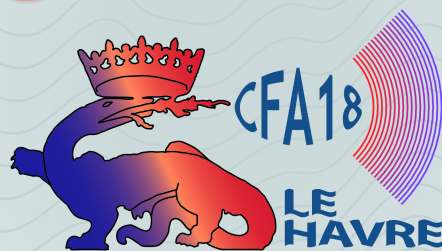


CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Perceptive study of an optimal trumpet using simulated sounds

R. Tournemenne^a, A. Chabot^b, J.-F. Petiot^c et J. Gilbert^d

^aINRIA, 200 avenue de la vieille tour, 33405 Talence, France

^bÉcole Centrale de Nantes - GEM, 1 rue de la Noë, 44321 Nantes, France

^cEcole Centrale de Nantes - LS2N, 1 rue de la noë, 44321 Nantes, France

^dLAUM - UMR CNRS 6613, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans Cedex 9, France
robin.tournemenne@inria.fr

Dans le cadre de l'étude de la qualité des instruments de musique, nous avons optimisé, à partir de simulations sonores par modèle physique, la justesse de trompettes en faisant varier des paramètres géométriques de l'embouchure et de la branche d'embouchure. L'objectif de ce travail est de déterminer, par un test d'écoute des sons simulés, dans quelles mesures les différences entre la géométrie optimale et des géométries courantes sont perceptibles. Trois trompettes d'intérêt sont étudiées : la trompette optimale, la trompette de référence (trompette initiale lors de la procédure d'optimisation), et une trompette élémentaire (trompette admissible, mais dont la valeur de la justesse est faible). L'expérience perceptive est une épreuve d'écoute par paires de sons (same-different test) impliquant 32 participants (musiciens ou non). Deux épreuves sont proposées : l'évaluation des différences perceptives entre les 3 instruments étudiés, et l'évaluation des différences perceptives entre différents sons du même instrument. Les résultats de chaque participant pour chaque famille de sons sont représentés par la matrice de confusion de l'épreuve same-different, de laquelle différents indicateurs de performances issus de la théorie de détection du signal sont extraits. Les conclusions montrent que la trompette optimale et la trompette de référence présentent bien des différences perceptibles, les performances de détection des sujets musiciens étant par ailleurs significativement supérieures à celles des sujets non-musiciens.

1 Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude des qualités sonores des instruments à vent. Il se base sur des recherches antérieures, liées à l'optimisation de l'embouchure et de la branche d'embouchure de trompettes présentée dans [8]. La procédure d'optimisation de [8] repose sur des simulations sonores par modèle physique, obtenues par la technique de l'équilibrage harmonique. Les simulations sonores par équilibrage harmonique dépendant de l'instrument et aussi du musicien, la prise en compte du "musicien" lors de l'optimisation permet d'exploiter une famille de sons et d'intégrer de nouvelles variables de contrôle telles que la pression dans la bouche ou la fréquence de résonance des lèvres.

L'étude perceptive, présentée ci-après, est une étape complémentaire à cette procédure d'optimisation. En effet, la procédure optimise une fonction objectif (la justesse) basée sur des critères calculés à partir des résultats de simulations sonores : ce critère peut donc être défini objectivement. Or, in fine, c'est l'auditeur qui juge le son de l'instrument, sur une base de critères subjectifs. Il est donc légitime de se demander si les différences entre les perces optimales et des perces courantes sont perceptibles, pour justifier l'intérêt de l'optimisation.

Par conséquent, cette étude subjective cherche à évaluer si les différences de sons simulés entre les perces optimales et des perces courantes de l'espace de conception, sont effectivement perceptibles. Ce test est crucial, car si les différences n'étaient pas perçues, cela signifierait que l'optimisation joue de manière marginale sur la perce, et que les modifications sont inférieures au seuil de discrimination. L'optimisation n'aurait alors pas grand intérêt.

Le travail s'intéresse à un instrument de la famille des cuivres : la trompette. La question traitée est : l'auditeur distingue-t'il la trompette optimale d'autres trompettes d'intérêt de l'espace de conception ? En d'autres termes, la question est donc de déterminer si, étant donné l'espace de conception, la trompette optimale diffère d'autres trompettes admissibles d'intérêt.

La préférence pour un instrument ou un autre n'est pas évaluée dans cette expérience perceptive. En effet,

avant de s'intéresser à quel instrument est meilleur qu'un autre, il faut déterminer si l'on distingue les instruments entre eux (tâche de discrimination).

Les différences perceptives entre trois trompettes d'intérêt sont donc étudiées : la trompette optimale (présentée dans [8]), la trompette de référence (trompette initiale lors de la procédure d'optimisation), et une trompette qualifiée de "élémentaire" (trompette admissible, mais dont la justesse, définie arbitrairement par rapport au système bien tempéré, est faible). La comparaison trompette optimale/trompette élémentaire permet d'estimer si l'espace de conception considéré produit des trompettes présentant des différences perceptibles. La comparaison trompette optimale/trompette de référence permet d'estimer si la procédure d'optimisation a produit un instrument perceptivement différent.

L'expérience perceptive se divise en 2 épreuves :

- l'évaluation des différences perceptives entre les 3 instruments étudiés,
- l'évaluation des différences perceptives entre différents sons du même instrument.

Afin de traiter ces 2 épreuves, 32 participants ont répondu à un test d'écoute par paires (dit "same-different"). Les paires contiennent deux sons différents ou deux sons identiques et le participant doit déterminer la nature (sons différents ou identiques) de la paire entendue. Les résultats de chaque participant, à chaque famille de sons, sont classés dans des matrices de confusion [2] équivalentes à des relevés de notes, comptabilisant les réponses des sujets selon la nature de la paire.

Ensuite, ces matrices sont étudiées par l'intermédiaire de critères de discrimination, desquels émergent les conclusions de l'étude.

2 Contexte et objectifs

2.1 Rappel sur le problème optimisation

L'espace de conception considéré est celui défini dans [8]. Il est défini par 5 variables d'optimisation de la perce de la trompette : 1 variable est la profondeur

de l'embouchure et les 4 autres sont des rayons de la branche d'embouchure.

La fonction objectif est un descripteur de justesse présenté dans [8]. Ce descripteur est la moyenne des écarts au tempérament égal de chaque régime considéré par rapport à un régime de référence. 4 régimes de l'instrument sont considérés dans cette étude (regimes 2 (Bb3), 3 (F4), 4 (Bb4), 5 (D5) - concert pitch), le 4ème régime étant celui de référence pour l'accord de l'instrument. Les écarts au tempérament égal, pour une perce \mathbf{x} et chaque régime i , sont :

$$\text{ETD}(\mathbf{x}, i, \varphi) = \alpha_{ref \rightarrow i} - 1200 \cdot \log_2 \left(\frac{\overline{F_i(\mathbf{x}, \varphi)}}{\overline{F_{ref}(\mathbf{x}, \varphi)}} \right), \quad (1)$$

où $\overline{F_i}$ est la fréquence de jeu moyenne du régime i pour une population φ de sons. $\alpha_{ref \rightarrow i}$ est l'écart en cent attendu, entre le régime de référence et le régime considéré. Cet écart théorique est comparé à l'écart mesuré entre les simulations des deux régimes. φ représente la population de sons simulés permettant de calculer les valeurs moyennes. Par conséquent, la fonction objectif décrivant la justesse de l'instrument sur les différents régimes a la forme décrite par l'Équation 2 :

$$J(\mathbf{x}, \varphi) = \frac{|\text{ETD}(\mathbf{x}, 2, \varphi)| + |\text{ETD}(\mathbf{x}, 3, \varphi)| + |\text{ETD}(\mathbf{x}, 5, \varphi)|}{3}. \quad (2)$$

2.2 Trompettes considérées et valeurs de la fonction objectif

Les impédances d'entrée des trompettes ont été calculées par la méthode des matrices de transfert. Trois trompettes sont considérées dans notre expérience perceptive :

- une modélisation en éléments géométriques simples de la trompette de référence (désignée par le label T_{ref} par la suite) correspondant à la perce d'un modèle Yamaha 6335 avec une embouchure de dimensions correspondant à la Yamaha 15C4 (mesurées par nos soins),
- la trompette optimale obtenue en partant de la trompette de référence et après optimisation sur le cas d'étude à 5 variables (T_{opt}) [8],
- une trompette "élémentaire" choisie arbitrairement dans l'espace de conception T_{ele} . Cette trompette a été choisie, car elle présente une valeur forte de la fonction objectif (trompette plutôt fausse), voir Figure 2.

Les trois trompettes sont identiques en tout point sauf selon la profondeur de l'embouchure et les 4 rayons définissant la branche d'embouchure. Le Tableau 1 résume les valeurs des variables de chaque trompette et leur profil est dessiné Figure 1.

Les fonctions objectif caractérisant l'écart au tempérament égal et leur décomposition sur chaque régime de chacune des trompettes sont présentées Figure 2 (les valeurs sont obtenues à partir des

TABLEAU 1 – valeurs des 5 paramètres géométriques de chaque perce : la profondeur de l'embouchure L1 et les 4 rayons consécutifs de la branche d'embouchure R1 à R4 (en mm)

en mm	L1	R1	R2	R3	R4
T_{ele}	3,5	5,63	6	6,1	6,2
T_{ref}	2,3	4,93	5,3	5,58	5,72
T_{opt}	2,62	5,93	3,95	5,97	6

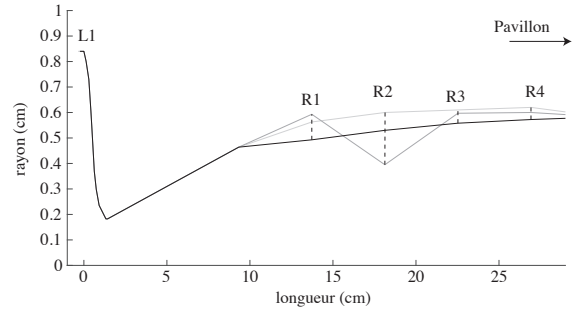


FIGURE 1 – définition géométrique de chaque perce permettant d'observer les paramètres L1, R1, R2, R3, R4. Chaque nuance de gris correspond à une perce : noir trompette de référence, gris foncé trompette optimale et gris clair trompette élémentaire.

fréquences de jeu moyennes de 1000 simulations par régime par trompette, voir paragraphe 3.2). L'instrument optimal a une différence moyenne de 6,7

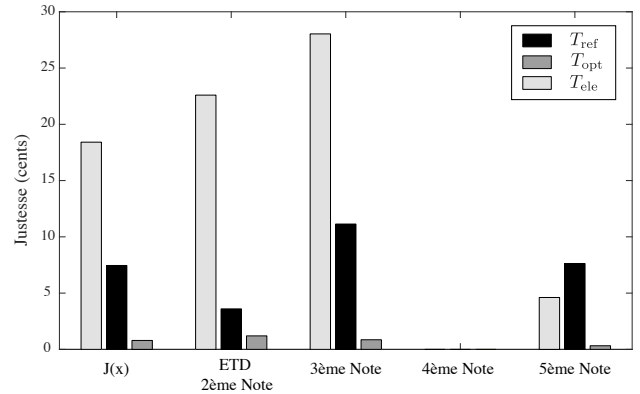


FIGURE 2 – Détail de la fonction objectif (colonnes de gauche nommée $J(\mathbf{x})$ et de chacun des ETDs (autres colonnes). Chaque couleur correspond à une perce : noir, trompette de référence, gris foncé, trompette optimale et gris clair, trompette élémentaire.

cents par rapport à l'instrument de référence. Pour les régimes 3 et 5 cette différence est marquée (10,3 et 7,3 cents de moins respectivement). Cependant, le régime 2 étant déjà suffisamment "juste" pour l'instrument de référence, on constate que l'optimisation n'a que peu amélioré la justesse. À moins que, par hasard, le timbre de l'instrument optimal soit fort différent de l'instrument de référence, il y a peu de chance que les participants entendent une différence entre les deux sons du deuxième régime. La trompette élémentaire est moins "juste" que la trompette de référence sur tous les régimes sauf le 5. Le régime 5 étant relativement

”juste”, il est de même peu probable que les sujets puissent distinguer l’instrument optimal de l’instrument élémentaire à ce régime. Ces graphiques nous laissent présager des différences perceptives, que les tâches de discriminations vont permettre de conforter et de quantifier.

2.3 Objectifs de l’étude perceptive

Les différences objectives de justesse entre les trois trompettes ont été présentées. Il convient maintenant de déterminer si ces différences sont perçues ou non. Ainsi, pour les deux couples, instrument optimal et instrument élémentaire, instrument optimal et instrument de référence, un test perceptif de discrimination étudie les différences perçues pour chaque régime d’intérêt. Les régimes d’intérêt sont les régimes 2, 3 et 5 puisque le régime 4 est celui de référence servant d’accord aux trois instruments. Ces tests perceptifs entrepris sur les deux couples pour les trois régimes permettront de conclure de l’intérêt de l’optimisation basée sur des simulations sonores par modèle physique et de la pertinence de l’espace de conception. Ils sont nommés test inter-instruments. Des différences perçues entre l’instrument optimal et l’instrument élémentaire signifieront que l’espace de conception est assez large pour présenter des différences perceptibles. Des différences entre l’instrument optimal et l’instrument de référence confirmeront l’intérêt global des optimisations fines de la perce et du problème d’optimisation. L’intérêt de l’épreuve de discrimination entre l’instrument de référence et l’instrument optimal est double, puisque l’instrument de référence est la représentation d’une trompette du commerce (Yamaha 6335, embouchure 15C4). Ceci nous permet de savoir si notre méthodologie pourrait faire évoluer un instrument réel.

Il faut noter que le protocole mis en place ne permet pas de juger de la qualité finale des instruments optimisés : pour cela il faudrait construire les instruments optimaux, et vérifier qu’ils sont effectivement perçus par des musiciens comme plus justes que des instruments de référence.

Pour chaque régime k , il existe une multitude de sons possibles correspondant à l’ensemble de valeurs des paramètres du masque musicien menant à l’auto-oscillation. Ces sons permettent de déduire des valeurs moyennes de fréquence de jeu, afin de calculer la fonction objectif de justesse. L’expérience perceptive de discrimination ne considère qu’un échantillon sonore par régime et par instrument. C’est pourquoi, pour chaque régime k et chaque instrument, nous nous appuyons sur le son moyen, synthétisé à partir d’un ensemble de sons, obtenu par un tirage aléatoire (1000 sons) des paramètres du masque du musicien admissibles. Ce choix étant naturel mais arbitraire, il faut s’assurer qu’il représente largement les sons dont il est issu. C’est pourquoi la seconde partie du test perceptif, dit intra-instrument, compare le son moyen à certains représentants de la population de sons simulés. Ces représentants se distinguent du son moyen selon leur fréquence de jeu ou leur contenu spectral. Le test de discrimination cherchera à savoir, si, à un régime donné, le son moyen est suffisamment

proche perceptivement des autres échantillons sonores représentant la population. En effet, cela justifierait le choix du son moyen comme unique échantillon sonore représentant l’instrument. Si, pour les échantillons sonores les plus extrêmes de la population de sons, une différence est perçue, cela confirmera aussi l’intérêt de la méthode d’optimisation basée sur un groupe de masques d’intérêt. En effet, cela voudra dire que bien que la variabilité induite par les différents masques est maîtrisée, certains masques d’intérêt produisent tout de même une diversité perceptible.

La partie de l’expérience concernant le test intra-instrument n’existe que pour s’assurer de la validité du test inter-instruments et est disponible dans [7] Pour la suite de cette étude, au vu des résultats du test intra-instrument, on peut considérer que les sons moyens sont de bons représentants de chaque régime de chaque instrument.

3 Matériel et méthode

3.1 Description du test perceptif

Le test perceptif est un test dit “Same-Different” [3]. Il présente les sons au sujet sous forme de paires. Une paire peut comporter deux sons identiques ou deux sons différents. L’objectif du participant est alors d’indiquer si les deux sons entendus sont identiques ou différents. Concernant les tests inter-instruments pour chacune des deux comparaisons (optimal contre élémentaire, optimal contre référence) les paires sont construites pour les régimes 2, 3 et 5. Chacune des paires contient deux sons moyens (voir paragraphe précédent), représentant les instruments au régime donné.

Quatre paires sont construites, pour chaque comparaison entre l’instrument A et B de chaque régime :

- la paire contenant le son moyen de l’instru. A puis le son moyen de l’instru. B,
- la paire contenant le son moyen de l’instru. B puis le son moyen de l’instru. A,
- la paire contenant deux fois le son moyen de l’instrument A,
- la paire contenant deux fois le son moyen de l’instrument B.

L’expérience est donc équilibrée entre paires de sons différents et paires de sons identiques, et chaque paire est répétée quatre fois, voir Tableau 2. L’instrument optimal est présent dans les deux comparaisons. Par conséquent, la paire son moyen instrument optimal - son moyen instrument optimal est présente dans les deux comparaisons. Il est donc inutile de la faire écouter 8 fois : on peut utiliser pour les deux comparaisons les 4 mêmes écoutes de la paire. Ainsi, les tests inter-instruments font intervenir (4 paires \times 3 régimes \times 2 comparaisons inter-instruments \times 4 répétitions) - (1 paire \times 3 régimes \times 4 répétitions) = 84 paires.

TABLEAU 2 – Définition des paires de sons moyens présentées pour un test inter-instrument au régime 2. Les paires sont répétées 4 fois, ce qui est représenté par 4 "x". En reproduisant ce tableau par 3 régimes (2, 3, 5), on obtient bien $(7 \times 4) \times 3 = 84$ paires.

Régime2	T_{opt}	T_{ref}	T_{ele}
T_{opt}	xxxx	xxxx	xxxx
T_{ref}	xxxx	xxxx	
T_{ele}	xxxx		xxxx

Par ailleurs, le test intra-instrument présente 144 paires, voir [7]. Par conséquent, chaque sujet doit évaluer 228 paires de sons (84+144). Pour chaque participant les 228 paires sont présentées aléatoirement ce qui contrôle l'effet d'ordre.

3.2 Stimuli : les sons moyens

Comme indiqué précédemment, seuls les régimes 2, 3 et 5 sont présentés dans le test, car le régime 4 sert de note d'accord des trompettes. Pour les trois régimes d'intérêt, un son moyen est retenu pour chaque trompette : ces sons serviront pour le test inter-instrument et intra-instrument.

Les sons moyens sont obtenus grâce à la simulation de 1000 sons pour chacun des régimes 2, 3, 4, et 5 par la méthode de l'équilibrage harmonique, voir [7]. Chaque groupe de 1000 sons est appelé population.

La fréquence moyenne de jeu et l'amplitude moyenne des harmoniques sont calculées à un régime donné, à partir des 1000 simulations. La fréquence de jeu du régime 4 de l'instrument de référence est la fréquence d'accord. Par conséquent, pour l'instrument optimal et l'instrument élémentaire, les fréquences des régimes 2, 3 et 5 sont accordées du nombre de cents entre la fréquence du régime 4 de l'instrument considéré et celle de l'instrument de référence. Un son d'une durée de 0,75 seconde est finalement créé par synthèse additive. Il est complété par des transitoires d'attaque et d'extinction de 50 ms afin d'éviter des effets intempestifs des hauts parleurs liés aux transitoires. C'est ainsi que sont créés les 9 sons moyens (3 instruments x 3 régimes).

3.3 Déroulement du test

Avant le test proprement dit, ses objectifs et son déroulement sont expliqués aux participants. Les participants s'exercent à l'aide de 4 paires en marge des 228 paires du test perceptif. Ensuite, les 228 paires sont présentées aléatoirement, et sont évaluées l'une après l'autre par le sujet. Le test dure approximativement 40 minutes, avec une pause obligatoire d'environ 5 minutes après la 114ème paire, soit à la moitié du test. Le participant peut écouter une paire autant de fois qu'il le désire avant de se prononcer. Il lui est cependant conseillé d'écouter au maximum 3 fois la paire avant de répondre. Le test et son analyse sont programmés sur Matlab, voir Figure 3. À chaque écoute, les deux sons d'une paire sont entrecoupés d'une pause de 0,25 seconde.

32 participants ont pris part à l'expérience perceptive :

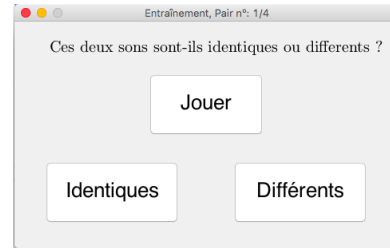


FIGURE 3 – Interface du test "same-different".

- 9 filles, 23 garçons,
- 16 non-musiciens (personne n'ayant jamais appris d'instrument de musique), 16 musiciens (personne pratiquant un instrument depuis plus de 10 ans).

3.4 Méthode d'analyse

La méthode d'analyse des résultats est similaire à celle utilisée par [1]. Les résultats du test "Same-Different" sont examinés à l'aide de matrices de confusion (voir Figure 4) [2].

		paires		
		différent	identique	
réponses participants	différent	vrai positif (VP) 7	fausse alarme (FP) 2	
	identique	omission (FN) 1	vrai négatif (VN) 6	
		Sensibilité (H) $\frac{VP}{FN+VP}=0,875$	Ratio fausses alarmes (RFA) $\frac{FP}{FP+VN}=0,25$	$d' = Z(H) - Z(RFA)$ 1,82

FIGURE 4 – Exemple d'une matrice de confusion du test "same-different" pour une des 24 comparaisons de cette expérience. La sensibilité, le ratio de fausses alarmes et d' sont calculés.

Les matrices de confusion de notre étude, de taille 2×2 , résument les choix des participants selon la nature des paires présentées. Il y a autant de matrices que de comparaisons/épreuves présentées, soit 24 matrices dans notre cas ((2 comparaisons inter + 4 comparaisons intra) \times (3 régimes + tous régimes confondus)). Les matrices tous régimes confondus sont construites en agrégeant les résultats de chaque régime. Les colonnes de la matrice de confusion représentent la condition, c'est-à-dire la nature des sons présentés; les lignes représentent la réponse du participant. Les matrices de confusion permettent notamment d'identifier les fausses alarmes et les omissions. Les fausses alarmes : lorsque le participant répond qu'une paire contient deux sons différents alors qu'ils sont identiques - case en haut à droite de la matrice. Les fausses alarmes sont aussi appelées des fausses détections. Les omissions : lorsque le participant considère les sons identiques alors qu'ils diffèrent - case en bas à gauche des matrices. Étant donné que chaque paire est présentée 4 fois, et qu'il y a 2 jeux de paires de sons différents (AB, BA) et 2 jeux de paires de sons identiques (AA, BB), les scores possibles dans chaque case de chaque matrice de confusion vont de 0 à 8.

De ces fausses alarmes et omissions sont calculés :

- la sensibilité (H), qui est la capacité à identifier les paires de sons différents,

$$H = \frac{VP}{VP + FN}, \quad (3)$$

- le ratio de fausses alarmes (RFA), qui représente le biais du sujet,

$$RFA = \frac{FP}{VN + FP}. \quad (4)$$

Par ailleurs, on utilise l'indice de discrimination d' qui juge de la facilité avec laquelle le sujet a détecté la nature de chaque paire. Plus d' est élevé, plus le sujet identifie bien chaque paire. Cet indice de discrimination est issu de la théorie de détection du signal (SDT *signal detection theory*) [4]. d' est calculé pour chaque épreuve de chaque sujet à partir des Z-scores de H et de RFA (fonction de répartition inverse de la loi normale centrée réduite) :

$$d' = Z(H) - Z(RFA) \quad (5)$$

Dans un cadre général, un sujet dont les performances sont excellentes ($H=0.99$ et $RFA=0.01$) a un d' égal à 4.65. En pratique, les d' sont généralement inférieurs à 2 [4]. Si un sujet réussit à identifier 69% des paires de sons différents et 69% des paires de sons identiques alors $d' = 1$.

Pour cette étude perceptive, nous considérons que le participant distingue les sons d'une épreuve si d' est supérieur à 1 [5, 9].

4 Résultats

Lors du dépouillement des résultats, il est apparu qualitativement que les musiciens avaient des résultats sensiblement meilleurs que les non-musiciens. Des tests utilisant l'analyse de la variance (ANOVA) effectuées sur la mesure de d' confirment l'impact de ce facteur "musicien", voir [7]. Nous avons donc décidé de distinguer les résultats entre musiciens et non-musiciens.

Les indices d' moyennés sur les sujets appartenant au groupe musicien ou non-musicien, selon les épreuves, sont répertoriés dans le Tableau 3.

TABLEAU 3 – d' moyens (ceux supérieur à 1 sont en gras).

		Tous Rég.	Rég. 2	Rég. 3	Rég. 5
T_{opt}/T_{ref}	musi.	1,52	1,04	1,74	1,78
	non-musi.	0,79	0,45	0,76	1,17
T_{opt}/T_{ele}	musi.	1,86	1,91	2,2	1,48
	non-musi.	1,26	1,53	1,63	0,61

Une différence notable est observée pour l'épreuve de discrimination entre T_{opt} et T_{ref} : les musiciens distinguent mieux que les non-musiciens les sons de cette paire d'instruments proches.

Pour chaque facteur expérimental, tous participants confondus, la Figure 5 compare la distribution des d' des épreuves inter-instruments entre tous les régimes. Ce graphique sert à observer la position des d'

la droite horizontale $d' = 1$. Si la boîte à moustaches est sensiblement au-dessus de 1, alors on peut conclure que les deux sons de la comparaison ont été bien discriminés.

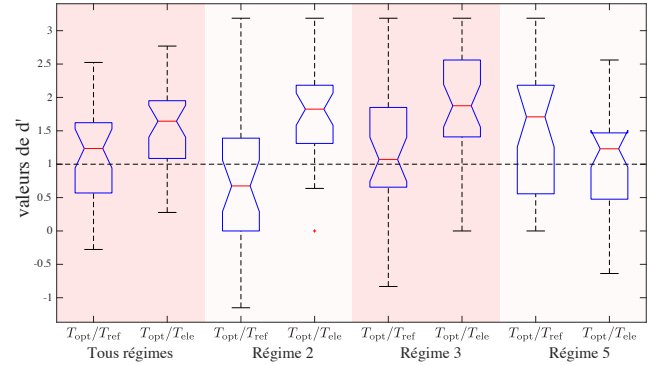


FIGURE 5 – Boîte à moustaches des d' liés aux comparaisons inter-instruments selon les régimes sans distinction musiciens/non-musiciens. La ligne horizontale noire en pointillés correspond au seuil de détection de d' qui est de 1.

Pour chaque régime, on se rend compte que les boîtes à moustaches des comparaisons entre T_{opt} et T_{ele} sont sensiblement plus hautes que celles des comparaisons entre T_{opt} et T_{ref} sauf pour le régime 5. Comme l'analyse objective le laissait présager (Figure 2), les sujets ont donc en général mieux distingué T_{ele} de T_{opt} que T_{ref} de T_{opt} .

4.0.1 Analyse des d'

Comparaison entre T_{opt} et T_{ele}

En ce qui concerne la comparaison entre T_{opt} et T_{ele} , la Figure 5 montre que la plupart des d' des sujets se situe au-dessus de la valeur 1, identifiée par la ligne noire pointillée.

Le Tableau 3, permet de distinguer les différences entre le groupe musicien et le groupe non-musicien. On observe que les d' moyens tous régimes confondus ($d' = 1,86$ musicien (M) et $d' = 1,26$ non-musicien (N-M)), régime 2 (**1,91 M 1,53 N-M**) et régime 3 (**2,2 M 1,63 N-M**) sont supérieurs à 1 quel que soit le groupe considéré. On note toutefois que les musiciens ont toujours des scores supérieurs aux non-musiciens. Par ailleurs, cette différence est particulièrement importante pour le régime 5 (**1,48 M 0,61 N-M**), où seul le groupe musicien a en moyenne un d' supérieur à 1.

Ainsi, les instruments T_{opt} et T_{ele} semblent être bien distingués. Les résultats de l'épreuve perceptive de chaque régime sont en accord avec les différences observées par le descripteur de justesse Figure 2 : il y a une grande différence entre les deux instruments aux régimes 2 et 3 (>20 cents et >25 cents) mais une différence faible au régime 5 (<5 cents). Enfin, le fait que les régimes 2 et 3 présentent des différences nettement perceptibles, nous assure que l'espace de conception utilisé permet de créer des perces dont les qualités sonores sont distinguables.

Comparaison entre T_{opt} et T_{ref}

En ce qui concerne les épreuves entre l'instrument optimal et l'instrument de référence, la Figure 5 présente des différences moins nettes. En effet, quel que soit le régime observé, les boîtes à moustaches sont toutes nettement à cheval sur la ligne $d' = 1$.

Le Tableau 3 permet d'obtenir plus d'information : les musiciens ont bien mieux répondu à ces épreuves que les non-musiciens. En effet, tous régimes confondus (**1,52** M et 0,79 N-M), au régime 2 (**1,04** M et 0,45 N-M) et au régime 3 (**1,74** M et 0,76 N-M), les non-musiciens présentent des d' moyens inférieurs à 1, alors que les musiciens obtiennent des d' moyens supérieurs à 1. Le régime 5, par contre, présente des d' moyens supérieurs à 1 pour les deux groupes (**1,78** M et **1,17** N-M).

Ainsi, les instruments T_{opt} et T_{ref} ont tendance à être bien distingués par les musiciens alors qu'il sont plutôt mal distingués par les non-musiciens (seuls les sons du régime 5 sont distingués). Le fait que les performances sont moins bonnes que pour le couple d'instruments $T_{\text{opt}} / T_{\text{ele}}$ est logique puisque T_{ref} est plus proche en terme de justesse de T_{obj} que de T_{ele} . La comparaison avec le descripteur de justesse régime par régime est cependant moins évidente (voir Figure 2). En effet, le régime 2 présentait une différence de moins de 5 cents (le seuil de discrimination généralement considéré entre deux sons purs [6]) entre les deux trompettes, et pourtant, les musiciens ont réussi à distinguer ces sons. Cela laisse supposer qu'il y aurait des différences de timbre qui, s'additionnant à la différence de fréquence de jeu, permettent aux auditeurs musiciens de percevoir une différence de qualité sonore.

Par ailleurs, la différence de fréquence de jeu des instruments au régime 3 est plus grande que celle du régime 5 (toutes deux supérieures à 5 cents), on s'attend donc à ce que les non-musiciens, qui ont distingué les deux trompettes au régime 5, les distinguent au régime 3. Malgré tout, ce n'est pas le cas, ce qui semble sous-entendre que les différences de timbre entre les instruments est plus grande au régime 5 qu'au régime 3. Il faut, cependant, nuancer cette observation, car le groupe musicien a détecté les différences entre les régimes 3 et 5 de la même manière ($d' = \mathbf{1,74}$ et $d' = \mathbf{1,78}$). Pour lever, cette ambiguïté, il faudrait faire plus de répétitions pour chaque paire présentée.

Finalement, les différences perceptives observées (tous les régimes pour les musiciens et le régime 5 pour les non-musiciens) atteste de l'intérêt qu'ont les optimisations de la perce basées sur les simulations sonores.

5 Conclusion

Cette étude a montré l'intérêt, d'un point de vue perceptif, des optimisations de perce basées sur des simulations par modèle physique. Les différences entre trois trompettes T_{opt} , T_{ref} et T_{ele} ont été évaluées, par l'intermédiaire d'une expérience perceptive. Les différences perçues par les sujets confirment l'intérêt de l'espace de conception, ainsi que l'intérêt du résultat de la procédure d'optimisation. On pourrait perfectionner cette étude perceptive afin de la rendre systématique à chaque problème d'optimisation traité. Cette première

étape, visant à savoir si nous percevons des différences entre les instruments produits par l'optimisation, ayant passé l'épreuve de l'expérience, on pourrait maintenant s'intéresser à des tests de préférence. En effet, pour valider l'intérêt de l'optimum, il faudrait vérifier que la qualité sonore optimisée est perçue comme telle par les auditeurs. Enfin, la perspective majeure de cette seconde partie est la mise en place d'expériences perceptives sur des sons issus des instruments réels. La difficulté principale, outre la fabrication des trompettes, est la mise en place d'un protocole prenant en compte la variabilité des musiciens réels.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble des sujets qui ont pris part à cette expérience perceptive.

Références

- [1] Trevor R Agus, Simon J Thorpe, and Daniel Pressnitzer. Rapid formation of robust auditory memories : insights from noise. *Neuron*, 66(4) :610–618, 2010.
- [2] Jon Boley and Michael Lester. Statistical analysis of abx results using signal detection theory. In *Audio Engineering Society Convention 127*, 2009.
- [3] Harry T Lawless. *Quantitative sensory analysis : Psychophysics, models and intelligent design*. John Wiley & Sons, 2013.
- [4] Neil A Macmillan and C Douglas Creelman. *Detection theory : A user's guide*. Psychology press, 2004.
- [5] Michael O'Mahony et al. Discrimination testing : a few ideas, old and new. *Food Quality and Preference*, 14(2) :157–164, 2003.
- [6] Thomas D Rossing, F Richard Moore, and Paul A Wheeler. *The science of sound*, volume 3. Addison Wesley San Francisco, 2002.
- [7] Robin Tournemenne. *Optimisation d'un instrument de musique de type cuivre basée sur des simulations sonores par modèle physique*. Theses, École centrale de Nantes, June 2017.
- [8] Robin Tournemenne, Bastien Talgorn, Jef Petiot, and Michael Kokkolaras. Brass instruments design using physics-based sound simulation models and surrogate-assisted derivative-free optimization. In *International Design Engineering Technical Conferences*, 2016.
- [9] Robert J Zatorre. Discrimination and recognition of tonal melodies after unilateral cerebral excisions. *Neuropsychologia*, 23(1) :31–41, 1985.