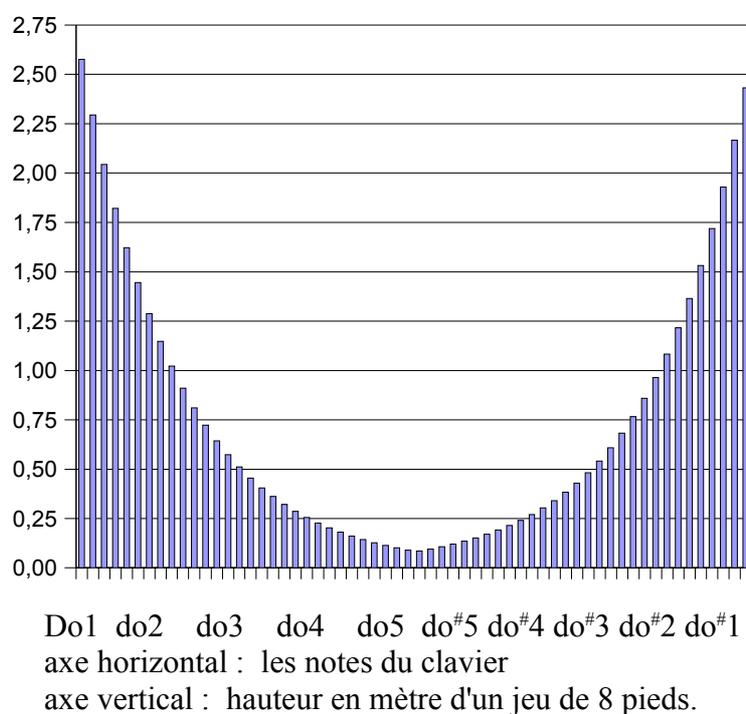


Figure 33. disposition des tuyaux sur un sommier diatonique

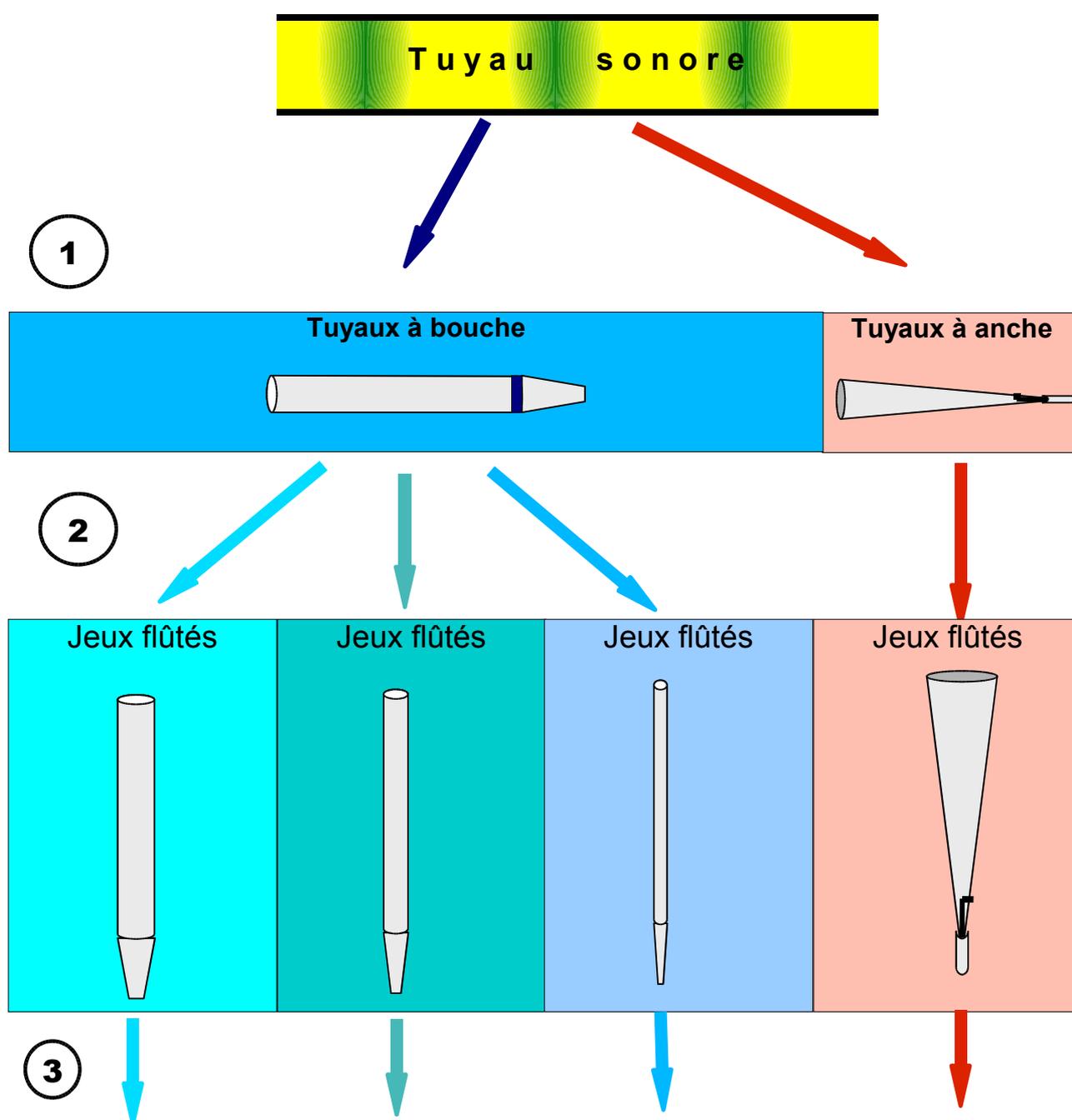


### **III - Acoustique des tuyaux sonores**

Attentifs à la remarque de ceux qui nous ont fait part de leur étonnement en découvrant que cette grandiose oeuvre d'art s'était développée à partir du principe somme toute assez rudimentaire du tuyau sonore, nous avons décidé de faire un bref rappel de physique puis de présenter l'univers sonore de l'orgue en parcourant successivement 3 axes de développement du principe de base (Figure 31) :

FIGURE 31 - Les 3 niveaux de développement des tuyaux sonores

- ① -les 2 types de tuyau : tuyau à bouche et tuyau à anche
- ② -le développement par la forme
- ③ -le développement en série harmonique.



### Rappels sur le principe du tuyau sonore<sup>16</sup>

On considère un tuyau cylindrique de longueur  $L$  et de section  $S$ , fermé à ses deux extrémités. Une déformation produite au sein de l'air du tuyau se propage dans les deux directions, se réfléchit aux deux extrémités, et produit ainsi une série d'ondes parcourant le tube dans deux directions. Ces ondes doivent être périodiques et satisfaire les conditions aux limites : déplacements nuls aux extrémités du tube. Cela conduit à la condition :  $\sin kl = 0$  et les fréquences possibles sont :

$$f = n.c/2L$$

où  $n$  est un entier et  $c$  la vitesse du son ( $340 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ )

La fréquence fondamentale est  $f_1 = c/2L$ . Les fréquences supérieures appelées harmoniques sont des multiples de la fréquence fondamentale. Dans le cas d'un tuyau cylindrique ouvert aux deux extrémités, on observe le même ensemble de fréquences propres bien que les conditions aux limites soient différentes. On peut admettre que la pression acoustique est nulle aux extrémités car le tuyau est ouvert à l'air environnant. Pour un tuyau fermé à un bout et ouvert à l'autre, les conditions aux limites donnent pour les fréquences propres :  $f_i = (n + 1/2) c/2L$ . En fait, par suite de l'effet de bord de l'extrémité ouverte, il faut remplacer la longueur réelle par une longueur corrigée qui dépend de la géométrie du tuyau. Pour un mode propre de vibration d'un tuyau ouvert aux deux extrémités, il existe des positions, pour lesquelles  $\cos n\pi x/l = 0$  qui correspondent à un déplacement nul des particules, appelées les **nœuds**. Les points de déplacement maximal sont les **ventres**. Un nœud de déplacement correspond à un ventre de pression acoustique et réciproquement. La distance entre deux nœuds ou deux ventres successifs est égale à une demi-longueur d'onde.

---

<sup>16</sup> la source de ce paragraphe provient du site <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/meca/tuyau.html> ; sur la même page, une intéressante applet Javas montre la résonance d'un tuyau à bouche.

## Typologie des tuyaux acoustiques

### Axe n°1 : les 2 types de tuyaux

La simple écoute de quelques jeux de l'orgue de St Pierre St Paul, nous a permis d'observer qu'il n'y avait que 2 types de tuyaux sonores<sup>17</sup> :

- les tuyaux qui émettent des sons flûtés,
- les tuyaux qui sonnent comme des trompettes.

Les sons flûtés sont produits par des tuyaux tout à fait analogues aux flûtes à bec. La bouche du tuyau ressemble à un sifflet prolongé par un résonateur cylindrique ou parallélépipédique.

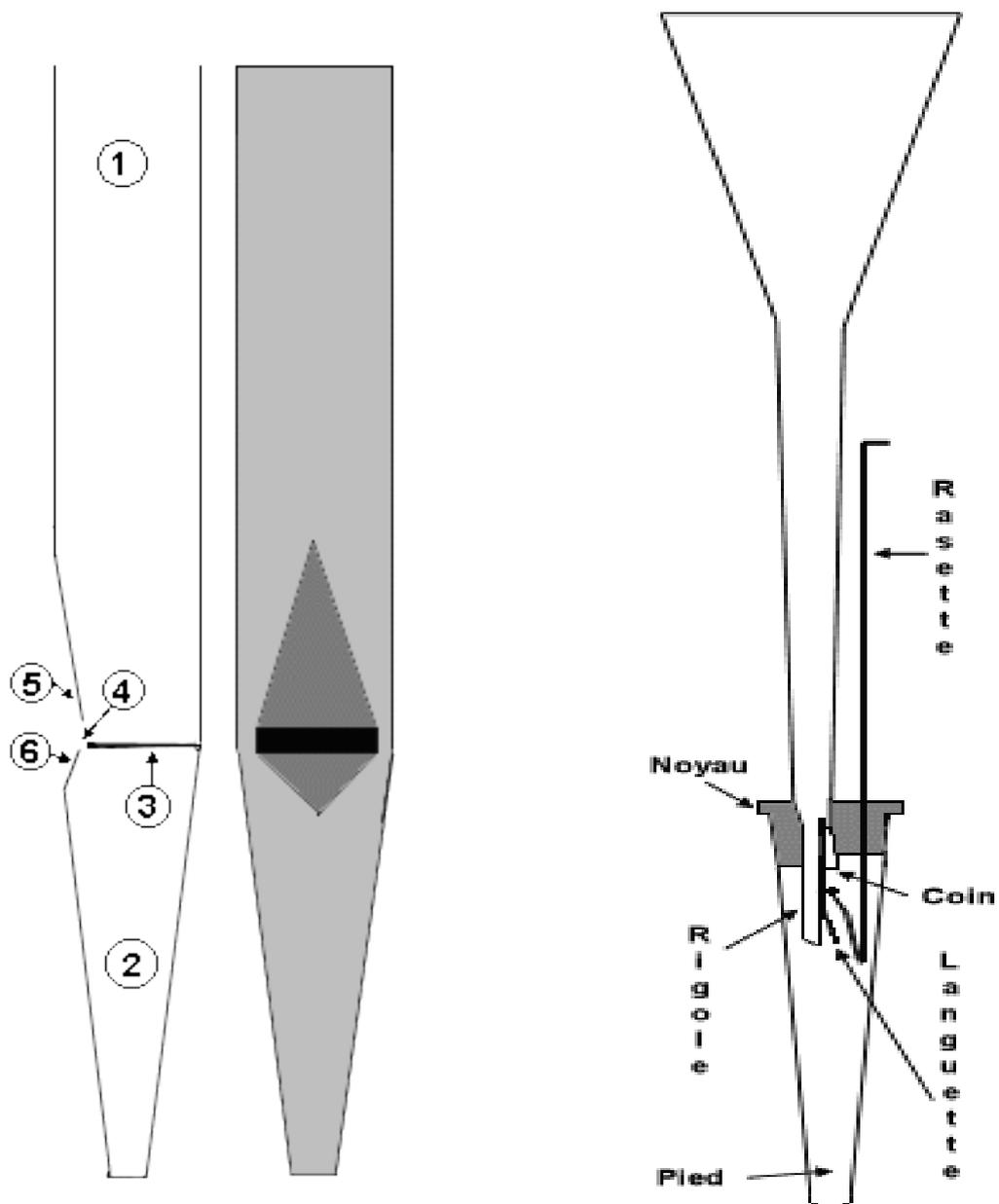
Dans le tuyau à bouche aucune partie n'est mobile, alors que dans le second type de tuyau, le vent provoque la vibration d'une fine languette métallique, appelée **anche**, le corps du tuyau servant à amplifier cette vibration : ce sont les tuyaux à anches. La feuille de chiendent qu'enfants, nous pincions entre nos petits pouces<sup>18</sup> pour faire un sifflet, est une languette d'anche. L'harmonica, l'accordéon ou le hautbois sont d'autres exemples de jeux d'anche.

La Figure 32 présente une coupe d'un tuyau à bouche et d'un tuyau à anche. Les tuyaux sont réalisés en alliage d'étain et de plomb. Le rapport du mélange varie en fonction du timbre souhaité, le plomb ayant tendance à adoucir le timbre du son (moins d'harmoniques). Le bois (chêne, épinette, sapin) entre dans la construction de nombreux tuyaux surtout les plus gros du type flûté. Le zinc et le cuivre sont aussi utilisés.

---

<sup>17</sup> Si vous le souhaitez, vous pouvez refaire la manipe en allant sur le site de l'orgue de la chapelle royale de Versailles : <http://www.culture.gouv.fr/culture/orgues/jeux/jeux.html>.

<sup>18</sup> Ce sont de très petits pouces.



1. Corps
2. Pied
3. Biseau

4. Lumière
5. Lèvre supérieure
6. Lèvre inférieure

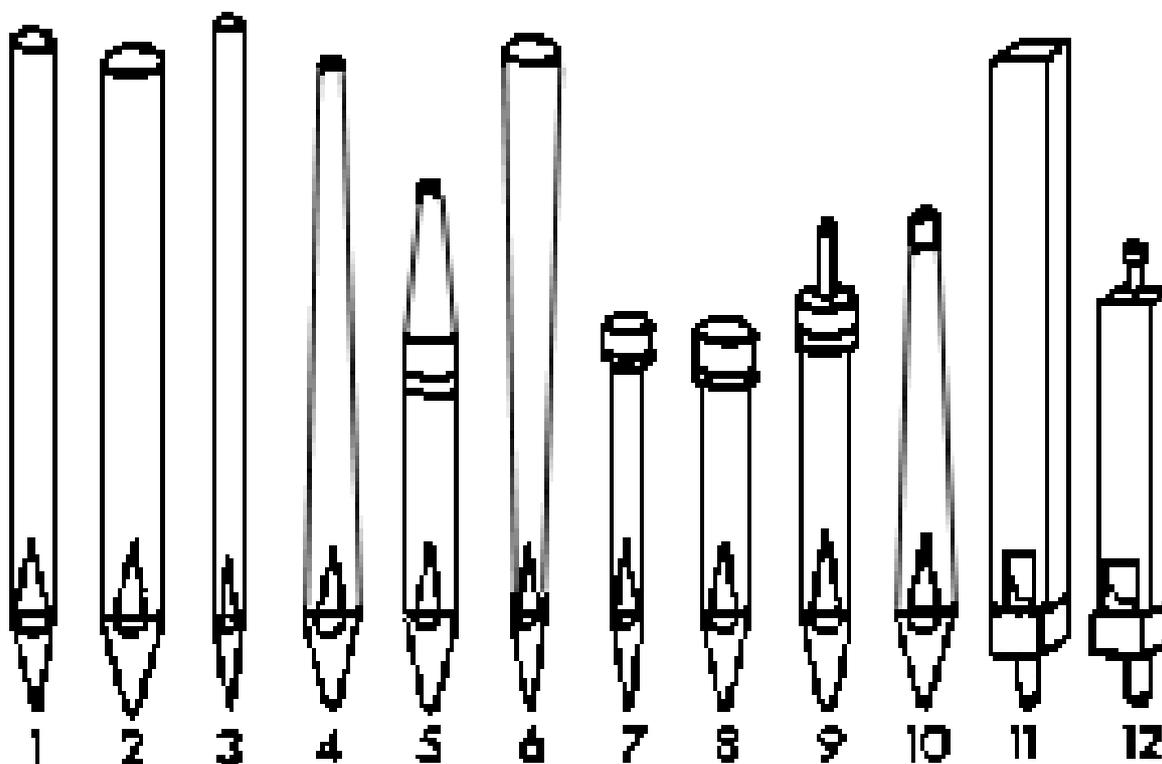
Figure 32. Coupe d'un tuyau à bouche et d'un tuyau à anche.

### Axe n°2 : le développement par la forme du résonateur.

Rappelons que dans la résonance naturelle, il n'y a pas une fréquence mais une série de fréquences : la série harmonique. Ainsi dans le spectre de résonance d'un tuyau, déterminé par la longueur du tuyau, il existe, en plus du mode fondamental, des modes secondaires dont l'amplitude dépend des réflexions sur les parois et donc, de la forme du tuyau. Les facteurs d'orgue ont utilisé cet état de fait pour chercher à obtenir des timbres intéressants sur le plan musical. Les Figures 31 et 32 montrent le fruit de cette recherche pour les 2 types de tuyau.

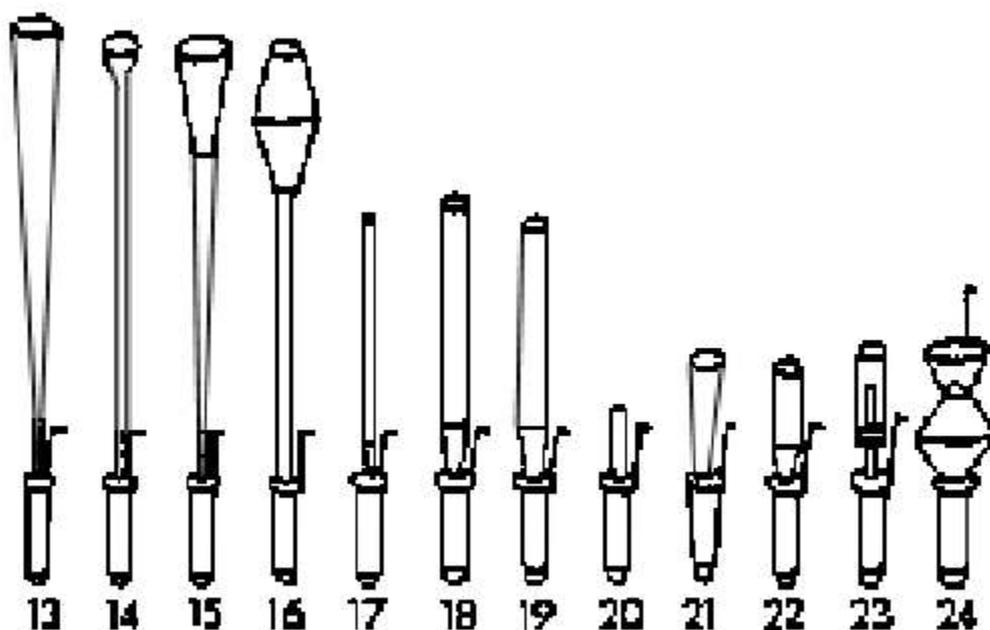
Figure 33. Différentes formes de tuyaux à bouche et leur nom le plus courant.

- |                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| 1. Principal      | 7. Quintaton         |
| 2. Flûte          | 8. Bourdon           |
| 3. Gambe          | 9. Flûte à cheminée  |
| 4. Flûte à fuseau | 10. Bourdon conique  |
| 5. Flûte conique  | 11. Principal (bois) |
| 6. Flûte creuse   | 12. Bourdon (bois)   |



A propos des tuyaux à bouche, retenons que :

- La longueur du tuyau détermine la hauteur du son
- Le diamètre, la forme, le matériau et la hauteur de la bouche déterminent le timbre. Par exemple : à hauteur égale, le rapport harmoniques/fondamental s'enrichit lorsque le diamètre du tuyau diminue. D'où les 3 familles suivantes:
  - Gros diamètre : les flûtes aux sonorités très douces et pauvres en harmoniques. Cette famille se décline en sous-familles car selon que le tuyau est bouché ou ouvert, conique, à fuseau ou à cheminée, on obtient une différence de timbre bien reconnaissable.
  - Diamètre moyen : les **principaux**, plus riches en harmoniques,
  - Petit diamètre : les gorges, très riches en harmoniques proches de la sonorité du violon.
- L'épaisseur et la largeur de la bouche déterminent l'intensité du son.



13. Trompette	19. Musette
14. Chalumeau	20. Régale (Geigenregal)
15. Hautbois	21. Régale (Trompetenregal)
16. Cor anglais	22. Voix humaine
17. Cromorne	23. Ranquette
18. Douçaine	24. Régale (Bärpfeife)

Figure 34. Différentes formes de tuyaux à anche et leur nom le plus courant.

A propos des tuyaux à anche, retenons que :

- Le diamètre, la forme et la hauteur du corps du tuyau déterminent le timbre.
- la longueur de la languette détermine la hauteur du son. La **rasette** glisse dans le noyau du tuyau pour régler la longueur vibrante de la languette. Elle sert à accorder le tuyau.

Nous pouvons maintenant trier les 42 jeux de l'orgue de St Pierre St Paul en les répartissant par plan sonore, type et famille : Figure 35.

FIGURE 35 : Composition du Grand-Orgue E. MULLER - 1958 - 42 jeux.  
Eglise Saint Pierre Saint Paul de Lille

tuyaux à bouche						tuyaux à anche	
jeux flûtés		principaux		gambes			
<b>récit</b>							
bourdon	16	principal	4	dulciane	8	bombarde	16
cor de nuit	8	fourniture	IV rangs	voix céleste	8	trompette	8
flûte conique	8					clairon	4
nasard	2 2/3						
quarte de nasard	2						
tierce	1 3/5						
<b>positif</b>							
bourdon	8	principal	8			cromorne	8,0
flûte	4	prestant	4				
nasard	2 2/3	doublette	2				
tierce	1 3/5	cymbale	II rangs				
larigot	1 1/3						
<b>grand orgue</b>							
flûte	8	montre	16			trompette	8
bourdon	8	montre	8			clairon	4
flûte	4	prestant	4				
		doublette	2				
		plein jeu	IV rangs				
<b>pédale</b>							
flûte	16					bombarde	16
soubasse	16					trompette	8
bourdon	8					clairon	4
flûte	8						
flûte	4						

– **Axe n°3 : le développement en série harmonique.**

L'objectif général de cet axe de développement est d'augmenter la puissance sonore de l'orgue pour l'adapter au volume des grands édifices. L'idée immédiate qui vient à l'esprit est de dupliquer une série de tuyaux autant de fois que nécessaire. Expérimentalement, cette solution ne marche pas car l'édifice fonctionne lui-même comme volume de résonance : les grandes longueurs d'onde sont renforcées par rapport aux courtes longueurs d'onde . Dans une église, la voix d'une personne située à moins d'une dizaine de mètres de distance est inaudible : les sons aigus disparaissent immédiatement, par contre le brouhaha des sons graves n'en finit pas de s'amortir.

Il faut donc avoir recours à un amplificateur-égaliseur comme disent nos ingénieurs du son. Mais au Moyen-Age, les facteurs n'avaient que du bois et des tuyaux pour fabriquer leur amplificateur-égaliseur! Peu à peu au cours cet Age qui n'était pas si sombre qu'on le dit, lorsqu'ils voulaient augmenter la puissance d'un jeu (d'une sonorité), les facteurs d'orgue ajoutaient un second jeu de même sonorité mais, au lieu d'être à l'unisson du premier, il sonnait à l'octave! Une fois l'idée lancée, il n'y a pas de raison de s'arrêter ; ajoutons un troisième accordée sur le second octave, puis un quatrième encore une octave au-dessus et ainsi de suite...jusqu'à ce que les sons soient trop strident et douloureux pour nos oreilles! La seule règle importante à respecter pour que l'ensemble reste consonant, est de ne renforcer que les harmoniques de la série naturelle. Dans ce cas, pourquoi ne renforcer que les harmoniques pairs, on peut essayer de renforcer les harmoniques impairs également. Et en définitive, les limites de ce développement technique s'imposeront d'elles-mêmes par le jugement artistique des musiciens concernés.

Pour ne pas se perdre, le long de ce nouvel axe de développement, il nous faut une échelle de mesure. On pourrait désigner les jeux créés le long de cet axe par leur rang dans la série harmonique. C'est une première indication : Quinte, Tierce ou Doublette. Ces jeux sonnent respectivement à la quinte, à la tierce et à l'octave d'un fondamental ; mais lequel ? La précision n'est pas suffisante! Il nous faut donc une échelle numérique! L'échelle la plus pratique - même si, cela va vous paraître étrange au début - est de préciser pour chaque jeu, la hauteur (exprimée en pieds<sup>19</sup>) de son tuyau le plus haut : le tuyau qui sonne en appuyant la première touche à gauche du clavier. Comme sur la Fig. 35, ce nombre est marqué sur tous les boutons de registre de la console. Le tableau ci-dessous indique la correspondance entre le rang de l'harmonique et la hauteur de ce premier tuyau :

<sup>19</sup> Un pied vaut sensiblement 33 centimètres.

Figure 36. Tableau de correspondance entre rang harmonique et hauteur d'un tuyau.

<i>Rang harmonique</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Hauteur (pieds)	8	4	2 2/3	2	1 3/5	1

Pour fixer les idées, la hauteur qui correspond aux fréquences du piano, est 8 pieds (8'). Les sons d'un jeu de 4' sonneront un octave plus haut que ceux du 8' ; un jeu de 2', deux octaves au-dessus du 8'. Un 16' sonnera à l'octave grave d'un 8'.

Exemple. Lorsqu'on ajoute un Principal 4' à un Principal 8', le 4' renforce le second harmonique du 8'. On peut ajouter un 3ème jeu de 2' qui renforcera le 4ème harmonique du 8', etc. On développe ainsi la **synthèse des Principaux**.

Autre exemple. Une Flûte 8' et une Flûte 2' 2/3. Le second jeu renforcera le 3ème harmonique du 8' : une quinte au-dessus du 4'. On peut continuer ainsi à développer la **synthèse des flûtes**.

Vous disposez maintenant de tous les éléments pour déchiffrer exhaustivement le tableau des jeux de notre orgue en Figure 35. Précisons quand même que les rangées de petits tuyaux qui servent à faire scintiller le fondamental, n'ont pas individuellement d'intérêt musical. Le facteur d'orgue trouve là une occasion de simplifier la mécanique : un seul tirant de jeu appelle plusieurs rangs de tuyaux à la fois. Dans ce cas, on signale par un chiffre romain sur le bouton du registre, le nombre de rangs de tuyaux qui parlent simultanément.

Dans les grands instruments, les jeux de 8 pieds sont renforcés avec un ou plusieurs sous-octaves en 16', voire des sous-sous-octaves en 32'!

L'orgue de St Pierre St Paul est doté de 6 jeux de 16 pieds. Les tuyaux de la façade appartiennent à un Principal de 16 pieds appelé Montre 16'. Les tuyaux de la façade du Positif appartiennent au Principal 8'.

Quelles familles de jeux enrichit-on de cette manière?

On enrichit de cette manière les jeux les moins riches en harmoniques. Prenons comme exemple le Récit de l'orgue de St Pierre St Paul, la synthèse harmonique des jeux flûtés est formée des jeux suivants :

Synthèse flûtée du Récit	
bourdon	16
cor de nuit	8
flûte conique	8
nasard	2 2/3
quarte de nasard	2
tierce	1 3/5

L'examen de la Figure 35 vous donnera les autres synthèses existantes de cet instrument. Précisons toutefois que :

- les synthèses ne sont pas forcément complètes. Par suite d'économie, il peut être nécessaire de compléter la synthèse flûtée en ayant recours à un Principal ; exemple au Positif où la Doublette 2' complète la série des Flûtes. La synthèse flûtée s'appelle **Jeu de Tierce** ou **Cornet**.
- les Gambes déjà très riches en harmoniques n'ont nullement besoin d'être déclinées en série harmonique.
- de même, les jeux d'anche, très riches par eux-mêmes en harmoniques impairs ne seront déclinés qu'en octave grave et octave aigu. La synthèse des jeux d'anche du clavier grand-orgue constitue à l'époque baroque la registration de **Grand Jeu** et sur le positif de **Petit Jeu**.

### **Synthèse des Principaux : le Plein-Jeu**

Le Plein-Jeu est la sonorité la plus connue de l'orgue : il suffit de penser aux grands Préludes et Fugues de J.S. Bach pour que cette sonorité brillante nous revienne en mémoire. Pour obtenir ce timbre, les est tellement indissociable de l'orgue qu'il nous faut en préciser la composition.

D'après le Figure 35, la synthèse des Principaux du clavier de Grand-Orgue est formée des jeux suivants :

Montre	16
Montre	8
Prestant	4
Doublette	2
Plein Jeu <sup>20</sup>	IV rangs

Le Plein-jeu, c'est surtout un problème d'oreille. C'est pourquoi, nous proposons la manip suivante :

<sup>20</sup>Nous prions à nouveau, nos lecteurs de bien vouloir nous excuser pour le double emploi du mot Plein-Jeu.

### **MANIP : Orgue virtuel doté de 6 jeux de Principaux (Figures 37-1/7).**

La figure 37-1 représente la console virtuelle avec ses 6 jeux. Mais, sur le pupitre, à la place de la partition de musique, il y aura un histogramme dont l'axe des X est formé par la suite discrète des 60 notes du clavier, repérées par la notation anglo-saxonne<sup>21</sup>. Quant à l'axe des Y, il est gradué pour mémoire en fréquence pour sécuriser les physiciens mais sans intérêt du point de vue musical puisque les lois de l'harmonie musicale concernent les rapports entre les notes - les fameux intervalles - et non de la valeur absolue de leur hauteur ; notre écoute se fait essentiellement relative<sup>22</sup>. D'un point de vue musical, il est plus commode de graduer cet axe en pied sachant que la hauteur d'un tuyau est inversement proportionnel à sa fréquence de résonance. Ainsi le jeu de 16' dont la hauteur du tuyau de la note DO1, est de 16', n'en fera plus que 8' sur le DO2, 4' sur le Do3, etc...

Les boutons de registre ont 2 états. Un clic sur le bouton permet de passer d'un état à l'autre :

- en grisé: le jeu est « repoussé » (i.e. muet)
- en clair : le jeu est « tiré » (i.e. actif)

En cliquant sur l'un des 6 jeux, le diagramme des hauteurs apparaît à l'écran (ne soyons pas trop puristes : remplaçons les 60 micro-marches par une droite). Un échantillon sonore permet d'écouter l'effet sonore obtenu. Il est possible de cliquer sur plusieurs jeux à la fois pour observer la montée progressive vers le Plein-Jeu (6 jeux tirés).

<sup>21</sup> Do ré mi fa sol la si  
C D E F G A B

<sup>22</sup> Ne pas voir l'oreille absolue n'est pas un handicap pour mélomane.

4096 1/8'

2048 1/4'

1024 1/2'

512 1'

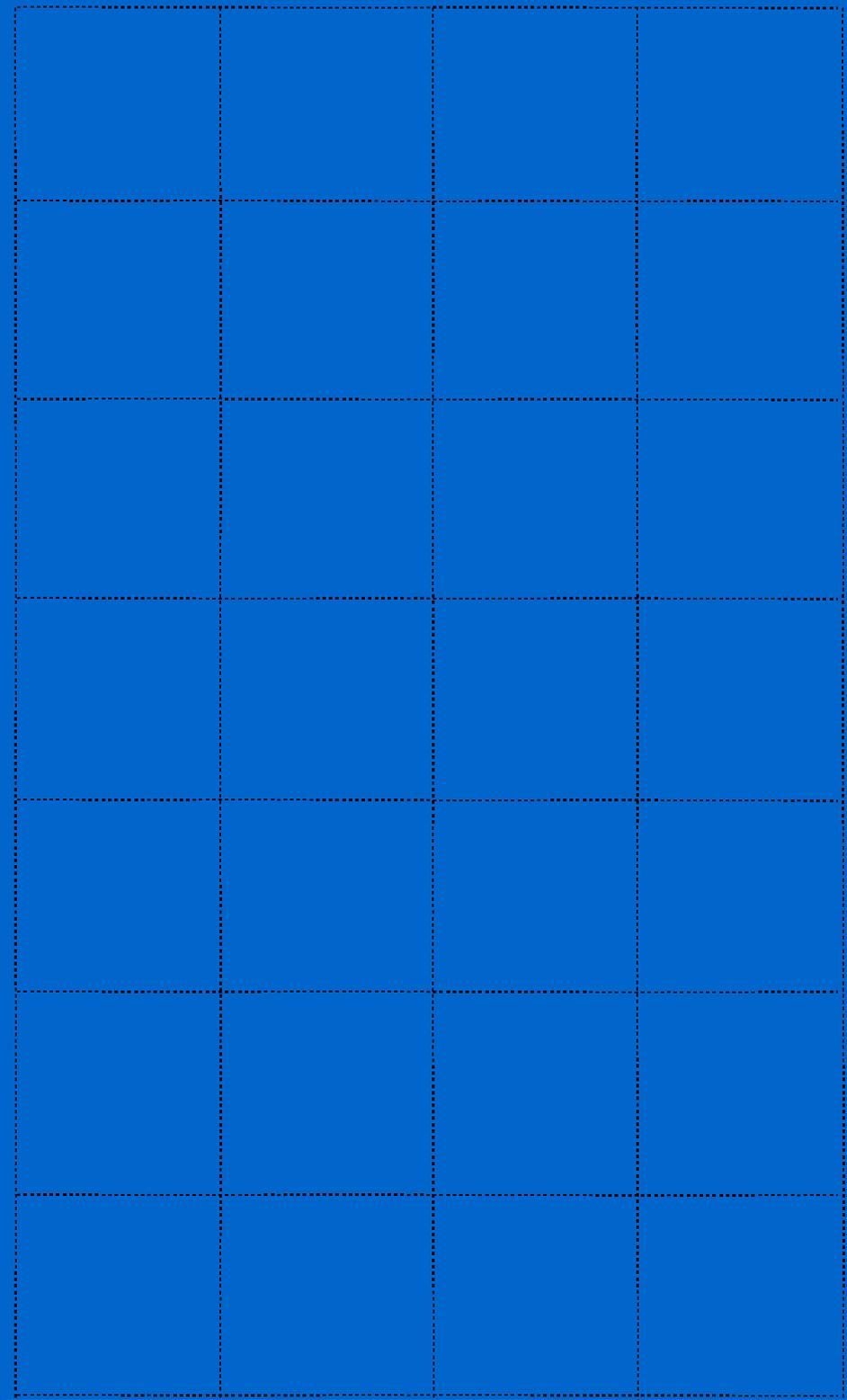
256 2'

128 4'

64 8'

32 16'

( Hz ) (pieds)  
Fréquence



Principal  
16'

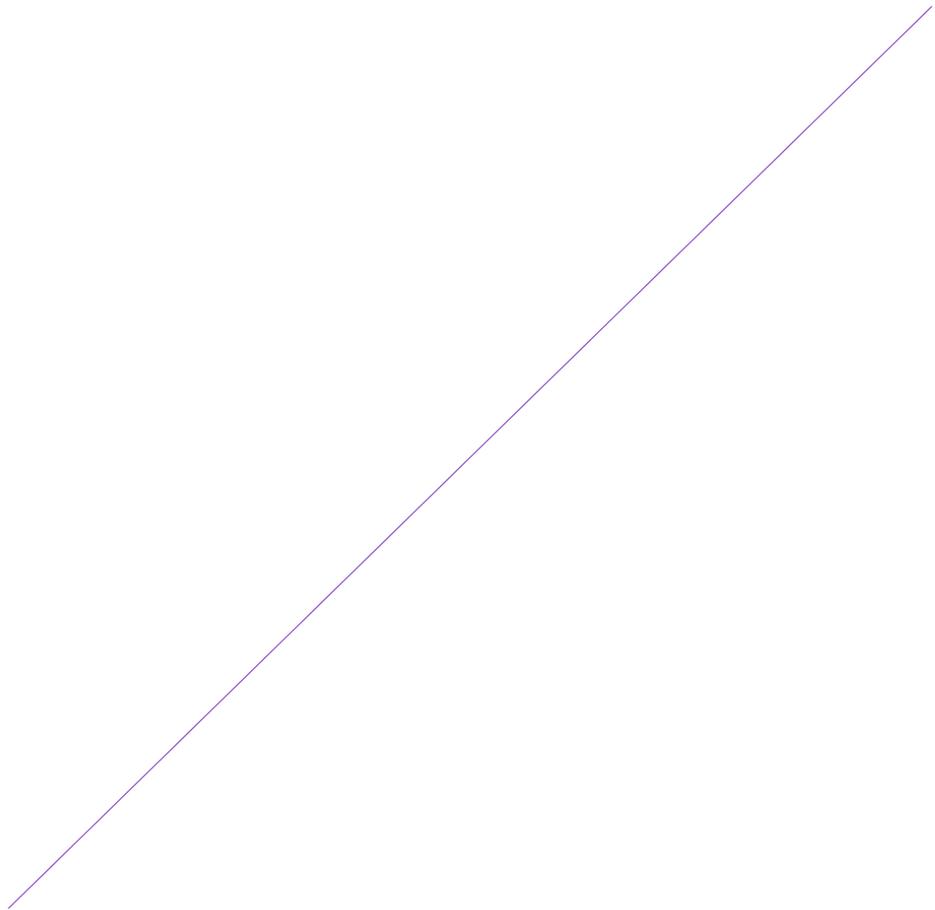
Principal  
8'

Prestant  
4'

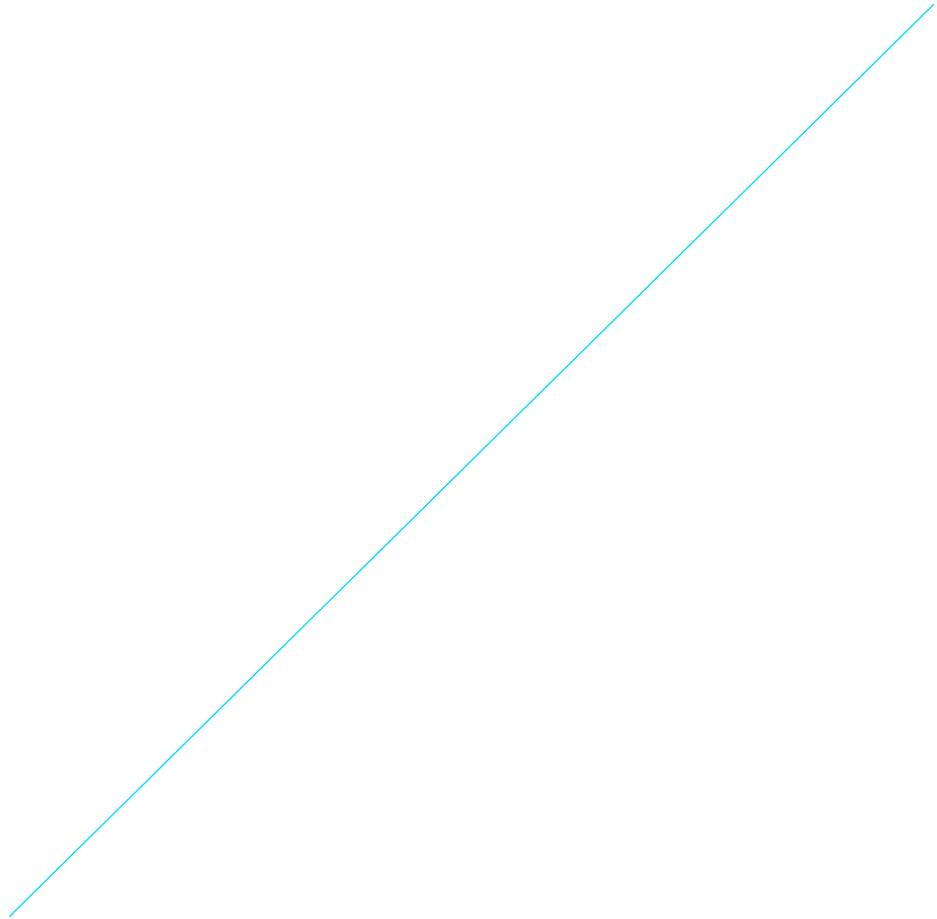
Doublette  
2'

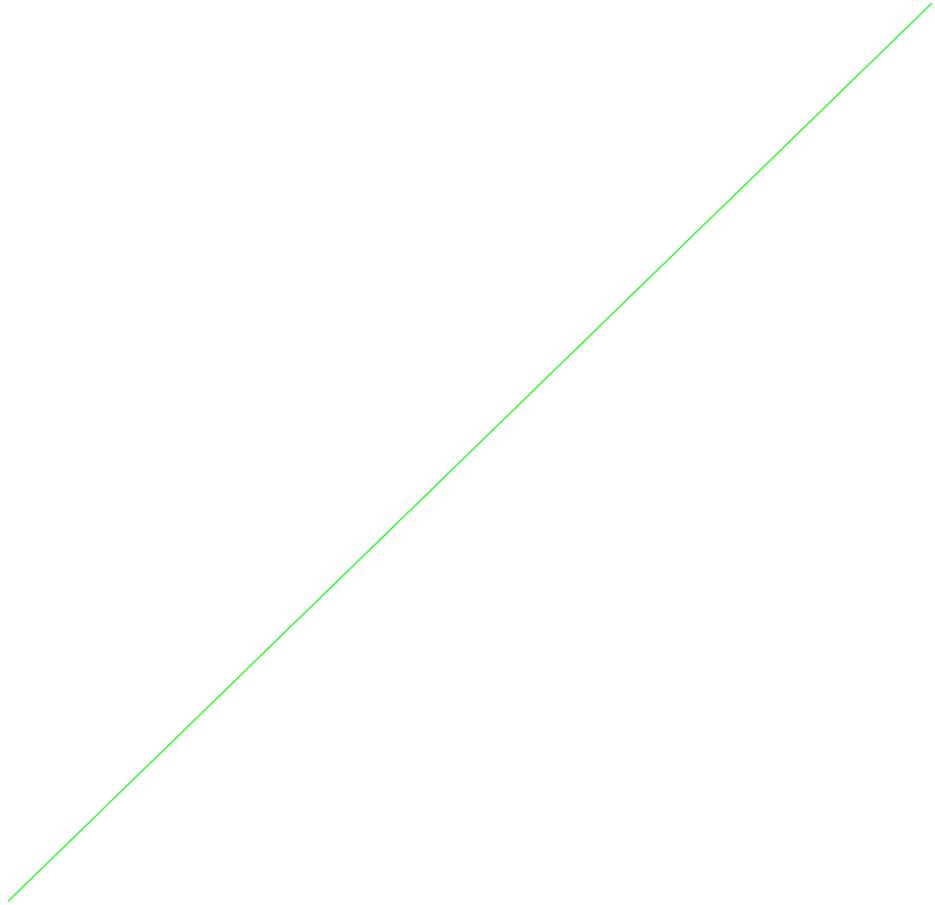
Fourniture  
II rgs

Cymbale  
II rgs

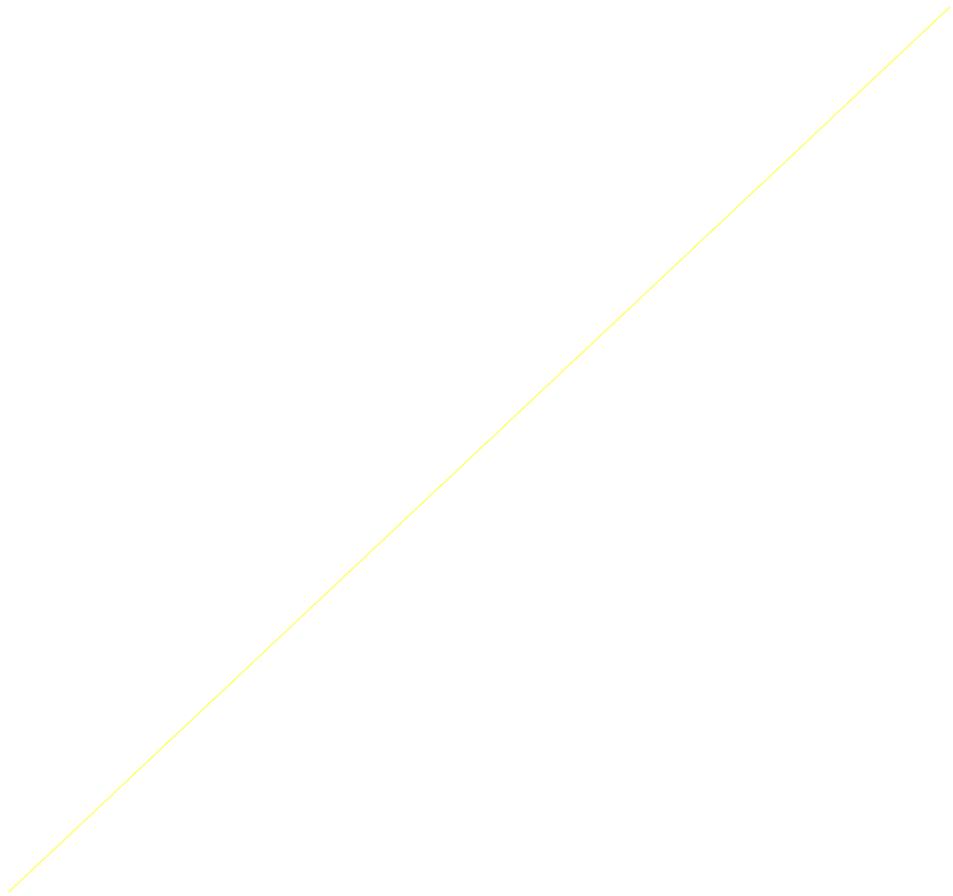


Principal  
16'

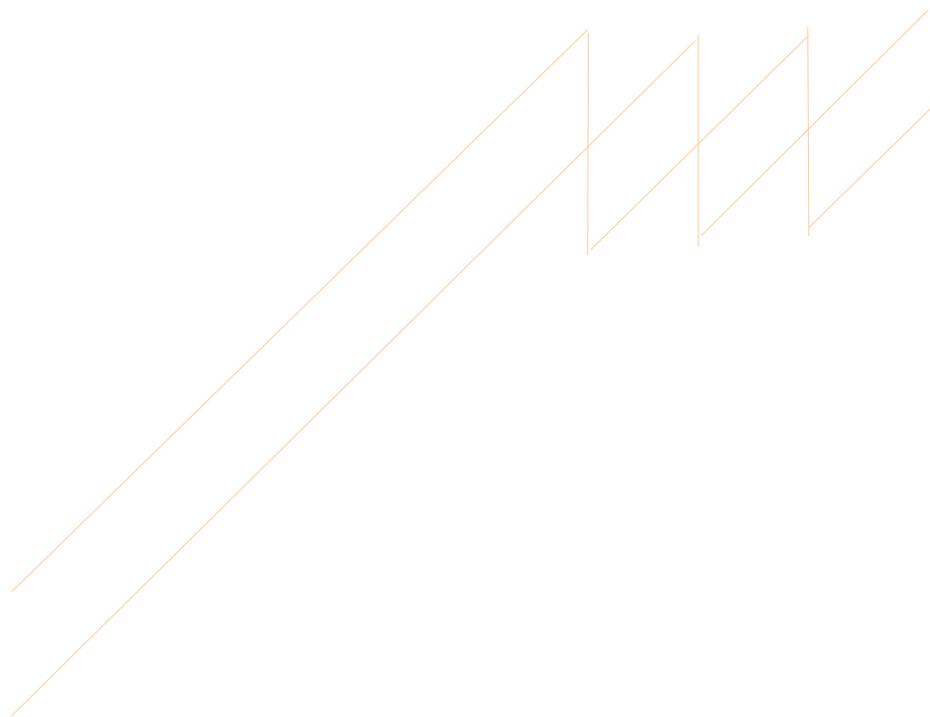


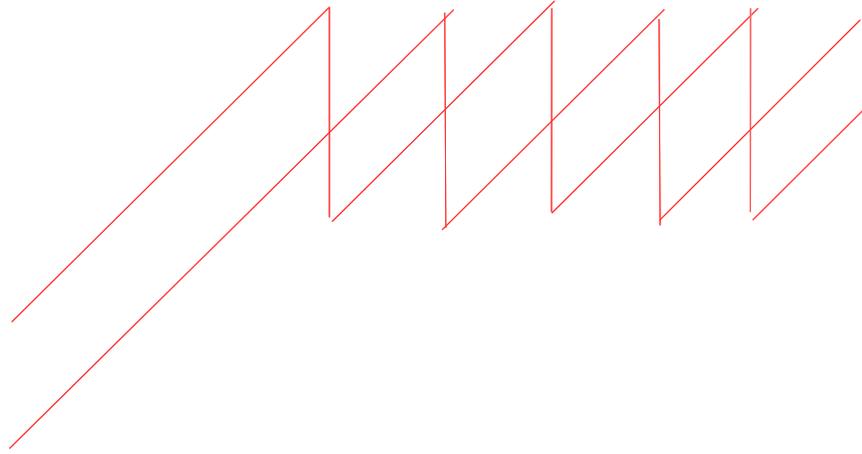


Prestant  
4'



Doublette  
2'





### Écoutons les 4 Principaux : 16', 8', 4' et 2'.

Les graves sont sombres et confus ; le médium est généreux et moins confus ; les aigus sont bien nets. D'une polyphonie à 4 voix jouée avec cette registration, on n'entendra clairement la voix supérieure (soprano) ; l'alto sera encore audible ; par contre, les voix de ténor et de basse vont se fondre dans un brouhaha amplifié par les réverbérations des sons graves sur les murs de l'église. Pour permettre aux 4 voix de la polyphonie de se faire entendre, il faut obtenir un timbre plus clair, plus riche en harmoniques aigus. A cet effet, la solution la plus simple consiste à compléter la série harmonique 16' + 8' + 4' + 2' par des rangs de 1',  $\frac{1}{2}$ ', etc!... Cette solution éclaire effectivement les graves mais malheureusement le résultat est désastreux dans les aigus : les aigus sont trop aigus, stridents et douloureux à l'oreille. Le plafond sonore à ne pas dépasser est le 1/8'. Sur la touche C5, cela fait un petit sifflet d'environ 4 millimètres dont le son est déjà assez désagréable (> 4000 Hz) mais qui, mélangé aux autres, donne du brillant sans être douloureux à l'oreille.

La solution : « la reprise d'octave ».

En cliquant sur le registre **Fourniture**, on voit apparaître la composition de ce jeu. Notre but étant d'expliquer le principe des **jeux à reprises**, cet exemple n'a que 2 rangs de tuyaux. En réalité, une Fourniture peut avoir 5 ou 6 rangs. Le jeu à reprise permet d'éclaircir les octaves graves sans dépasser le plafond de 1/8' :

- Dessinons ce plafond du 1/8' et ajoutons les rangs de 1', 1/3' (quinte du 1'),
- Lorsqu'un rang bute sur le plafond du 1/8', il redescend à l'octave inférieur. S'il bute à nouveau sur le plafond, on le fera redescendre à nouveau d'un octave et ainsi de suite jusqu'à la dernière note du rang. On appelle cette technique « faire une reprise d'octave ». Ces rangs à reprise sont évidemment inutilisables seuls (raison supplémentaire pour les réunir sur un même registre) mais ajoutés à la série des principaux, la sonorité obtenue est claire, brillante sur toute l'étendue du clavier.
- La reprise d'octave permet d'avoir des rangs complets de tuyaux sur toute l'étendue du clavier. La puissance sonore sera donc constante du grave à l'aigu. Le rang de quinte évite d'avoir des reprises d'octave uniquement sur les DO. Ainsi les reprises sont difficilement détectables à l'oreille.

Le registre de **Cymbale** est un prolongement du jeu de **Fourniture** et procédant du même principe. La distinction entre Fourniture et Cymbale concerne les grands instruments dans lesquels chacun peut avoir 5 rangs. Mais lorsque le nombre de rangs de plein-jeu n'est au total que de quelques rangs (< 5 rangs), ces rangs sont regroupés sur un unique registre appelé Plein-jeu (exemple : le plein-jeu du clavier

de grand-orgue de St Pierre St Paul). En fonction de certains détails de leur composition, ces jeux à rangs multiples s'appellent **Plein-jeu, Fourniture, Cymbale, Mutations, Carillon, etc.**

Retenons :

Le Plein-jeu d'un orgue est formé de la synthèse des principaux 16' + 8' + 4' + 2' + Fourniture + Cymbale

**CODA (sed non da capo) :**

Historiquement, le développement de l'orgue n'a pas suivi aussi logiquement et rationnellement les axes présentés ci-dessus. En réalité, l'orgue actuel est le résultat d'un compromis entre contraintes techniques et exigences esthétiques imposées par les différentes cultures auxquelles il a dû faire face pour survivre à plus de 2000 ans d'histoire. Considérés comme symboles du pouvoir religieux, un certain nombre d'orgues en France ont échappé à la destruction grâce à la présence d'esprit de leur organiste titulaire qui, en jouant *La Marseillaise*, ont montré leur utilité dans la célébration du culte révolutionnaire. Peine perdue pour certains : les églises ayant été utilisées pour stocker le salpêtre nécessaire à la fabrication de la poudre à canon, la précieuse tuyauterie sera complètement détruite, rongée par la « lèpre de l'étain ».

A XIX<sup>ème</sup> siècle, les riches provinces françaises (essentiellement au nord de la Loire) ont sacrifié les tuyauteries baroques qui avaient survécu à la Révolution pour les remplacer par des tuyauteries plus aptes à dépeindre la mélancolie romantique.

Certes en 2000 ans d'histoire, une diffusion à travers tous les continents, construit pour des volumes allant d'un petit salon de musique aux cirques romains en passant par la cathédrale ou la salle de concert, l'orgue est le plus polymorphe des instruments de musique. Bien que le nom d'orgue, attaché à un principe technique, soit donné à toute cette variété d'instruments, reconnaissons que leurs palettes sonores n'ont guère de points communs.

Qu'on lui reproche ou qu'on l'en loue, c'est grâce à son talent de « caméléon culturel », fruit des talents conjugués de l'artisan-physicien et de l'artiste, que l'orgue reste encore en ce XXI<sup>ème</sup> siècle, un mode d'expression culturelle dans le domaine religieux et profane : citons pour exemple, Saint-Saens, Poulenc, Messiaen car la liste des compositeurs qui, à travers le monde, composent actuellement des oeuvres pour l'orgue, est trop longue.

Un philosophe a dit que les êtres sans avenir n'existent déjà plus. L'orgue n'a rien à craindre. Des musiciens et des chercheurs du Cnrs y ont pensé : ce sera peut-être l'orgue « à feu »!<sup>23</sup>

<sup>23</sup> L'orgue à feu. Michel Moglia et Pierre Joulain, Laboratoire de Combustion et de Détonique, Poitiers (*J. du CNRS n°83, novembre 1996*).



### Remerciements :

- les décors sont de : l'Eglise St Pierre St Paul à Lille
  - nous remercions très chaleureusement le Père Bruno MARY, curé et P.R. Deshays, titulaire de l'orgue pour leur accueil.
  - l'orthographe est de M.F. Lecloarec, A.M. Mangin et C. Thomassin
  - la mise en onde est de V. Zehnlé
  - les manips interactives ont été développées par .....(à suivre)
  - Nous remercions également MM. D. Hennequin et A. Jégou pour leur précieux concours à la mise en place de la logistique.
- 
-

## Mouvement III : Concert d'Orgue

Louis Nicolas Clérambault. 1676 - 1749	Grand Plein Jeu Duo
Louis Marchand 1669 - 1732	Tierce en Taille Récit de Trompette
Jacques Boyvin 1649 - 1706	Dialogue sur le Cromorne et le Jeu de Tierce
Gilles Jullien 1650 - 1703	Quatuor Récit de Cornet
Pierre Du Mage 1674 - 1751	Grand Jeu
Louis Lefébure-Wély 1817 - 1870	Andante, 'Chœur de Voix-Humaines' Marche en mi mineur
Charles Marie Widor 1845 - 1937	Scherzo ( <i>extrait de la Symphonie IV pour orgue</i> )
Jean Sébastien Bach 1685 - 1750	Sonate en Trio n° 4 : Andante, Adagio e dolce, Vivace
<i>Pour Danielle,</i> Olivier Messiaen 1908 - 1992	Le Banquet Céleste Transport de Joie d'une âme devant la Gloire du Christ qui est la sienne

---

---

## A propos des oeuvres :

Le but du concert est de faire le lien entre ce que nous venons d'apprendre sur l'univers sonore de l'orgue et la littérature écrite pour cet instrument. Le moyen le plus simple pour établir ce lien est de commencer par la littérature baroque française. En effet, les organistes-compositeurs composent pour des registrations-types mentionnées dans le titre. L'interprète n'a donc qu'à s'y conformer ; exemple : « récit de trompette » ou « plein-jeu », etc. De plus, les « registrations-types » ne doivent rien au hasard ou au génie d'un organiste « à la mode ». Elles sont issues du principe de la série harmonique qui nous a servi à classer rationnellement les registres de l'orgue par famille : synthèse des principaux, synthèse des flûtes, synthèse des anches, etc. Et comble du tout, les orgues construites en France à l'époque baroque sont conçues d'après ce même principe. En fonction de la taille de l'église et des ressources locales, les différentes synthèses seront plus ou moins complètes mais le principe sera le même. Est-ce un témoignage de la logique chère au siècle des Lumières ou l'emprise du centralisme royal, toujours est-il que quelque soit la province de France dans laquelle le voyageur se rend, il entendra le même univers sonore. C'est un fait unique en Europe ; les italiens, les allemands ou les espagnols ne précisent jamais leurs registrations.

Sonate de J.S. Bach mise à part, le programme propose une promenade chronologique dans l'école française d'orgue du XVIIème au XXème siècle.

Ainsi « **Grand Plein-jeu** » indique clairement à l'interprète qu'il doit registrer le Plein-jeu du grand-orgue, le Plein-jeu du positif, le Plein-jeu de Pédale (s'il existe) et accouplé les 3 claviers ensemble.

De même, lorsqu'on sait que le titre « **Duo** » est la version abrégée de « Duo sur les jeux de Tierce ». On sait qu'on va entendre un duo entre le Jeu de Tierce du grand-orgue et le Jeu de Tierce du positif! De plus, l'organiste sait que le Jeu de Tierce est le nom donné à la synthèse des sons flûtés : c'est-à-dire les Flûtes  $8 + 4 + 2 \frac{2}{3} + 2 + 1 \frac{3}{5}$ . La seule difficulté pour l'organiste est alors de trouver la registration la plus approchante lorsque son orgue ne dispose pas de tous les jeux requis : ce qui est le cas le plus fréquent!

En ce qui concerne Louis Marchand - celui qui aurait dû avoir l'audace de se mesurer à JS Bach - le titre « **Tierce en taille** » nous prévient que nous allons entendre un solo de Jeu de tierce en voix de ténor (taille est l'ancien nom de ténor). L'organiste va donc registrer un Jeu de Tierce sur l'un des claviers et le solo devant être évidemment accompagné, va « tirer » un ou deux jeux doux sur un

---

autre clavier et au pédalier pour accompagner son ténor.

Comme son titre l'indique, le « **Récit de trompette** » est un solo de trompette accompagné par quelques jeux doux : Bourdon de 8 et 4 pieds. A l'organiste de savoir la trompette qu'il doit choisir : celle du positif, celle du récit ou celle du grand-orgue!

Le titre « **Dialogue sur le Cromorne et le Jeu de Tierce** » de l'oeuvre de Jacques Boyvin, se décode de la même manière sans qu'il soit besoin d'en dire plus.

Par contre, la registration du « **Quatuor** » de Gilles Julien est beaucoup plus délicate. En effet, comme son nom l'indique, l'oeuvre est composée pour 4 sonorités différentes ; donc 4 plans sonores, si possible. Confier la voix grave au pédalier est un choix facile ; mais le choix des 3 claviers manuels pour les 3 voix restantes est soumis à 2 contraintes :

1. la première contrainte est ergonomique. N'ayant que 2 mains pour jouer les 3 claviers, la main droite devra jouer le clavier «alto» et le clavier « soprane » ; ce qui implique physiologiquement que le clavier «alto» soit juste en dessous du clavier « soprane ». Si la main gauche n'a que la voix de « ténor » à jouer , elle choisiera un clavier restant. Mais si elle doit prêter main forte (c'est le cas de le dire) à la main droite , dans la cas d'une extension impossible à faire avec la seule main droite par exemple, son clavier ne peut être que juste en dessous du clavier d'alto.
2. La seconde contrainte est d'ordre artistique. La registration doit garantir la musicalité de chacune des voix entendues séparément et leur place dans l'ensemble du Quatuor. C'est presque « mission impossible » ! Le résultat n'est vraiment convainquant que lorsque l'interprétation est assurée par deux organistes.

La seconde oeuvre de Gilles Jullien est un « **Récit de cornet** ». Le cornet est composé des mêmes 5 harmoniques flûtées qu'on trouvaient déjà dans le Jeu de tierce mais cette fois-ci les 5 rangs de tuyaux sont disposés sur une même pièce faisant résonance ; donc un seul registre. Cette petite différence technologique suffit pour donner au Cornet une sonorité nettement plus ronde dans le médium et l'aigu moyen : domaine dans lequel ses qualité mélodiques et expressives excellent. C'est pourquoi ce registre ne commence qu'à l'UT3.

Enfin, pour terminer cette initiation à la registration, nous entendrons un « **Grand-Jeu** » de P. du Mage. « **Grand-Jeu** » signifie le choeur des jeux d'anches à tous les claviers auxquels on ajoute les cornets pour renforcer les aigus faiblissant des anches.

---

La « **Voix-Humaine** » est exclue du Grand-jeu, car son timbre très particulier, ne se fondrait pas dans celui des trompettes. Nous l'entendrons dans l' « **Andante, 'Chœur de Voix-Humaines'** » de Lefébure-Wély, accompagnée d'un jeu de flûte de 8 pieds .

Avec cette pièce nous abordons l'époque romantique très influencée par l'art lyrique. Pour conserver la faveur de leur public, les organistes composent une musique dont on ne sait plus très bien si elle est destinée à l'église ou à l'opéra. tant elle évoque la sentimentalité saint-sulpicienne. Tiens, ça tombel..... Car Louis Lefébure-Wély et Charles Marie Widor ont été les organistes successifs de l'église Saint-Sulpice à Paris! Et ce ne sont pas les « flons-flons » de la « **Marche en mi mineur** » qui nous contrediront.

La « **Quatrième Sonate en trio** » de J.S. Bach nous ramène à un peu plus de sérieux en ce début de seconde partie. Retour au contre-point stricte certes, mais qui ne freine en rien la grâce des divertissements qui rapelle certains passages des concertos Brandebourgeois. Les sonates en trio pour orgue de J.S. Bach sont des oeuvres profanes écrites pour la formation musicale de W. F. Bach.

L'intrusion de J.S. Bach dans ce programme français est destinée à illustrer la différence entre l'écriture française et les écritures européennes même si J.S. Bach ne saurait représenter à lui seul les musiciens européens. Pour être publiée, la musique française d'orgue doit avoir l'autorisation du roi : musique de cour autant destinée à Dieu qu'au roi, son représentant sur la terre. C'est donc bien une musique religieuse destinée à la célébration du culte divin. C'est pourquoi nous sommes surpris par le caractère décoratif de cette musique qui rappelle étrangement les danses de la suite instrumentale!

Le « **Banquet Celeste** » d'Olivier Messiaen est une méditation dont le caractère intemporel est accentué par les incisifs tics tacs du temps égrénés en arrière-plan. La méditation est chantée par les gambes d'un clavier manuel - ces jeux très maigres en tour de taille mais très riches en harmoniques. Les tics tacs du temps sont joués sur le pédalier avec quelques harmoniques aigus.

Olivier Messiaen, lecteur averti des travaux d'Einstein, de Louis de Broglie et de Paul Langevin sur la relativité et de la mécanique quantique qui font voler en éclats les représentations du temps et de l'espace, nous invite à partager sa contemplation du Monde lorsque les nuées du doute s'écartent pour laisser éclater sa confiante jubilation dans ce « **Transport de Joie** » (extrait de « L'Ascension »).

---

