

## Sur la précision de la trompette

*Jean Alain Monfort*  
(19 / 08 / 2016)

C'est le « défaut congénital » du système « pistons – coulisses » de Périnet, qui est à l'origine de divers procédés pour sonner juste. Il en va de même pour le système à « palettes – valves rotatives ». Ce défaut est explicité ci-dessous.

On considère le cas d'une trompette en Bb. Le cas des trompettes de tonalités différentes (plus graves : A, B, ou plus aiguës : D, Eb) se traite de la même manière que ci-dessous, en modifiant la longueur totale de référence. On se place :

- (a) après réglage de la hauteur pour accordage de l'instrument (tonalité d'ensemble) ;
- (b) avant étirement des coulisses de piston pour corriger la fausseté explicitée ici.

Tous ces instruments ont donc un **tube (embouchure et perce) de longueur fixe** ainsi que des **coulisses de pistons de longueur fixe**.

On exclut donc de l'analyse les instruments de longueur variable, obtenue par élongation, ie :

- (a) soit par adjonction de corps supplémentaires (trompette naturelle, trompette baroque) ou de trous latéraux qui modifient de façon discontinue la longueur de base (trompette à trous) (cf flutes) ;
- (b) soit à l'aide d'une coulisse unique, qui modifie de façon continue la longueur de base (trombone).

La fausseté de l'instrument moderne apparaît (est perceptible) dès que l'on utilise au moins deux pistons simultanément à partir de ses notes obtenues « à vide » : fondamentale C1 (qui produit un B1b) ou de l'une de ses harmoniques G2 (qui produit un F2), C2 (qui produit un B2b), E2 (qui produit un D2), G3 (qui produit un F3), [(B3b qui produit un A3b)], C3 (qui produit un B3b) et (E3 qui produit un D3). En effet, les écarts de hauteur entre les notes produites (ou entendues) et les notes théoriques (notes « justes ») dépassent les 10 cents (écart perceptible par l'oreille humaine).

L'explication vient simplement de la différence entre :

- (a) la conception-même de l'instrument et sa fabrication : la longueur de chaque coulisse est calculée (indépendamment entre elles) en proportion de la longueur totale du tuyau (y compris l'embouchure), laquelle est **fixe** pour des trompettes actuelles (environ 147,50 cm pour la Bb). Ces longueurs sont donc, elles aussi et par construction, fixes : la connaissance de la longueur de l'instrument et les longueurs de coulisses permet de calculer les longueurs obtenues en abaissant des pistons ;

- (b) les propriétés acoustiques des tuyaux sonores. Les hauteurs du son (fréquences) sont théoriquement définies en **proportion de la longueur d'un tube donné** (ainsi, une piccolo est deux fois plus courte qu'une ordinaire, et sonne donc une octave au-dessus). Or, l'abaissement de 2 pistons (au moins) faussent ces proportions car les longueurs (fixes) de leurs dérivations respectives (les 3 coulisses) sont ajoutées à une longueur **variable** du tube de référence : cette variation résulte justement de l'abaissement préalable de 1 (ou 2) piston(s).

Les résultats du calcul « théorique » (ci-dessous) permettent d'évaluer les écarts de hauteurs, donc la fausseté de l'instrument.

On se limite à des instruments comportant 3 pistons (situation courante). Les autres cas (eg piccolo ou bugle à 4 pistons) s'analysent de la même façon que ci-dessous. Toutes les **longueurs** sont **exprimées en**

**cm.** (la conversion en pouces anglo-saxons est basée sur le taux : 1 inch = 2,54 cm). Les calculs sont approchés au 1 / 100<sup>ème</sup> de cm.

## 1. Les calculs

On note :

$L_0 \# 147,50$  cm la longueur approximative totale du tube, depuis l'embouchure jusqu'à la sortie du pavillon ;

$p_2 = 6 \%$  la proportion entre la longueur  $C_2$  de la coulisse 2 et la longueur totale  $L_0$  ( $C_2 = p_2 \cdot L_0 = 8,85$  cm). C'est cette proportion qui permet d'abaisser de 1/2 ton (= 100 cents) la fondamentale ou l'une de ses harmoniques ;

$p_1 = 2 \cdot p_2 = 12 \%$  la proportion entre la longueur  $C_1$  de la coulisse 1 et la longueur totale  $L_0$  ( $C_1 = p_1 \cdot L_0 = 17,70$  cm). Cette proportion permet d'abaisser les notes de base de 1 ton ;

$p_3 = 3 \cdot p_2 = 18 \%$  la proportion entre la longueur  $C_3$  de la coulisse 3 et la longueur totale  $L_0$  ( $C_3 = p_3 \cdot L_0 = 26,55$  cm). Cette proportion permet d'abaisser les notes de base de 1 ton 1/2.

L'estimation des paramètres  $p_1$ ,  $p_2$  et  $p_3$  résulte de considérations acoustiques (expérimentation) non essentielles à la compréhension du sujet, et qui ne seront donc pas considérées ici.

On raisonne alors comme suit, les coulisses de pistons étant supposées rentrées (ie non tirées).

### 1.1. Abaissement d'un seul piston

(a) abaisser le piston 2 seul allonge  $L_0$  de  $C_2 = p_2 \cdot L_0$ , d'où une longueur totale  $L_2 = L_0 + C_2 = L_0 \cdot (1 + p_2) = 156,35$  cm ;

(b) de même, abaisser le piston 1 (seul) allonge  $L_0$  de  $C_1 = p_1 \cdot L_0$ , d'où une longueur totale  $L_1 = L_0 \cdot (1 + p_1) = 165,20$  cm ;

(c) enfin, abaisser le piston 3 isolément allonge  $L_0$  de  $C_3 = p_3 \cdot L_0$ , d'où une longueur totale de  $L_3 = L_0 \cdot (1 + p_3) = 174,05$  cm. Par l'équivalence théorique des combinaisons 12 et 3, on a aussi  $L_3 = L_0 \cdot (1 + p_1 + p_2) = 174,05$  cm ;

### 1.2. Abaissement de deux pistons

Les raisonnements (a), (b) et (c) ci-après sont du même type. Seules les valeurs prises en compte changent :

(a) **combinaison 21.** Abaisser le piston 2, puis le piston 1 (combinaison 12), allonge d'abord  $L_0$  de  $C_2 = 8,85$  cm (soit  $L_2 = 156,35$  cm), puis de  $C_1 = p_1 \cdot L_0$ , soit une longueur totale  $L_{21} = L_0 + C_2 + C_1 = L_0 + p_2 \cdot L_0 + p_1 \cdot L_0 = L_0 \cdot (1 + p_2 + p_1) = 174,05$  cm.

Or, dans ce qui précède, la longueur  $C_1$  correspond à proportion  $p_1$  appliquée à la longueur  $L_0$ , alors (**règle de proportionnalité**) qu'elle devrait être appliquée à la nouvelle longueur  $L_2$  obtenue lorsque le piston 2 est déjà abaissé : ceci nécessiterait une coulisse 1 plus longue. Autrement dit, on doit raisonner comme si  $L_2$  était une « nouvelle » harmonique, et « oublier » la longueur initiale  $L_0$ .

Par suite, l'instrumentiste devrait avoir à sa disposition, non pas la longueur  $L_{21}$ , mais la longueur  $L_{21}^{\sim} = L_2 \cdot (1 + p_1) = 156,35 (1 + 12\%) \approx 175,11$  cm.

En résumé, au lieu de la longueur  $L_{21} = L_0 \cdot (1 + p_2 + p_1)$  obtenue avec l'instrument, on devrait avoir la longueur  $L_{21}^{\sim} = L_0 \cdot (1 + p_1) \cdot (1 + p_2)$ . La longueur  $L_{21}$  est donc trop courte, et la note correspondante est donc trop élevée.

Le déficit vaut  $\Delta_{21} = L_{21}^{\sim} - L_{21} = L_0 \cdot (1 + p_1) \cdot (1 + p_2) - L_0 \cdot (1 + p_1 + p_2)$ , soit :

$$\Delta_{21} = L_0 \cdot p_1 \cdot p_2,$$

et cet écart vaut ici  $\Delta_{21} = 175,11 - 174,05 = 1,06$  cm.

La combinaison 12 produit ainsi (selon la fréquence d'« accrochage » associée à  $L_0$ ) la note (fausse) A (ou E, C2#, etc) correspondant à  $L_{21}$  au lieu de produire la note correcte  $A^{\sim}$  (ou  $E^{\sim}$ , C2# $^{\sim}$ , etc) correspondant à  $L_{21}^{\sim}$ .

Le résultat est inchangé (symétrie de rôle) si l'on inverse l'ordre des pistons 1 et 2 (ie  $L_{12}^{\sim} = L_{21}^{\sim}$ ), ce qui était attendu (et que l'on peut observer concrètement).

(b) **combinaison 23**. Le raisonnement est analogue. Appuyer sur le piston 2 puis sur le piston 3 revient à allonger  $L_2$  avec la coulisse 3 ( $C_3 = 26,55$  cm), d'où une longueur totale  $L_{23} = L_2 + C_3 = L_2 + p_3$ .  $L_0 = 156,35 + 26,55 = 182,90$  cm.

Or, la proportion  $p_3$  est basée sur  $L_0$  au lieu de la nouvelle longueur ( $L_2 = 156,35$  cm) obtenue après abaissement du piston 2. On doit encore raisonner comme si  $L_2$  correspondait à une « nouvelle » harmonique et « oublier » la longueur initiale  $L_0$ .

Par suite, l'instrumentiste devrait disposer, non pas de la longueur  $L_{23}$  précédente, mais de la longueur  $L_{23}^{\sim} = L_2 + p_3 \cdot L_2 = L_2 \cdot (1 + p_3) = 156,35 \cdot (1 + 18\%) = 184,49$  cm.

Le déficit vaut  $\Delta_{23} = L_{23}^{\sim} - L_{23} = L_0 \cdot (1 + p_2) \cdot (1 + p_3) - L_0 \cdot (1 + p_2 + p_3)$ , soit :

$$\Delta_{23} = L_0 \cdot p_2 \cdot p_3.$$

La longueur  $L_{23}$  est donc trop courte ( $\Delta_{23} = L_{23}^{\sim} - L_{23} = 184,49 - 182,90 = 1,59$  cm) et la note correspondante trop élevée.

Ainsi, la combinaison 23 produit la note (fausse) Ab (ou Eb, etc) correspondant à  $L_{23}$  au lieu de produire la note (correcte)  $Ab^{\sim}$  (ou  $Eb^{\sim}$ , etc) correspondant à  $L_{23}^{\sim}$ .

Comme précédemment, le résultat est invariant par inversion de l'ordre ( $L_{23}^{\sim} = L_{32}^{\sim}$ ).

(c) **combinaison 13**. Enfin, et de façon parallèle à ce qui précède, appuyer sur le piston 1 puis sur le piston 3 revient à allonger  $L_1 = L_0 + C_1 + C_3 = 147,50 + 17,7 + 26,55 = 191,75$  cm avec la coulisse 3 ( $C_3 = 26,55$  cm), d'où une longueur totale  $L_{13} = 191,75$  cm.

La proportion  $p_3$  étant basée sur  $L_0$  au lieu de la nouvelle longueur  $L_1$ , on devrait souffler, non pas dans la longueur  $L_{13}$  précédente, mais dans la longueur  $L_{13}^{\sim} = L_0 + C_1 + p_3 \cdot (L_0 + C_1) = (1 + p_3) \cdot (L_0 + C_1) = (1 + 18\%) (147,50 + 17,7) = 194,94$  cm.

Le déficit vaut ici  $\Delta_{13} = L_{13}^{\sim} - L_{13} = L_0 \cdot (1 + p_1) \cdot (1 + p_3) - L_0 \cdot (1 + p_1 + p_3)$

$$\Delta_{13} = L_0 \cdot p_1 \cdot p_3,$$

soit ici  $\Delta_{13} = 3,19$  cm, et la note correspondante est encore trop élevée.

Ainsi, la combinaison 13 produit la note (fausse) G1 (ou D, etc) correspondant à  $L_{13}$  au lieu de produire la note (correcte)  $C1^{\sim}$  (ou  $D^{\sim}$ , etc) correspondant à  $L_{13}^{\sim}$ . Ce résultat est toujours inchangé par permutation (ie  $L_{13}^{\sim} = L_{31}^{\sim}$ ).

### 1.3. Abaissement des trois pistons

En poursuivant le même type de raisonnement, le fait d'abaisser les trois pistons (combinaison 123) allonge le tuyau jusqu'à atteindre la longueur égale  $L_{123} = L_0 + C_1 + C_2 + C_3 = L_0 \cdot (1 + p_1 + p_2 + p_3) = 200,60$  cm.

Or, abaisser (par exemple) les pistons 12 devrait fournir la longueur précédente (§ 1.2. (a)), ie  $L_{12}^{\sim} = 175,11$  cm, puis abaisser le piston 3 devrait conduire à allonger cette nouvelle longueur  $L_{12}^{\sim}$  d'une proportion  $p_3 = 18\%$ , ie fournir la longueur  $L_{123}^{\sim} = L_{12}^{\sim} (1 + p_3) = 175,11 + 26,11 = 206,63$  cm.

L'écart théorique vaut alors  $\Delta_{123} = L_{123}^{\sim} - L_{123} = L_0 \cdot (1 + p_1) \cdot (1 + p_2) \cdot (1 + p_3) - L_0 \cdot (1 + p_1 + p_2 + p_3)$ , soit :

$$\Delta_{123} = L_0 \cdot (p_1 \cdot p_2 + p_2 \cdot p_3 + p_1 \cdot p_3 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3)$$

La trompette est donc ici en défaut de  $\Delta_{123} = 206,63 - 200,60 = 6,03$  cm.

Ce résultat est naturellement inchangé en abaissant aussi 2 à partir de 13, ou encore 1 à partir de 23.

## 2. Synthèse

Les développements précédents permettent de dresser un tableau synthétique (42 notes ou « degrés »), dans lequel on applique les calculs précédents à la fondamentale C1 et à chacune de ses harmoniques G2, C2, E2, G3 et C3.

Comme  $1/2$  ton = 100 cents correspond à 8,85 cm de tuyau (cf coulisse de piston 2), un écart quelconque de  $\Delta$  cm (colonne 5) correspond à une différence de hauteur égale à  $(100 / 8,85) \cdot \Delta$  (règle de proportionnalité). Le résultat de cette règle de trois figure en dernière colonne (colonne 6). Les valeurs supérieures à 10 cents (perception d'écart par l'oreille) sont indiquées en gras.

harmonique	combinaison	longueur réelle	longueur théorique	$\Delta$ (cm)	$\Delta$ (cent)
G2	000	147,50	147,50	0,00	0,00
F2#	020	156,35	156,35	0,00	0,00
F2	100	165,20	165,20	0,00	0,00

E1	120	174,05	175,11	<b>1,06</b>	<b>11,98</b>
D1#	023	182,90	184,49	<b>1,59</b>	<b>17,97</b>
D1	103	191,75	194,94	<b>3,19</b>	<b>36,05</b>
C1#	123	200,60	206,63	<b>6,03</b>	<b>68,14</b>

harmonique	combinaison	longueur réelle	longueur théorique	Delta (cm)	Delta (cent)
C1	000	147,50	147,50	0,00	0,00
B1	020	156,35	156,35	0,00	0,00
A1#	100	165,20	165,20	0,00	0,00
A1	120	174,05	175,11	<b>1,06</b>	<b>11,98</b>
G1#	023	182,90	184,49	<b>1,59</b>	<b>17,97</b>
G1	103	191,75	194,94	<b>3,19</b>	<b>36,05</b>
F1#	123	200,60	206,63	<b>6,03</b>	<b>68,14</b>

harmonique	combinaison	longueur réelle	longueur théorique	Delta (cm)	Delta (cent)
E2	000	147,50	147,50	0,00	0,00
D2#	020	156,35	156,35	0,00	0,00
D2	100	165,20	165,20	0,00	0,00
C2#	120	174,05	175,11	<b>1,06</b>	<b>11,98</b>
C2	023	182,90	184,49	<b>1,59</b>	<b>17,97</b>
B2 (ns)	103	191,75	194,94	<b>3,19</b>	<b>36,05</b>
A2# (na)	123	200,60	206,63	<b>6,03</b>	<b>68,14</b>

harmonique	combinaison	longueur réelle	longueur théorique	Delta (cm)	Delta (cent)
C2	000	147,50	147,50	0,00	0,00
B2	020	156,35	156,35	0,00	0,00
A2#	100	165,20	165,20	0,00	0,00
A2	120	174,05	175,11	<b>1,06</b>	<b>11,98</b>
G2#	023	182,90	184,49	<b>1,59</b>	<b>17,97</b>
G2 (ns)	103	191,75	194,94	<b>3,19</b>	<b>36,05</b>
F1# (ns)	123	200,60	206,63	<b>6,03</b>	<b>68,14</b>

harmonique	combinaison	longueur réelle	longueur théorique	Delta (cm)	Delta (cent)
C3	000	147,50	147,50	0,00	0,00
B3	020	156,35	156,35	0,00	0,00
A3#	100	165,20	165,20	0,00	0,00
A3	120	174,05	175,11	<b>1,06</b>	<b>11,98</b>

G3#	023	182,90	184,49	<b>1,59</b>	<b>17,97</b>
G3 (ns)	103	191,75	194,94	<b>3,19</b>	<b>36,05</b>
F2# (ns)	123	200,60	206,63	<b>6,03</b>	<b>68,14</b>

harmonique	combinaison	longueur réelle	longueur théorique	Delta (cm)	Delta (cent)
G3	000	147,50	147,50	0,00	0,00
F2#	020	156,35	156,35	0,00	0,00
F2	100	165,20	165,20	0,00	0,00
E2 (ns)	120	174,05	175,11	<b>1,06</b>	<b>11,98</b>
D2# (ns)	023	182,90	184,49	<b>1,59</b>	<b>17,97</b>
D3 (ns)	103	191,75	194,94	<b>3,19</b>	<b>36,05</b>
C2# (ns)	123	200,60	206,63	<b>6,03</b>	<b>68,14</b>

*les valeurs sont exprimées en cm, les écarts en cm et en cents.*

*le chiffre 0 placé au rang d'une touche quelconque signifie que celle-ci est relevée (ainsi, 000 équivaut à 0, 100 à 1, 020 à 2, 120 à 12, 023 à 23 et 103 à 13)*

*la mention (ns) signifie doigté « non standard »*

### 3. Conséquences sur l'étirement des coulisses de piston

Les combinaisons comportant (au moins) 2 pistons abaissés (ie 120, 023, 103 et 123), particulièrement fausses, impliquent d'allonger les coulisses correspondantes d'une  **demi-longueur par rapport à celle du tableau précédent** (colonne 5).

Dans le tableau ci-après, on suppose que l'instrument possède deux coulisses de pistons actionnables (coulisses 1 et 3) et l'on approxime les longueurs.

combinaison	correction (cm)	allongement total (cm)	dont allongement 1 (cm)	dont allongement 3 (cm)
120	1,06	0,50	0,50	0,00
023	1,59	0,80	0,00	0,80
103	3,19	1,60	0,64	0,96
123	6,03	3,00	1,20	1,80

Lorsque les coulisses 1 et 3 sont concernées, on peut simplement répartir les longueurs entre elles au prorata de leurs longueurs (ie 40 % et 60 %).

Si l'instrument ne possède qu'une seule coulisse de piston (3), l'allongement total (colonne 3) ne peut qu'être reporté sur celle-ci.

Les mouvements des lèvres permettent enfin de corriger une partie de la hauteur de note résultant des actionnements précédents.

### 4. Conséquences sur la justesse d'un instrument

Les inconvénients précédents, conceptuels aussi bien que « industriels » ou « artisanaux », peuvent guider la décision d'acquisition d'un instrument à embouchure et pistons (ou embouchure et palettes).

#### 4.1. Références de test

D'après ce qui précède, l'abaissement d'au moins 2 pistons (combinaisons 12, 23, 13, 123) crée le problème de fausseté. Pour **choisir un instrument** du type considéré, eg une C-trompette, on peut donc (en principe) se fier à celles des notes obtenues qui paraissent les plus fiables en hauteur. On devrait donc vérifier la « justesse » des notes émises suivantes :

(a) soit « à vide » (fondamentale et ses harmoniques) : C1, G2, C2, E2, G3 et C3. Ces notes, ainsi que leurs écarts (quintes, quartes, tierces), devraient être justes ;

(b) soit après abaissement d'un seul piston (combinaisons 1, 2 ou 3) : B1b, B1, F2, G2b, B2b, B2, D2, E2b, F3, G3b, B3b et B3. Ces notes / écarts devraient aussi sonner de façon juste, si les coulisses de pistons ont bien été calculées ... et réalisées (sans allongement).

Dans tous les cas, et malgré diverses tentatives, réalisées lors de la conception-fabrication, pour pallier les inconvénients de justesse mentionnés ici, les autres partiels doivent sonner faux, mais de façon « corrigable » (ie avec les coulisses ou les lèvres).

#### **4.2. Outils de test**

Sauf à posséder l'« oreille absolue », il existe trois procédés de base pour évaluer la hauteur des notes « à l'oreille » :

(a) le diapason « mécanique », qui résonne à 440 Hz (à la température de 20° C), mais ne fournit qu'une seule hauteur (« son pur ») ;

(b) le diapason (ou accordeur) « électronique » (dont certains en ligne sur Internet), qui permet d'ajuster sur diverses hauteurs (eg de 16 Hz à 16 000 Hz) qui sont aussi, en principe, des sons purs.

(c) un logiciel d'édition musicale (fiable). Certains permettent de constituer des fichiers à la norme MIDI, chaque fichier contenant une note donnée. On peut alors écouter ces notes à l'aide d'un smartphone ou d'une tablette. La qualité restituée dépend donc de celles du logiciel (et de l'ordinateur) ainsi que de l'appareil d'écoute (éviter d'éventuelles distorsions).

#### **4.3. Choix de l'équipement**

Par suite, on peut se rendre en magasin avec sa propre embouchure (qui doit correspondre au type d'instrument souhaité), ainsi que le diapason ou les fichiers sonores, pour tester les matériels (trompettes, sourdines) en comparant les diverses notes émises avec celles de « référence » (diapason, fichiers MIDI).