



HAL
open science

Évaluation perceptive du niveau de quantification d'un signal vibrotactile

Quentin Consigny, Arthur Paté, Jean-Loïc Le Carrou

► **To cite this version:**

Quentin Consigny, Arthur Paté, Jean-Loïc Le Carrou. Évaluation perceptive du niveau de quantification d'un signal vibrotactile. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03848535

HAL Id: hal-03848535

<https://hal.science/hal-03848535>

Submitted on 10 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



16^{ème} Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Évaluation perceptive du niveau de quantification d'un signal vibrotactile

Q. Consigny ^a, A. Paté ^b, J-L. Le Carrou ^a

^a Sorbonne Université, CNRS, Institut d'Alembert UMR 7109, LAM, Paris France

^b Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Univ. Polytechnique Hauts-de-France, Junia, UMR 8520 - IEMN, F-59000 Lille, France,



Les similarités entre les signaux audios et vibrotactiles nous amènent naturellement à comparer nos capacités à les appréhender (discrimination fréquentielle, courbes d'iso-sensibilité. . .). L'utilisation de technologies (transducteurs électrodynamiques) proches dans les deux domaines renforce les occasions d'effectuer des comparaisons. Lors de la numérisation des signaux audio, une quantification sur 24 bits est souvent réalisée. Ce niveau de quantification permet de limiter sa perceptibilité. Cependant, la numérisation sur un grand nombre de bits demande l'usage de matériels adaptés. La pertinence d'utiliser des hauts niveaux de quantification se pose donc régulièrement. Pour un même signal, toutes les variations de signal (spectrale, d'amplitude. . .) perceptibles au toucher le seront auditivement. En revanche, des variations perceptibles auditivement ne le sont pas forcément au toucher. On peut donc légitimement penser que des niveaux de quantifications plus faibles (8 voire 4 bits) pour un même signal pourraient être perceptibles en diffusion audio sans l'être sur le canal vibrotactile. Nous proposons d'évaluer les seuils de discrimination de signaux vibrotactiles quantifiés sur différents niveaux. Pour cela, nous utilisons un système vibrotactile créé dans le cadre du projet de recherche Staccato, et un protocole de tests perceptifs habituel issu de l'audio. Les résultats montrent que le niveau de quantification des signaux vibrotactiles (comparés à ceux des signaux audio) pourrait être diminué sans que la différence soit perceptible au toucher. Certaines technologies destinées aux systèmes embarqués (convertisseurs analogique-numérique de quelques bits par exemple) pourraient donc être utilisées en diffusion vibrotactile sans que cela perturbe la perception du signal, levant ainsi la contrainte du matériel adapté précédemment évoquée.

1 Introduction

Les signaux vibrotactiles sont des vibrations destinées à être perçues grâce au sens du toucher. D'un point de vue physique, ces signaux sont assimilables à un signal audio. Ce sont des signaux temporels à une dimension et au spectre classiquement compris entre 20 Hz et 1 kHz [1]. On a donc l'habitude de transposer directement de l'audio au vibrotactile les méthodes de synthèse et d'analyse, de tests perceptifs, et même le matériel de diffusion. On retrouve maintenant dans l'étude des signaux vibrotactile des notions jusqu'ici propres à l'analyse psycho-acoustique des signaux audios. Le timbre vibrotactile a par exemple été considéré [2, 3], la définition d'une brillance vibrotactile a été tentée [4]. Mais cette analogie présente des limites. En plus des plages de sensibilité en fréquence [5, 6] et en amplitude [1] la physiologie du toucher impose une limite de « performance » à notre perception. Parmi ces limites, la discrimination fréquentielle s'avère plus performante à l'ouïe (avec un seuil à 0.1%) [7] qu'au toucher [8] (avec un seuil d'au moins 10%).

Dans le cadre du projet ANR Staccato¹ nous sommes amenés à fabriquer des bracelets vibrotactiles (voir figures 1 et 2) à travers lesquels sont diffusés des signaux sur les poignets de participants. Les transducteurs utilisés² pour cette diffusion ont un fonctionnement similaire à celui des haut-parleurs à bobine mobile. Ces signaux vibrotactiles sont quantifiés au niveau³ maximum possible par notre carte-son : 24 bits. Ce niveau de quantification répond aux exigences classiques de diffusion de signaux audio, mais amène également des contraintes matérielles. Les cartes son 24 bits sont, en effet, difficiles à intégrer à dans un dispositif portable et autonome, et leur consommation d'énergie et leur coût sont importants. Or, de telles fonctionnalités sont requises pour tout dispositif vibrotactile ayant vocation à être

utilisé dans des conditions « écologiques », car le dispositif en contact avec le corps ne doit pas limiter les activités et mouvements du participant.

Les limites physiologiques précédemment évoquées laissent penser que les contraintes de haute-fidélité issues du domaine de l'audio pourraient être allégées sans que cela soit perceptible. Pour cela l'utilisation de cartes son avec des niveaux de quantification plus faibles est envisagée. On trouve des convertisseurs numérique-analogique (DAC pour « digital to analog converter ») de 2, 4, 8 et 16 bits. . . avec des fréquences d'échantillonnage largement satisfaisantes, qui pourraient grandement faciliter la conception de systèmes vibrotactiles.

Cette étude propose d'investiguer la perception de différents niveaux de quantification pour des signaux vibrotactiles.

Lors de tests préliminaires, nous avons remarqué que les signaux quantifiés sur 16 et 24 bits sont systématiquement confondus. On peut légitimement penser qu'à partir d'un certain niveau de quantification (inférieur ou égal à 16 bits dans notre cas), le signal numérisé est perceptivement identique à un signal analogique. L'augmentation du nombre de bits de quantification est alors, sur le plan perceptif, sans effet. Nous avons donc décidé de travailler avec un niveau de quantification maximal de 16 bits, considérant les signaux quantifiés à ce niveau comme des signaux « pseudo-analogiques ». Notre hypothèse de départ est que cette limite de niveau « pseudo-analogique » peut-être encore diminuée.

Les signaux seront diffusés sur les bracelets vibrotactile utilisés dans le projet ANR Staccato. La bibliographie fait état d'une modification du comportement des transducteurs électrodynamiques lorsque ceux-ci sont soumis à une pression [9]. De plus, sur le plan physiologique, une pression exercée sur la peau modifie les seuils de perception vibrotactile [10]. Lors de tests préliminaires, nous avons eu l'occasion d'expérimenter ces phénomènes avec nos dispositifs. Nous avons donc réalisé chaque mesure avec 3 serrages différents afin d'observer si ce paramètre modifie la perception des signaux numérisés.

1. <https://anr.fr/Projet-ANR-19-CE38-0008>

2. DAEX13ct de Dayton Audio

3. On entend par « niveau de quantification » le nombre de bits utilisés pour le codage (classiquement 16 ou 24 bits dans l'audio). Augmenter ce niveau reviendrait à augmenter la ressemblance avec un signal analogique.

2 Méthodes expérimentales

2.1 Matériel

Après avoir été générés via un programme Python⁴, les signaux utilisés dans cette expérience sont stockés sous un format WAV de 24 bits.

Les signaux sont ensuite diffusés grâce à une carte son FX-AUDIO FX01 utilisant un PCM5102 24bit possédant une fréquence d'échantillonnage de 96 kHz. Ils sont alors amplifiés via un amplificateur FX1002A pour être enfin diffusés à travers des transducteurs DAEX13CT-4. Le volume de sortie est le même pour l'ensemble des participants. Il a été fixé après quelques tests préliminaires entre chercheurs. Ce volume permet de ressentir sans difficulté les signaux vibrotactiles sans que ceux-ci soient perceptibles à l'oreille (avec les bouchons et le bruit, voir section 2.3).

Le participant utilise un contrôleur MIDI Launchpad Novation MK2 (voir figure 3) pour déclencher les signaux et indiquer s'ils sont perçus comme identiques ou différents. Les touches (A et B) lui permettent de déclencher la lecture des signaux, et les 2 autres (égaux et différents) permettent de répondre à la question : « Les signaux A et B sont-ils perçus comme identiques ou différents ? ». La figure 3 illustre ce fonctionnement et la figure 4 le fonctionnement global.

On rappelle que contrairement à l'ouïe, la forme des courbes d'iso-sensibilité vibrotactile est indépendante de l'intensité des signaux, le volume choisi pour la diffusion des signaux n'impacte donc a priori pas la courbe de sensibilité [11].



FIGURE 1 – Bracelet vibrotactile utilisé dans le projet Staccato

2.2 Signaux

Les signaux utilisés sont des sinus à 45, 135 et 225 Hz, quantifiés sur 2, 4, 8, et 16 bits. Leur durée est de 1,5 seconde.

Les courbes d'iso-sensibilité vibrotactile [11] mettent en évidence que le niveau perçu d'un signal dépend de sa fréquence. Nous avons donc adapté l'amplitude des signaux pour chaque fréquence dans l'objectif de normaliser le niveau perçu entre les différents sinus par inversion des courbes d'isosensibilité de [11]. La fréquence de 45 Hz se

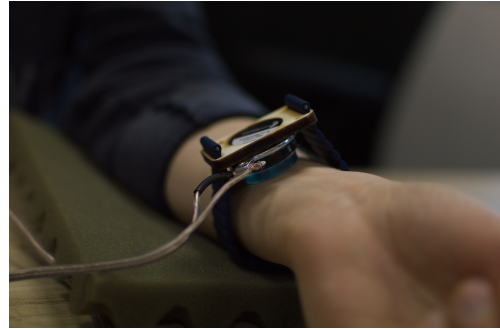


FIGURE 2 – Vibreur fixé sur le poignet d'une participante à l'aide du bracelet.



FIGURE 3 – Interface de contrôle

situé à la limite basse du spectre de sensibilité vibrotactile. Celle de 225 Hz est proche du maximum de sensibilité. La fréquence de 135 Hz complète la série des harmoniques impaires de 45 Hz : 45, 135, 225 Hz (voir section 4.1).

2.3 Tâche à effectuer

Le bracelet est fixé sur le poignet du participant (voir figure 3), le vibreur sur la face interne, le cran utilisé pour fixer le dispositif est noté par le chercheur. L'expérience est reproduite pour 3 serrages différents (standard, augmenté et diminué) afin d'observer une éventuelle influence du serrage sur la perception du niveau de quantification.

Il est demandé au participant d'utiliser le contrôleur MIDI avec la main avec laquelle il se sent le plus à l'aise. Le vibreur est fixé sur le bras opposé. On demande au participant de garder le bras détendu, la paume de la main ouverte orienté vers le haut.

Le participant peut déclencher, grâce au contrôleur MIDI (boutons bleus sur la figure 3), la lecture de chaque élément de la paire à comparer. Cette lecture peut être répétée autant de fois que voulu. Après avoir ressenti au moins une fois chaque signal, le participant indique alors s'il perçoit ces signaux comme « identiques » ou « différents » via cette même interface (boutons orange sur la figure 3).

4. Version 3.8.10 et librairie Scipy 1.5.3

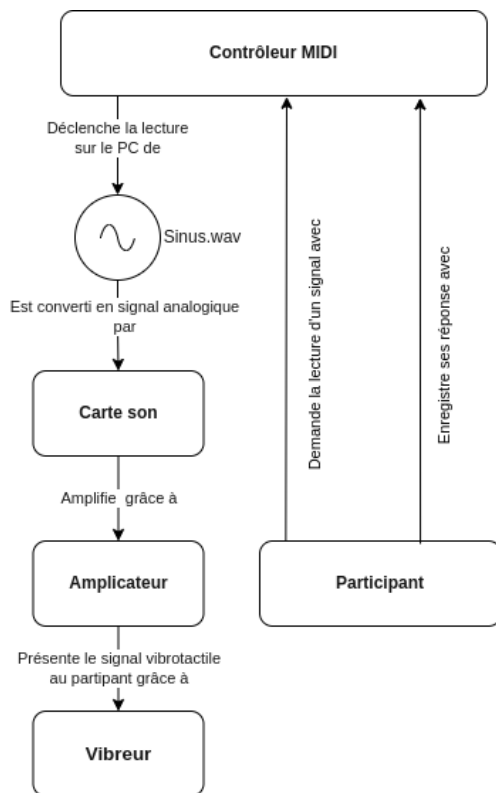


FIGURE 4 – Schéma de fonctionnement du dispositif

Une fois la réponse enregistrée, une nouvelle paire lui est présentée. Sont comparés uniquement les signaux de même fréquence. Pour chaque fréquence cela représente 10 couples (chacun des 4 niveaux de quantification est appairé à chacun des autres ainsi qu'avec lui-même, cela fait donc 4+3+2+1 couples, soit 10 couples). Chaque couple est présenté 2 fois (dans un sens puis dans l'autre). Vingt comparaisons sont donc effectuées pour chaque fréquence. Les comparaisons associées aux 3 fréquences sont réalisées dans la même série. Une série est donc composée de 60 comparaisons. L'ordre des paires a été rendu aléatoire et équilibré grâce à un carré latin.

A la fin de chaque série, on modifie le serrage du bracelet et une nouvelle série est commencée. Durant toutes l'expérience, le participant est donc amené à réaliser 180 comparaisons, ce qui prend typiquement une trentaine de minutes.

Afin de masquer le bruit produit par ces vibreurs, les participants doivent porter des bouchons d'oreilles (3M™1100) ainsi qu'un casque audio diffusant un bruit rose (sur la bande 20 Hz - 22kHz).

2.4 Participants

Pour l'instant, 11 personnes ont participé à cette expérience. Elles sont âgées de 16 à 60 ans, l'âge moyen est de 27,1 ans et l'écart-type de 11 ans.

3 Résultats

Pour l'ensemble des résultats présentés, on notera le rapport entre le nombre de fois que les signaux quantifiés sur i et j bits sont perçus comme identique, et le nombre total de fois qu'ils ont été présentés $C_{i,j}$, voir l'équation 1. L'indice i se rapporte au premier signal de la paire et l'indice j au deuxième signal de la paire.

$$C_{i,j} = \frac{\text{nombre de réponses "similaire"}}{\text{nombre de total de présentation}} \times 100 \quad (1)$$

3.1 Perception des signaux identiques

Une première donnée, intéressante pour la suite de l'étude, est la valeur moyenne des coefficients $C_{i,i}$ (d'après l'équation 1).

On pourrait s'attendre à ce que cette valeur soit égale à 100%. Autrement dit, on s'attend à obtenir systématiquement la réponse « signaux identiques » avec les deux signaux de la paire identiques. Mais ici, la moyenne de ces valeurs (des coefficients sur la diagonale 2/2 - 16/16) est de 80%. Ces informations seront exploitées dans la partie 4.

3.2 Symétrie

Chaque paire de signal a été présentée deux fois par série de mesure. Lors de la seconde présentation l'ordre de présentation est inversé. On peut donc mesurer pour chaque fréquence, serrage... la moyenne des différences entre $C_{i,j}$ et $C_{j,i}$ (cette moyenne est calculée sur la valeur absolue des différences, aucun ordre ne prédomine dans ces coefficients). Pour chaque conditions (de serrage et de fréquence), la moyenne des écarts est d'environ 5,8%, 90% des écarts mesurés se trouve dans un intervalle de $\pm 4.8\%$.

Le tableau 1 donne les coefficients obtenus pour un sinus de 45 Hz et un serrage « standard ». La valeur associée à i se lit dans la première case de chaque ligne et celle de j dans la première case de chaque colonne.

Le tableau présente 2, par exemple, la valeur de $C_{i,j} - C_{j,i}$ pour la fréquence de 45 Hz et le serrage « standard ». Les coefficients $C_{i,j}$ et $C_{j,i}$ ont systématiquement des valeurs très proches. L'ordre de présentation des signaux n'a donc pas d'influence sur leur similarité perçue.

On peut donc combiner les coefficients $C_{i,j}$ et $C_{j,i}$ en les moyennant selon l'équation 2. $M_{i,j}$ représente le rapport entre le nombre de réponses « identique » et le nombre de total de présentation de la paire i, j , quel que soit l'ordre de présentation (i puis j , ou j puis i).

$$M_{i,j} = (c_{i,j} + c_{j,i})/2 \quad (2)$$

3.3 Similarité avec un signal sur 16 bits

Les figures 5a, b et c représentent, pour chaque fréquence, l'évolution des ratios $M_{2,16}$, $M_{4,16}$, $M_{8,16}$ et $M_{16,16}$.

On trouve trois courbes sur ces figures. Une courbe verte représente le serrage « standard », qui correspond au serrage initialement choisi par le participant. Ce serrage est celui que choisirait le participant pour porter une montre au quotidien. Une courbe bleue représente le serrage « augmenté », qui

| | | | | |
|---------|--------|--------|--------|---------|
| | 2 bits | 4 bits | 8 bits | 16 bits |
| 2 bits | 75,0 | 0,0 | 0,0 | 8,3 |
| 4 bits | 16,7 | 66,7 | -16,7 | 58,3 |
| 8 bits | 16,7 | 75,0 | 70,8 | 75,0 |
| 16 bits | 8,3 | 66,7 | 91,7 | 91,7 |

TABLEAU 1 – Valeur des coefficients $C_{i,j}$ avec i donné en première élément de ligne et j en première élément de colonne.

| | | | | |
|---------|--------|--------|--------|---------|
| | 2 bits | 4 bits | 8 bits | 16 bits |
| 2 bits | 0,0 | -16,7 | -16,7 | 0,0 |
| 4 bits | 16,7 | 0,0 | -16,7 | -8,3 |
| 8 bits | 16,7 | 16,7 | 0,0 | -16,7 |
| 16 bits | 0,0 | 8,3 | 16,7 | 0,0 |

TABLEAU 2 – Valeur des écarts $C_{i,j} - C_{j,i}$ avec i donné en première élément de ligne et j en première élément de colonne.

s'obtient en partant de la position standard et en augmentant la pression (le diamètre du bracelet est diminué de 2 crans). La courbe rouge est obtenue pour un serrage « diminué », correspondant au principe inverse (le diamètre du bracelet est augmenté de 2 crans). On peut donc observer sur ces graphiques, pour chaque serrage et pour chaque fréquence, l'évolution des coefficients $M_{i,16}$ (avec i en abscisse).

4 Analyse

4.1 Effet spectral de la quantification

La figure 6a montre les spectres des sinus de 45 Hz quantifiés sur chaque niveau considéré. On observe qu'une diminution du nombre de bits de quantification introduit une énergie croissante dans les harmoniques impaires du signal. En effet, une erreur de quantification (la différence entre le signal analogique et le signal quantifié) est introduite pour chaque échantillon, cette erreur suit dans le temps un signal proche d'un signal triangulaire (en partant d'une valeur numérique, l'écart entre la valeur analogique et la valeur quantifiée va croître jusqu'à que le signal atteigne la valeur numérique suivante, l'erreur va alors diminuer jusqu'à devenir nulle, puis répéter le processus). Le signal de l'erreur de quantification a donc une forme d'onde dépendant de la méthode de quantification, une amplitude dépendant du pas de quantification, et une fréquence dépendant à la fois de la fréquence du signal analogique et du pas de quantification. Ce qu'on retrouve dans le spectre des signaux quantifiés, c'est en fait la somme du spectre du signal analogique et du spectre de l'erreur de quantification. Ce genre de phénomène est similaire à ce qui est formalisé dans [12].

Environ 10 harmoniques apparaissent jusqu'à 1 kHz pour le sinus à 45 Hz, puis 3 pour le sinus à 135 Hz (voir figure 6b) et une seule pour le sinus à 225 Hz (voir figure 6c). On peut

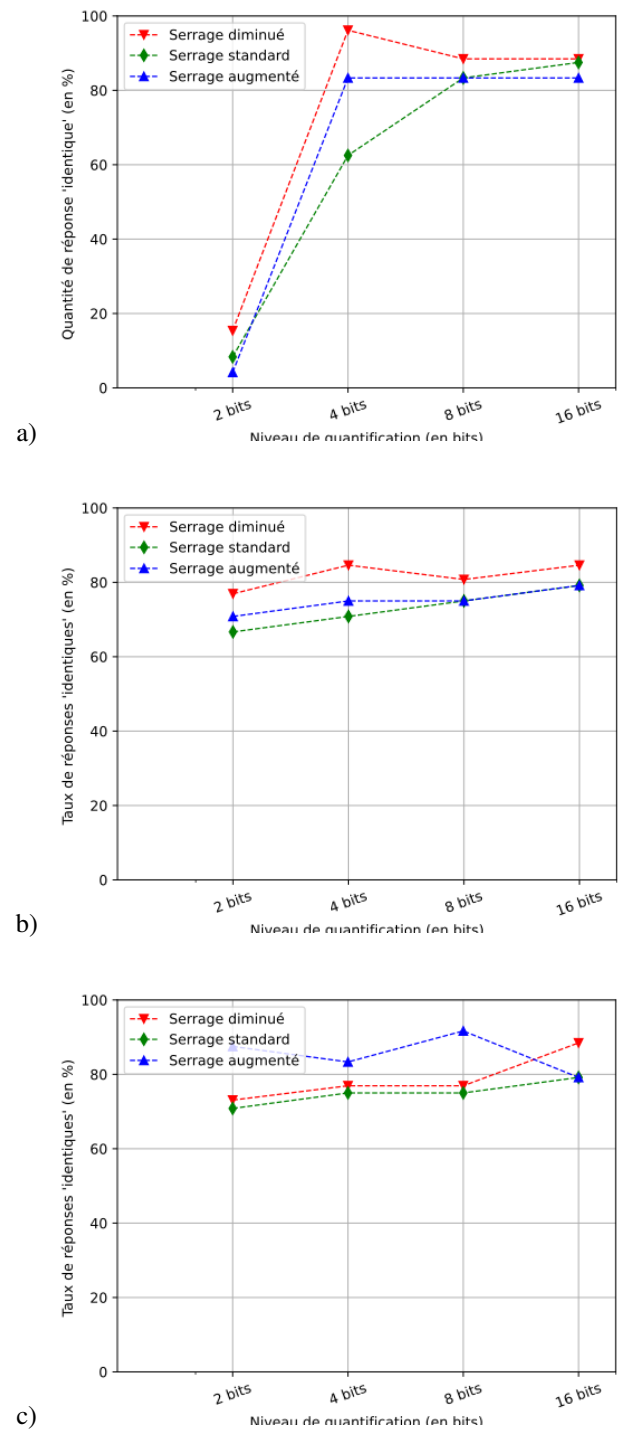


FIGURE 5 – Coefficients $M_{i,16}$ avec un sinus de 45 Hz (a), 135 Hz (b) et 225 Hz (c) quantifié sur 16 bits. Les couleurs vert, bleu et rouge représentent respectivement les serrage « standard », « augmenté » et « diminué ».

donc s'attendre à voir évoluer la valeur des coefficients $M_{i,16}$ (définie dans l'équation 2) en fonction de la fréquence du signal considéré.

4.2 Influence du serrage du dispositif

On retrouve dans les figures 5a, b et c systématiquement les mêmes résultats.

Le serrage « standard » est le serrage avec les coefficients $C_{2,16}$, $C_{4,16}$ et $C_{8,16}$ les plus faibles. Cela signifie donc que c'est pour ce serrage que le risque de « confusion » avec un signal quantifié sur 16 bits est le plus faible. Autrement dit, notre sens du toucher serait plus « fin » ou du moins capable de mieux différencier les effets de la quantification (nous supposons que ces effets sont principalement des modifications du spectre, voir la section 4.1) avec le serrage qui nous semble le plus confortable. On sait qu'une augmentation de la pression a tendance à diminuer notre sensibilité vibrotactile [13, 14], et que le fait de contraindre le transducteur limite l'énergie que sera capable de fournir le transducteur [15]. Ce qui est plus surprenant, c'est qu'une diminution de la pression exercée par le transducteur sur la peau n'améliore pas la « finesse » du toucher. Lors de précédentes expériences menées sur les seuils de détection vibrotactile, les pressions les plus faibles donnaient le seuil de détection les plus bas [14].

Le serrage « standard » serait donc le serrage permettant la discrimination la plus fine. Dans l'optique d'une conservation de cette finesse, aucun scénario n'est à privilégier entre un serrage trop fort ou trop faible. Les positions relatives des courbes de serrage « augmenté » et « diminué » varie en fonction de la fréquence considérée.

4.3 Fréquence du sinus

Ici les résultats, contrairement au point précédent, dépendent de la fréquence du sinus considéré. Les courbes, pour chaque serrage, suivent la même tendance, mais nos observations se baseront ici sur les courbes des serrages « standard », visible en vert sur les figures 5a, b et c (on vient de montrer qu'il s'agit de la configuration offrant le toucher le plus fin).

Pour un sinus de 45 Hz, les coefficients $C_{2,16}$, $C_{4,16}$ et $C_{8,16}$ suivent une courbe croissante de 7 à 80%. Cette valeur de 80% a été observée précédemment comme valeur moyenne des coefficients $C_{i,i}$. On peut donc penser que pour une quantification sur 2 ou 4 bits les différences avec le signal « pseudo-analogique » (16 bits) induites par la quantification soient perceptibles. On remarque que le coefficient $C_{16,16}$ est augmenté de 8% par rapport à $C_{8,16}$. Au vu du nombre de participant à cette expérience, ces coefficients pourraient évoluer et diminuer leur écart. Dans la situation actuelle, il est donc encore difficile d'affirmer qu'une quantification sur 8 au lieu de 16 bits ne modifie pas de manière perceptible le signal.

Pour un sinus à 135 Hz, on continue de constater une croissance sur la courbe. Cependant cette croissance est beaucoup moins marquée. Dès une quantification sur 2 bits ($M_{2,16}$), 66% des comparaisons donnent un signal perçu

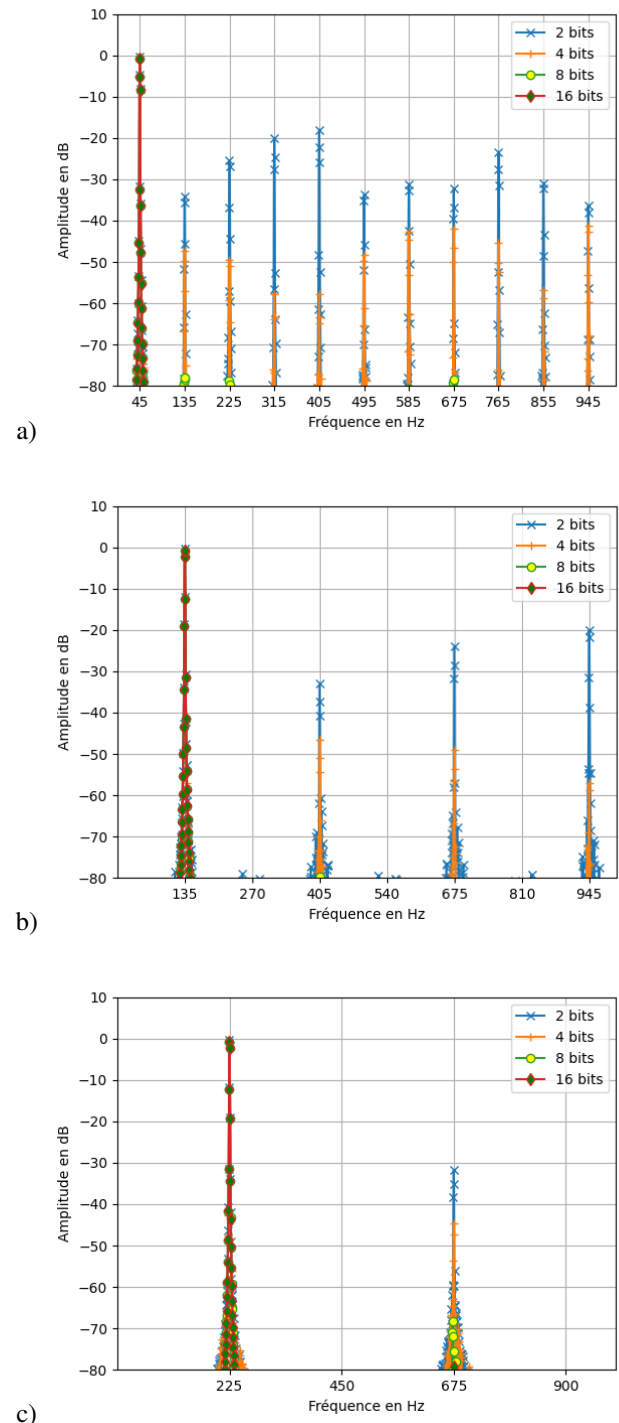


FIGURE 6 – Spectre des sinus de l'étude (de fréquence 45, 135 et 225 Hz respectivement en a), b) et c)), pour chaque niveau de quantification.

comme identique au signal sur 16 bits (contre 7% pour le sinus à 45 Hz). Les coefficients ($M_{4,16}$), ($M_{8,16}$) et ($M_{16,16}$) valent ensuite 71%, 75% et 79%. On ne peut donc pas clairement définir de niveau de quantification à partir duquel le signal peut être assimilé (sur le plan perceptif) à un signal quantifié sur 16 bits. On peut en revanche constater qu'un signal quantifié sur 16 bits et comparé à lui-même n'est perçu comme identique que $79/71 = 1,12$ fois plus souvent que lorsqu'il est comparé à sa version quantifiée sur 4 bits. La différence, sur le plan perceptif, entre un signal à 135 Hz quantifié sur 4 bits et un signal sur 16 bits semble donc être assez petite.

Pour un sinus de 225 Hz, on trouve la même tendance que pour 135 Hz avec un effet accentué. Les coefficients valent 71%, 75%, 75% et 79%. On remarque donc qu'une augmentation de la fréquence rend la différenciation des signaux quantifiés sur 2 et 16 bits plus difficile.

5 Conclusion

La tâche de perception vibrotactile proposé ici n'est pas simple à réaliser pour les participants. Les 80% de réponse « signaux identiques » obtenus en moyenne pour une paire de signaux identiques en témoignent. Cette donnée souligne l'importance d'offrir un bon environnement de perception vibrotactile (notamment le serrage du bracelet). On remarque qu'encourager l'utilisateur de notre dispositif à choisir un serrage de bracelet confortable favoriserait la finesse du ressenti.

Notre hypothèse selon laquelle il est possible de diminuer le niveau de quantification sans que celui soit perceptible doit être reformulée. Cette hypothèse est confirmée ou réfutée en fonction du spectre du signal considéré. En effet, avec des signaux vibrotactiles ayant une fréquence de l'ordre de la dizaine de Hertz, l'erreur de quantification est perceptible pour un niveau de quantification inférieur ou égal à 8 bits, par rapport à la référence « pseudo-analogique » fixée ici à 16 bits. En revanche, pour des fréquences plus hautes, une quantification sur 8 bits n'amènera pas de modification perceptible au signal.

Rappelons que les courbes d'iso-sensibilité vibrotactile nous montrent que notre maximum de sensibilité vibrotactile se situe autour de 250 Hz et est assez étroit [1] (un signal à 100 Hz doit être joué 15 dB au-dessus d'un signal à 250 Hz pour que leur amplitude soit perceptivement identique). Or, c'est pour cette fréquence de 250 Hz que le niveau de quantification peut être le plus diminué sans que cela soit perceptible (les harmoniques générées sortent du spectre de sensibilité vibrotactile). La plage de fréquence de fonctionnement des dispositifs vibrotactile pourrait être réduite à une centaine de Hertz autour du maximum de sensibilité, L'utilisation des DAC de 4 ou 8 bits sans gêner la perception des signaux serait possible. Ces informations pourraient faciliter le développement de dispositif vibrotactile miniaturisé, portable, autonome, peu gourmand en énergie et à un coût très modéré.

Remerciements

Nous tenons à remercier les participants à cette expérience. Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du projet PRC « Staccato » (ANR-19-CE38-0008).

Références

- [1] R. Verrillo, A. Fraioli, R. Smith, Sensation magnitude of vibrotactile stimuli, *Perception & Psychophysics* **6**, 366–372 (1969)
- [2] F. Russo, P. Ammirante et D. Fels, Vibrotactile discrimination of musical timbre, *Journal of experimental psychology : Human Perception and Performance* **38** (4), 822–826 (2012).
- [3] P. Ammirante, F. Russo, A. Good et D. I. Fels, Feeling Voices, *PLoS One* **8**(1) :e53585 (2013)
- [4] D. Birnbaum et M. Wanderley, A systematic approach to musical vibrotactile feedback, *Proceedings of the International Computer Music Conference* (2011).
- [5] D. A. Mahns, N. M. Perkins, V. Sahai, L. Robinson, M.J. Rowe, Vibrotactile frequency discrimination in human hairy skin, *Journal of Neurophysiology* **95**(3), 1442–1450 (2006)
- [6] S. Merchel, M. Altinsoy, Psychophysical Comparison of the Auditory and Vibrotactile Perception-Absolute Sensitivity, *International Workshop on Haptic and Audio Interaction Design* (2019)
- [7] B. C. J. Moore, *An Introduction to the Psychology of Hearing*, Brill, Leiden, 6th edition (2013)
- [8] H. Pongrac, Vibrotactile Perception : Differential Effects of Frequency, Amplitude, and Acceleration, *Proceedings of the IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications (HAVE)*, 54–59 (2006)
- [9] M. Dodd, W. Klippel, J. Oclew-Brown, Voice Coil Impedance as a Function of Frequency and Displacement, *Proceedings of the 117th Convention of the AES*, paper 6178 (2004).
- [10] P. Lamoré, C. Keemink, Evidence for different types of mechanoreceptors from measurements of the psychophysical threshold for vibrations under different stimulation conditions, *Journal of the Acoustical Society of America* **83**(6), 2339–2351 (1988)
- [11] R. Verrillo, Vibration Sensation in Humans, *Music Perception : An Interdisciplinary Journal*, **9**(3), 281–302, (1992)
- [12] D. Bélières, Caractérisation des erreurs relatives à la numérisation d'un signal alternatif, *Revue française de métrologie* **25**, 31–44 (2011).
- [13] S. Papetti, H. Järveläinen, B. Giordano, S. Schiesser et M. Fröhlich, Vibrotactile Sensitivity in Active Touch : Effect of Pressing Force, *IEEE Transactions on Haptics* **10**(1) :113–122 (2017)
- [14] R. Verrillo, Effect of Contact Area on the Vibrotactile Threshold, *Journal of the Acoustical Society of America* **35**(12), 1962–1966 (2014)
- [15] M. Dodd1, W. Klippel et J. Oclew-Brown, Voice Coil Impedance as a Function of Frequency and Displacement, *Proceedings of the 117th Audio Engineering Society Convention* (2014)