

## ANNEXE 1 : Nomenclature

Lorsque l'on appuie sur les touches d'un clavier d'orgue, un clapet s'ouvre et laisse passer un flux d'air sous pression qui vient ensuite provoquer une résonance dans un tuyau ouvert ou fermé présentant une lumière.

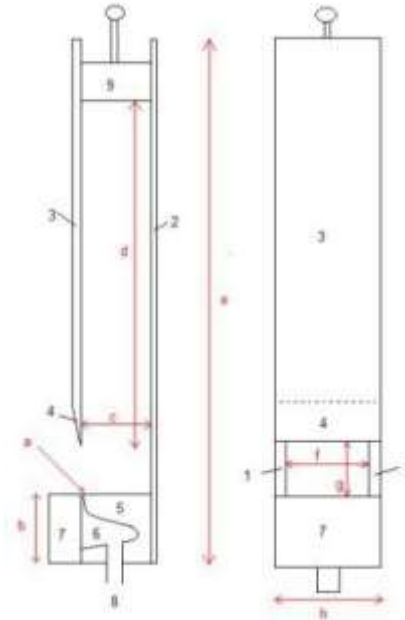


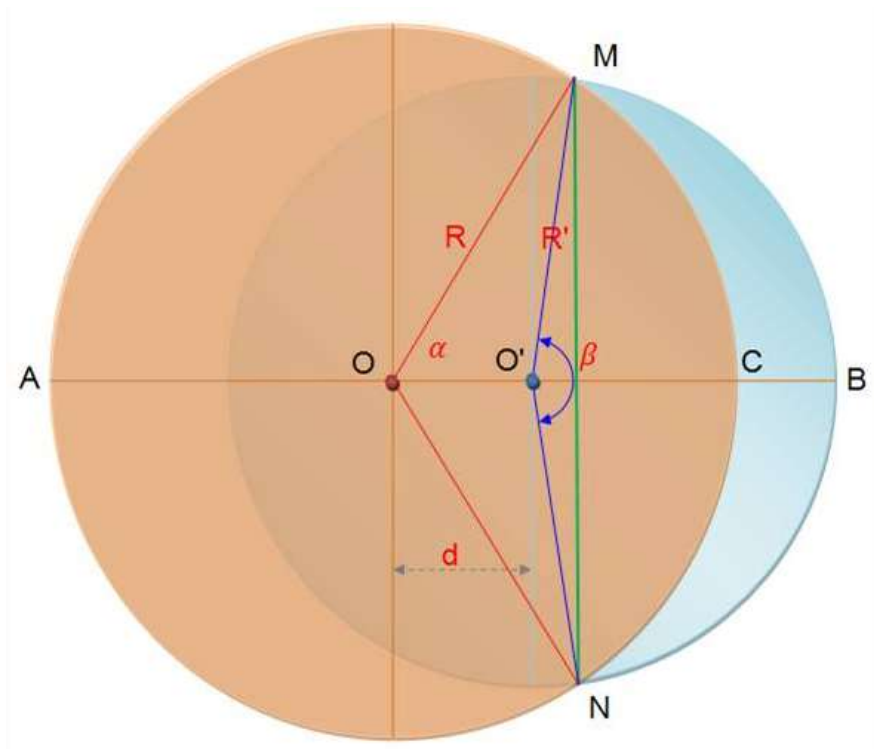
Figure 22: Anatomie d'un tuyau d'orgue fermé appelé bourdon

Source : <https://orgue-bernard.blog4ever.com/anatomie-d-une-flute-et-conventions>

- 1 Les cotés : longueur  $e$  x largeur  $c$ , épaisseur (généralement 4 à 6mm et pour nos flûtes sans potelets)  
Si la lèvres supérieure a été creusée au ciseau dans la face avant seulement dans la partie face à la lumière (a), il reste ce qu'on appelle les potelets qui se prolongent jusqu'à la lèvres inférieure (et les cotés ne sont pas visibles à cet endroit).
  - 2 Le fond (ou façade arrière) : longueur  $e$  largeur  $h+1$ mm pour ponçage
  - 3 La façade avec la lèvres supérieure 4 : longueur  $(e-b-g)$  x largeur  $h+1$ mm épaisseur variable.
  - 4 Lèvres supérieure ou biseau, pente  $5^\circ$  à  $22^\circ$  recommandé  $8^\circ$  (l'épaisseur d'extrémité  $\pm$  égal à la lumière a)
  - 5 Noyau : largeur  $f$ , profondeur  $c$ , hauteur  $b$
  - 6 Chambre (creusée dans le noyau)
  - 7 Lèvres inférieure : largeur  $h$ , hauteur  $b$ , profondeur de 2 à 15 mm
  - 8 Pied de flûte (arrivée de l'air)
  - 9 Tampon (pour les bourdons ou flûtes bouchées)
- a Lumière : espace entre le noyau 5 et la lèvres inférieure 7  
b Hauteur de noyau (et implicitement hauteur de la lèvres inférieure)  
c Profondeur interne  
d Hauteur acoustique (ou longueur acoustique réelle différente de la longueur acoustique théorique)  
e Hauteur totale (ou longueur totale)  
f Largeur interne  
g Hauteur de bouche  
h Largeur de façade

## ANNEXE 2 : Calcul de la surface d'une demi-lune et d'un croissant de lune

Les angles sont mesurés en radian.



Aire de la demi-lune MCN

$$S_{MCN} = \frac{1}{2} \times R'^2(\beta - \sin(\beta))$$

Aire de la demi-lune MBN

$$S_{MBN} = \frac{1}{2} \times R^2(\alpha - \sin(\alpha))$$

Aire du croissant de lune MBNC (bleu)

$$S_{MBNC} = S_{MBN} - S_{MCN}$$

Pour notre prototype final

$$R' = 5 \text{ mm} \quad \beta = 120^\circ$$

$$R = 9,87 \text{ mm} \quad \alpha = 52,02^\circ$$

## ANNEXE 3 : Mesures expérimentales

Chaque tableau de cette section nécessite 2h30 d'acquisitions expérimentales et 2h de traitement des données pour relever la valeur de la fréquence fondamentale et du niveau sonore dans chaque cas.

Mesures à 6,0 V

### Bourdon

L (cm) W(mm)	4,0	5,1	6,0	7,1	8,2	9,0	10,0	11,1	11,8
2.5	Bruit	Bruit	1123 Hz -63,1 dB	1008 Hz -27,4 dB	914 Hz -24,1 dB	844 Hz -24,0 dB	768 Hz -48,7 dB	701 Hz -52,7 dB	Bruit
3.5	Bruit	Bruit	Bruit	972 Hz -40,0 dB	915 Hz -26,0 dB	851 Hz -17,1 dB	780 Hz -15,0 dB	715 Hz -14,0 dB	675 Hz -15,5 dB
4.5	Bruit	1509 Hz -25,5 dB	1333 Hz -35,5 dB	Bruit	Bruit	806 Hz -39,1 dB	765 Hz -28,0 dB	711 Hz -23,5 dB	677 Hz -20,8 dB
5.5	Bruit	Bruit	1328 Hz -23,7 dB	1152 Hz -26,5 dB	Bruit	Bruit	Bruit	658 Hz -43,7 dB	644 Hz -37,3 dB
6.5	Bruit	Bruit	1315 Hz -37,9 dB	1147 Hz -21,3 dB	1026 Hz -24,9 dB	Bruit	Bruit	Bruit	599 Hz -50,7 dB
7.5	Bruit	Bruit	Bruit	1111 Hz -38,8 dB	1019 Hz -21,8 dB	936 Hz -21,2 dB	850 Hz -25,2 dB	779 Hz -47,8 dB	Bruit
8.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	982 Hz -39,5 dB	925 Hz -23,5 dB	844 Hz -17,1 dB	772 Hz -18,5 dB	735 Hz -23,6 dB

L (cm) W(mm)	13,1	14,0	14,8	16,1	17,2	18,2	18,8	19,9	21,1
2.5	Bruit	Bruit	Bruit	.					
3.5	619 Hz -15,4 dB	578 Hz -19,6 dB	551 Hz -19,5 dB	511 Hz -30,3 dB	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit
4.5	619 Hz -17,8 dB	576 Hz -17,2 dB	552 Hz -17,2 dB	512 Hz -17,6 dB	482 Hz -20,0 dB	458 Hz -21,8 dB	443 Hz -26,5 dB	Bruit	Bruit
5.5	609 Hz -25,8 dB	574 Hz -22,2 dB	549 Hz -20,1 dB	510 Hz -18,1 dB	481 Hz -17,7 dB	458 Hz -18,0 dB	442 Hz -17,0 dB	419 Hz -19,3 dB	394 Hz -25,4 dB
6.5	578 Hz -40,9 dB	557 Hz -34,0 dB	540 Hz -28,6 dB	506 Hz -21,7 dB	480 Hz -20,8 dB	456 Hz -19,9 dB	441 Hz -18,1 dB	419 Hz -17,5 dB	394 Hz -18,9 dB
7.5	Bruit	Bruit	487 Hz -51,2 dB	475 Hz -43,4 dB	462 Hz -35,4 dB	442 Hz -30,1 dB	432 Hz -29,4 dB	415 Hz -25,4 dB	390 Hz -22,4 dB
8.5	666 Hz -47,2 dB	Bruit	Bruit						

### Tuyau

L (cm) W(mm)	4,0	5,1	6,0	7,1	8,2	9,0	10,0	11,1	11,8
2.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit
3.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit
4.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit
5.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1438 Hz -26,9 dB	1365 Hz -23,5 dB
6.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1423 Hz -43,6 dB	1360 Hz -27,0 dB
7.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit
8.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit

L (cm) W (mm)	13,1	14,0	14,8	16,1	17,2	18,2	18,8	19,9	21,1
2.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	952 Hz -20,1 dB	902 Hz -23,7 dB	Bruit	Bruit	Bruit
3.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit
4.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit
5.5	1251 Hz -40,4dB	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit
6.5	1257 Hz -21,2 dB	1177 Hz -29,4 dB	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit
7.5	Bruit	1153 Hz -37,6 dB	1105 Hz -29,1 dB	1033 Hz -27,5 dB	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit
8.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit

Mesures à 9,0 V

**Bourdon**

L (cm) W (mm)	4,0	5,1	6,0	7,1	8,2	9,0	10,0	11,1	11,8
2.5	1639 Hz -30,0 dB	1386 Hz -22,2 dB	1218 Hz -21,1 dB	1055 Hz -26,3 dB	946 Hz -55,7 dB	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit
3.5	1521 Hz -45,6 dB	1395 Hz -21,9 dB	1242 Hz -15,6 dB	1068 Hz -11,3 dB	961 Hz -11,4 dB	872 Hz -11,0 dB	799 Hz -13,3 dB	732 Hz -15,9 dB	694 Hz -20,0 dB
4.5		1200 Hz -28,5 dB	1065 Hz -16,0 dB	960 Hz -13,3 dB	877 Hz -11,8 dB	803 Hz -10,8 dB	736 Hz -10,4 dB	694 Hz -11,5 dB	633 Hz -13,9 dB
5.5	Bruit	Bruit	1020 Hz -47,8 dB	990 Hz -37,2 dB	937 Hz -23,6 dB	872 Hz -15,7 dB	802 Hz -13,1 dB	735 Hz -10,5 dB	695 Hz -10,7 dB
6.5	1926 Hz -17,3 dB	1603 Hz -17,3 dB	Bruit	Bruit	867 Hz -37,9 dB	842 Hz -28,1 dB	791 Hz -19,4 dB	731 Hz -14,5 dB	695 Hz -12,8 dB
7.5	Bruit	Bruit	1397 Hz -16,8 dB	1210 Hz -31,7 dB	Bruit	Bruit	708 Hz -42,4 dB	688 Hz -32,5 dB	667 Hz -25,8 dB
8.5	Bruit	Bruit	1393 Hz -21,4 dB	1199 Hz -18,2 dB	1068 Hz -27,7 dB	Bruit	Bruit	Bruit	602 Hz -47,7 dB

L (cm) W (mm)	13,1	14,0	14,8	16,1	17,2	18,2	18,8	19,9	21,1
2.5	Bruit	Bruit	Bruit	1471 Hz -44,1 dB	1410 Hz -40,6 dB	1335 Hz -43,8 dB	1296 Hz -50,0 dB	1237 Hz -61,7 dB	Bruit
3.5	Bruit	Bruit	Bruit	1471 Hz -42,1 dB	1408 Hz -32,2 dB	1341 Hz -27,8 dB	1300 Hz -23,8 dB	1239 Hz -20,4 dB	1174 Hz -20,1 dB
4.5	592 Hz -16,1 dB	565 Hz -21,4 dB	Bruit	Bruit					
5.5	633 Hz -11,6 dB	592 Hz -10,2 dB	565 Hz -12,3 dB	523 Hz -14,8 dB	490 Hz -21,4 dB	463 Hz -29,3 dB	Bruit	Bruit	
6.5	633 Hz -12,0 dB	591 Hz -10,8 dB	564 Hz -11,2 dB	523 Hz -12,6 dB	489 Hz -15,7 dB	463 Hz -14,9 dB	452 Hz -18,6 dB	427 Hz -24,8 dB	
7.5	621 Hz -20,2 dB	589 Hz -15,4 dB	562 Hz -14,4 dB	522 Hz -13,7 dB	488 Hz -14,0 dB	463 Hz -12,8 dB	449 Hz -14,0 dB	428 Hz -13,8 dB	398 Hz -16,6 dB
8.5	592 Hz -36,7 dB	569 Hz -28,9 dB	550 Hz -22,7 dB	516 Hz -20,0 dB	486 Hz -16,1 dB	463 Hz -13,7 dB	448 Hz -14,9 dB	425 Hz -13,6 dB	398 Hz -14,2 dB

L (cm) W(mm)	4,0	5,1	6,0	7,1	8,2	9,0	10,0	11,1	11,8
2.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit
3.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1506 Hz -25,5 dB	1320 Hz -17,2 dB	1210 Hz -17,1 dB
4.5	Bruit	2834 Hz -19,4 dB	2534 Hz -16,4 dB	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1324 Hz -48,7 dB
5.5	Bruit	Bruit	Bruit	2182 Hz -11,6 dB	1954 Hz -33,1 dB	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit
6.5	Bruit	Bruit	Bruit	2156 Hz -21,1 dB	1951 Hz -11,5 dB	1783 Hz -21,7 dB	Bruit	Bruit	Bruit
7.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1762 Hz -27,9 dB	1617 Hz -14,5 dB	1480 Hz -16,8 dB	Bruit
8.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1475 Hz -20,2 dB	1395 Hz -13,8 dB

L (cm) W(mm)	13,1	14,0	14,8	16,1	17,2	18,2	18,8	19,9	21,1
2.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit
3.5	1129 Hz -13,1 dB	1078 Hz -15,6 dB	1001 Hz -16,2 dB	Bruit	Bruit	Bruit			
4.5	1202 Hz -20,3 dB	1130 Hz -11,4 dB	1078 Hz -11,6 dB	1001 Hz -9,0 dB	942 Hz -11,6 dB	895 Hz -9,0 dB	870 Hz -12,5 dB	823 Hz -20,2 dB	Bruit
5.5	Bruit	Bruit	Bruit	985 Hz -35,5 dB	936 Hz -17,6 dB	893 Hz -16,6 dB	869 Hz -15,4 dB	824 Hz -15,9 dB	780 Hz -11,5 dB
6.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit		
7.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit		
8.5	1281 Hz -24,3 dB	Bruit	Bruit	Bruit					

Mesures à 12,0 V

**Bourdon**

L(cm) W (mm)	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	7,0
2,5	Bruit	1844 Hz -84,7 dB	1649 Hz -19,9 dB	1535 Hz -25,5 dB	1390 Hz -39,2 dB	Bruit			
3,0	Bruit	1997 Hz -37,5 dB	1869 Hz -24,1 dB	1702 Hz -25,6 dB	1593 Hz -12,2 dB	1429 Hz -12,7 dB	1310 Hz -13,3 dB	1250 Hz -9,9 dB	1075 Hz -22,5 dB
3,5	Bruit	Bruit	Bruit	1701 Hz -17,5 dB	1579 Hz -18,5 dB	1427 Hz -10,6 dB	1314 Hz -8,9 dB	1258 Hz -9,1 dB	1084 Hz -3,8 dB
4	Bruit	Bruit	Bruit	1657 Hz -21,8 dB	1555 Hz -16,4 dB	1401 Hz -14,2 dB	1303 Hz -14,0 dB	1229 Hz -12,9 dB	1074 Hz -18,2 dB
4,5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1527 Hz -26,0 dB	1420 Hz -14,6 dB	1319 Hz -12,1 dB	1262 Hz -8,7 dB	1091 Hz -1,5 dB
5,5	2777 Hz -18,1 dB	2504 Hz -16,3 dB	2263 Hz -18,6 dB	Bruit	Bruit	Bruit	1233 Hz -25,8 dB	1204 Hz -20,7 dB	1087 Hz -7,3 dB
6,5	Bruit	Bruit	2253 Hz -12,0 dB	2007 Hz -18,3 dB	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1046 Hz -17,6 dB

7,5	Bruit	Bruit	Bruit	1974 Hz -17,7 dB	1833 Hz -21,7 dB	1640 Hz -16,6 dB	Bruit	Bruit	bruit
8,5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1809 Hz -27,3 dB	1639 Hz -17,5 dB	1516 Hz -19,3 dB	1434 Hz -21,0 dB	Bruit

L(cm) W(mm)	8,4	9,0	10,0	11,0	11,8	12,0	13,1	14,0	14,8
2,5									
3,0	Bruit	Bruit							
3,5	935 Hz -8,8 dB	876 Hz -16,3 dB	Bruit						
4,0	924 HZ -18,4 dB	879 Hz -17,1 dB	797 Hz -20,0 dB						
4,5	948 Hz -8,0 dB	881 Hz -6,2 dB	803 Hz -16,2 dB	742 Hz -9,4 dB	699 Hz -16,0 dB	691 Hz -21,0 dB	Bruit	bruit	
5,5	950 Hz -8,7 dB	883 Hz -5,4 dB	806 Hz -13,2 dB	742 Hz -6,0 dB	699 Hz -6,7 dB	696 Hz -9,0 dB	633 Hz -13,0 dB	592 Hz -12,8 dB	570 Hz -14,8 dB
6,5	936 Hz -16,8 dB	883 Hz -10,8 dB	807 Hz -8,9 dB	743 Hz -5,9 dB	700 Hz -7,5 dB	693 Hz -7,9 dB	633 Hz -13,4 dB	595 Hz -11,4 dB	569 Hz -13,1 dB
7,5	868 Hz -34,6 dB	845 Hz -27,0 dB	793 Hz -21,3 dB	737 Hz -9,7 dB	696 Hz -10,2 dB	690 Hz -8,7 dB	630 Hz -12,7 dB	593 Hz -12,3 dB	568 Hz -11,0 dB
8,5	Bruit	Bruit	737 Hz -29,4 dB	710 Hz -19,5 dB	683 Hz -15,5 dB	672 Hz -16,5 dB	628 Hz -13,1 dB	589 Hz -13,3 dB	565 Hz -16,8 dB

L(cm) W(mm)	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0
2,5						
3,5						
4,5						
5,5						
6,5	527 Hz -11,7 db	Bruit				
7,5	526 Hz -11,6 dB	489 Hz -15,3 dB				
8,5	526 Hz -12,4 dB	489 Hz -12,1 dB	462 Hz -23,5 dB	451 Hz -21,3 dB	429 Hz -27,4 dB	408 Hz -33,4 dB

### Tuyau

L(cm) W(mm)	4,0	5,1	6,0	7,1	8,2	9,0	10,0	11,1	11,8
2.5									
3.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1828Hz -18,1 dB	1678 Hz -20,4 dB	1535 Hz -15,8 dB	1403 Hz -17,9 dB	1326 Hz -18,4 dB
4.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1534 Hz -15,7 dB	1408 Hz -11,7 dB	1334 Hz -12,5 dB
5.5									
6.5									
7.5									
8.5	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit	1965 Hz -24,9 dB	1805 Hz -13,9 dB	1645 Hz -19,1 dB	1500 Hz -34,6 dB	bruit

L (cm) \ W(mm)	13,1	14,0	14,8	16,1	17,2	18,2	18,8	19,9	21,1
2.5									
3.5	1216 Hz -23,6 dB	1132 Hz -29,3 dB	Bruit	Bruit	Bruit	Bruit			
4.5	1220 Hz -14,9 dB	1139 Hz -14,5 dB	1087 Hz -13,6 dB	1010 Hz -19,8 dB	950 Hz -30,2 dB	Bruit	Bruit	Bruit	
5.5	1216 Hz -24,1 dB	1137 Hz -13,8 dB	1087 Hz -12,3 dB	1009 Hz -13,1 dB	952 Hz -14,2 dB	900 Hz -36,7	Bruit	bruit	
6.5	Bruit	Bruit	1078 Hz -21,1 dB	1008 Hz -14,8 dB	951 Hz -13,6 dB	901 Hz -11,9 dB	874 Hz -11,3 dB	827 Hz -13,0 dB	785 Hz -18,6 dB
7.5									
8.5									

## ANNEXE 4 : fréquences des notes de la gamme tempérée

Fréquences des notes (en hertz) dans la gamme tempérée

Note/octave	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>do</i> ou <i>si</i> $\sharp$	16,35	32,70	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,50	2093,00	4186,01	8 372,02	16 744,04
<i>do</i> $\sharp$ ou <i>ré</i> $\flat$	17,33	34,65	69,30	138,59	277,18	554,37	1108,73	2217,46	4434,92	8 869,84	17 739,68
<i>ré</i>	18,36	36,71	73,42	146,83	293,66	587,33	1174,66	2349,32	4698,64	9 397,28	18 794,56
<i>ré</i> $\sharp$ ou <i>mi</i> $\flat$	19,45	38,89	77,78	155,56	311,13	622,25	1244,51	2489,02	4978,03	9 956,06	19 912,12
<i>mi</i> ou <i>fa</i> $\flat$	20,60	41,20	82,41	164,81	329,63	659,26	1318,51	2637,02	5274,04	10 548,08	21 096,16
<i>fa</i> ou <i>mi</i> $\sharp$	21,83	43,65	87,31	174,61	349,23	698,46	1396,91	2793,83	5587,65	11 175,30	22 350,60
<i>fa</i> $\sharp$ ou <i>sol</i> $\flat$	23,13	46,25	92,50	185,00	369,99	739,99	1479,98	2959,96	5919,91	11 839,82	23 679,64
<i>sol</i>	24,50	49,00	98,00	196,00	392,00	783,99	1567,98	3135,96	6271,93	12 543,86	25 087,72
<i>sol</i> $\sharp$ ou <i>la</i> $\flat$	25,96	51,91	103,83	207,65	415,30	830,61	1661,22	3322,44	6644,88	13 289,76	26 579,52
<i>la</i>	27,50	55,00	110,00	220,00	440,00	880,00	1760,00	3520,00	7040,00	14 080,00	28 160,00
<i>la</i> $\sharp$ ou <i>si</i> $\flat$	29,14	58,27	116,54	233,08	466,16	932,33	1864,66	3729,31	7458,62	14 917,24	29 834,48
<i>si</i> ou <i>do</i> $\flat$	30,87	61,74	123,47	246,94	493,88	987,77	1975,53	3951,07	7902,13	15 804,26	31 608,52



## ANNEXE 5 : ondes stationnaires dans un tuyau

Pour interpréter le phénomène, il faut appliquer le principe de superposition d'ondes incidentes et réfléchies dans un milieu à une dimension et il faut tenir compte de conditions aux limites : seules certaines vibrations forcées sont alors amplifiées par un phénomène de résonance.

Par convention un tuyau rigide qui est ouvert aux deux extrémités est appelé tuyau «ouvert» ; tandis qu'un tuyau rigide qui est ouvert à une seule extrémité et qui a une surface rigide à l'autre extrémité est désigné sous le nom de tuyau «fermé» ou bourdon.

L'onde se propageant voit subitement, en fin de tuyau, son univers changer. Dans tous les cas une onde va se réfléchir.

**Si le tuyau est ouvert**, le monde extérieur impose une surpression nulle et l'onde de compression (+) aller se réfléchit en créant une onde de dépression (-) retour avec changement de signe pour revenir à l'ouverture initiale.

Arrivée à l'ouverture initiale, elle va donc encore se réfléchir avec changement de signe et redeviendra onde +. Après seulement deux trajets, le cycle est donc complet.

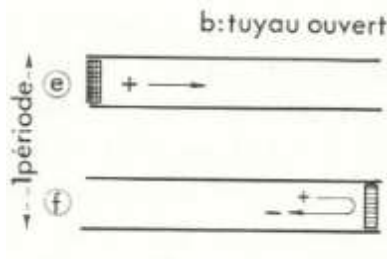


Figure 23 : trajet de l'onde de pression dans le tuyau ouvert

Entre (e) et (f), l'onde a donc accompli une période  $T$ , valant la distance parcourue (deux fois la longueur  $L$  du tuyau) divisée par la célérité de l'onde ( $c$ , la vitesse du son), donc :

$$T = \frac{2L}{c}$$

La fréquence fondamentale caractéristique du tuyau ouvert vaut donc :

$$f_1 = \frac{c}{2L}$$

Il s'agit là de la fréquence fondamentale, pour tenir compte des harmoniques, on remplace la relation par :

$$f_n = n \times \frac{c}{2L}$$

Pour  $n = 1$  on retrouve le résultat précédent. En revanche cette équation révèle l'existence d'harmoniques qui vont participer au timbre de l'instrument.

**Si le tuyau est fermé** (cas du bourdon de l'orgue), l'onde de compression (notée +), engendrée, se propage vers le fond où elle se réfléchit sans changement de signe (signe +) pour retourner vers l'ouverture ; là elle rencontre une ouverture et est donc réfléchi avec changement de signe (dépression, signe -) et retourne à nouveau vers le fond. Là, elle est réfléchi une fois de plus sans changement de signe (elle reste -) et revient vers l'ouverture où elle va changer de signe à nouveau et redeviendra +. Après avoir parcouru quatre fois la longueur du tube, elle recommencera donc le même cycle, qui se répèterait indéfiniment si les frottements n'amortissaient pas graduellement l'onde.

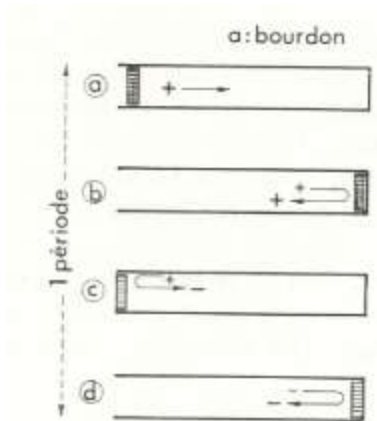


Figure 24 : trajet de l'onde de pression dans le tuyau fermé

Entre (a) et (d), l'onde a donc accompli une période  $T$ , valant la distance parcourue (quatre fois la longueur  $L$  du tuyau) divisée par la célérité de l'onde ( $c$ , la vitesse du son), donc :

$$T = \frac{4 \times L}{c}$$

La fréquence  $f$  caractéristique du tuyau fermé vaut donc

$$f_1 = \frac{c}{4 \times L}$$

Par analogie à l'étude précédente, les harmoniques vérifient :

$$f_{n'} = n' \times \frac{c}{4 \times L}$$

Soit  $\lambda = \frac{4 \times L}{n'}$  avec  $n'$  qui est un entier impair, afin de satisfaire aux conditions aux limites comme sur les représentations suivantes :

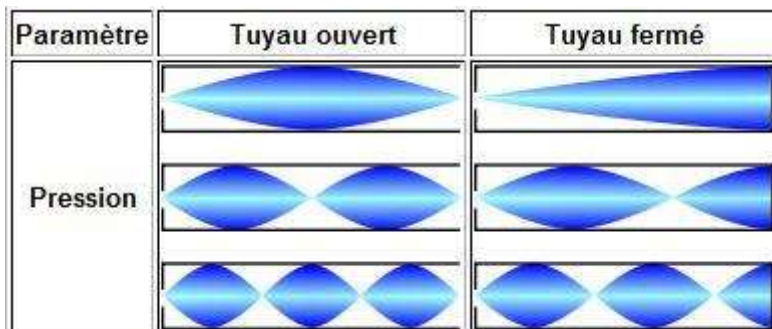


Figure 25 : ondes stationnaires dans un tuyau ouvert ou fermé. La première onde est la fondamentale, les suivantes sont les harmoniques (wikipédia)

## ANNEXE 6 : Paramétrages des tuyaux d'organettissimo

note	fréquence (Hz)	L' (mm) tuyau	L' (mm) bourdon	W (mm) (uj,m=10 m/s)
sol3	392	443,1836735	213,6785714	13,39285714
sol3#	415,3	417,4216229	200,904888	12,641464
la3	440	393,0909091	188,8409091	11,93181818
la3#	466,16	370,1335164	177,4578685	11,26222756
si3	493,88	348,4610027	166,7119138	10,63011258
do4	523,25	328,0038223	156,5685619	10,03344482
do4#	554,37	308,6928946	146,9935603	9,470209427
ré4	587,33	290,4716599	137,9588647	8,938756747
ré4#	622,25	273,2728003	129,4310968	8,437123343
mi4	659,26	257,0334011	121,3790614	7,963474198
fa4	698,46	241,7098187	113,7811185	7,51653638
fa4#	739,99	227,2465304	106,609738	7,094690469
sol4	783,99	213,5947652	99,84073776	6,696513986
sol4#	830,61	200,7082024	93,45115036	6,320655903
la4	880	188,5454545	87,42045455	5,965909091
la4#	932,33	177,0646874	81,7279075	5,631053382
si4	987,77	166,2286565	76,35504217	5,31500248
do5	1046,5	156,0019111	71,28428094	5,016722408
do5#	1108,73	146,3479116	66,49750616	4,735147421
ré5	1174,66	137,2358299	61,97943235	4,469378373
ré5#	1244,51	128,635238	57,71497216	4,218527774
mi5	1318,51	120,5177359	53,69004406	3,981767298
fa5	1396,91	112,8558318	49,8910166	3,758295094
fa5#	1479,98	105,6232652	46,30486898	3,547345234
sol5	1567,98	98,79738262	42,92036888	3,348256993
sol5#	1661,22	92,3541012	39,72557518	3,160327952
la5	1760	86,27272727	36,71022727	2,982954545
la5#	1864,66	80,5323437	33,86395375	2,815526691
si5	1975,53	75,11478945	31,17774977	2,657514692