

ATELIER 4

Analyse d'incertitudes expérimentales et outils statistiques d'aide à la décision : application à un banc de tri de bouteilles

Atelier proposé et animé par :

Félix Foucart et Mathieu Sécaïl-Geraud

ENSIM/LAUM/SFA GS EXACT

Rue Aristote

72085 le Mans

E-mail : felix.foucart@univ-lemans.fr

Charles-Étienne Lamort et Damien Proust

OROS

Carré Haussman 1

4, allée du trait d'union

CE 5264

77127 Lieusaint

E-mail : info@oros.fr



À

l'image des JISFA (Journées Industrielles de la Société Française d'Acoustique) favorisant les rencontres académiques et industrielles, cet atelier est né d'un mélange de 3 ingrédients :

- un contexte industriel, amené par Valéo en lien avec les tests de conformité, le respect des tolérances dans le cadre d'une relation client-fournisseur et des incertitudes relevant d'une production en série,
- un contexte pédagogique, porté par l'ENSIM, où des objets du quotidien peuvent être détournés comme leviers pour l'enseignement de l'acoustique (voir le projet MERITE <https://pafi.univ-lemans.fr/merite/>),
- un contexte expérimental, apporté par le groupe EXACT (EXpérimentation en ACousTique) de la SFA en favorisant la communication entre les participants (aussi bien visiteurs qu'exposants) afin de les faire travailler ensemble sur des expériences qu'ils réalisent en équipe.

Un mini TP autour d'un banc de test acoustique a donc été conçu.

La philosophie de l'atelier a été d'avoir une instrumentation minimale (un microphone), des conditions de mesures volontairement « sauvages » pour laisser s'exprimer des incertitudes et un banc de mesure facilement duplicable pour être utilisé par des binômes ou trinômes afin de favoriser les interactions. L'objet acoustique retenu pour l'étude est une bouteille d'eau gazeuse considérée comme un résonateur de Helmholtz.

Le scénario imaginé dans cet atelier a été le suivant :
« Industriel du recyclage de bouteille plastique, vous devez mettre en place un banc de test acoustique permettant de rassembler ou d'écartier certaines bouteilles jugées significativement différentes d'une population de bouteilles vides de référence.

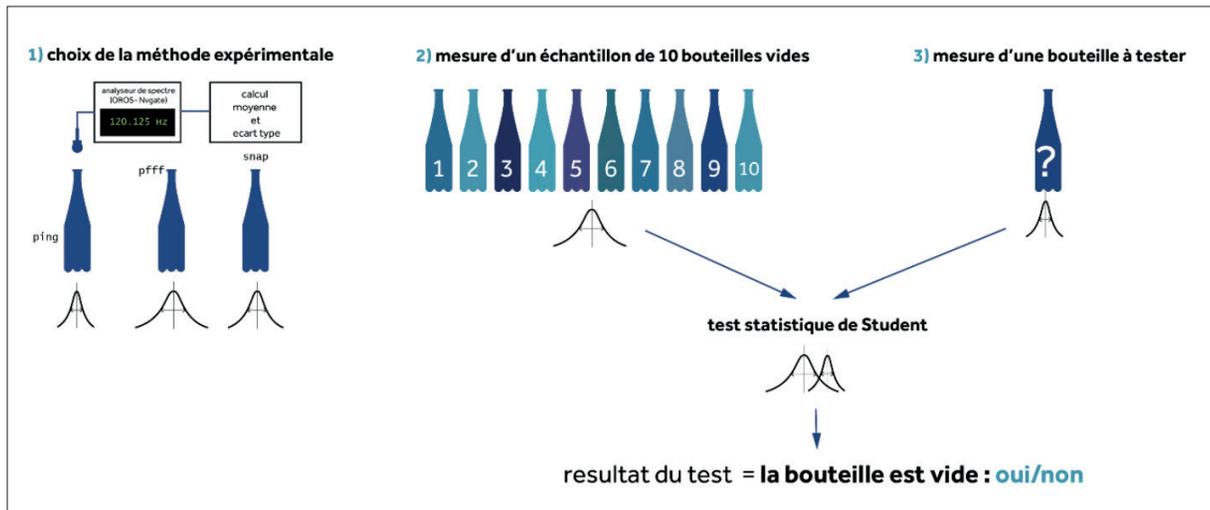


Fig. 1 : Déroulement de l'atelier

Cette population de référence est à caractériser statistiquement par sa valeur moyenne et son écart-type.

- Si l'on fait l'hypothèse que la fréquence de résonance de la bouteille est une signature de son état, quelle méthodologie expérimentale reproductible préconisez-vous de mettre en œuvre pour suivre cet indicateur ?
- Les incertitudes liées à cette méthodologie sont-elles en accord avec les incertitudes relevant de la variabilité de production d'une bouteille ?
- Est-il possible de discriminer une bouteille X potentiellement non vide à l'aide d'une loi statistique et avec quel niveau de confiance ? »

Déroulement

Après une introduction rappelant les types d'incertitudes expérimentales (naturelles, statistiques, matérielles), les tâches confiées aux participants ont été les suivantes (voir figure 1) :

- Choix de la méthode expérimentale et quantification de son incertitude : Prise en main de l'environnement de mesure OROS – logiciel de mesure et d'analyse NVGate associée aux analyseurs OROS multivoies temps réel. Les méthodes d'excitations ont été comparées sur une même bouteille : excitation acoustique impulsionnelle avec un claquement de doigt proche du goulot, excitation aéralique en soufflant sur le goulot de la bouteille, excitation mécanique impulsionnelle en faisant une chiquenaude sur le corps de la bouteille (voir figure 2).

Les tests spécifiques sur la variabilité des conditions limites n'ont pas été réalisés, mais l'erreur induite est englobée dans l'incertitude de type naturelle de notre méthodologie expérimentale.

- Mesure d'un échantillon de dix bouteilles vides à l'aide de la méthode de la chiquenaude retenue en raison de son écart-type le plus faible (voir tableau 1, page suivante) et de son bon rapport signal/bruit.

Le logiciel OROS NVGate permet l'affichage des mesures en temps réel et l'extraction automatique des fréquences de résonance par détection de maxima. Le transfert automatique vers une feuille Excel des valeurs mesurées (voir figure 3, page suivante) est effectué à chaque mesure. Cet interfaçage permet une construction simultanée d'indicateurs statistiques : histogrammes de fréquences d'apparition, valeur moyenne et l'écart-type.

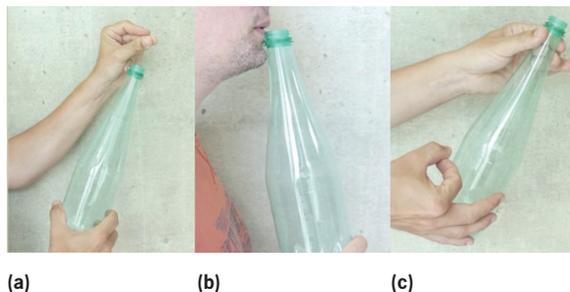


Fig. 2 : Méthodes d'excitation testées : (a) acoustique (Claquement de doigts), (b) aéralique (Souffle), (c) mécanique (Chiquenaude)

- Mesure d'une ou de quelques bouteilles à tester : non vides, géométrie déformée, présentant de la condensation aux parois. Mise en œuvre d'un test statistique (test de Student) applicable aux échantillons de petite taille (<30 individus) afin d'évaluer l'appartenance statistique de la bouteille testée à la famille « bouteille vide ».

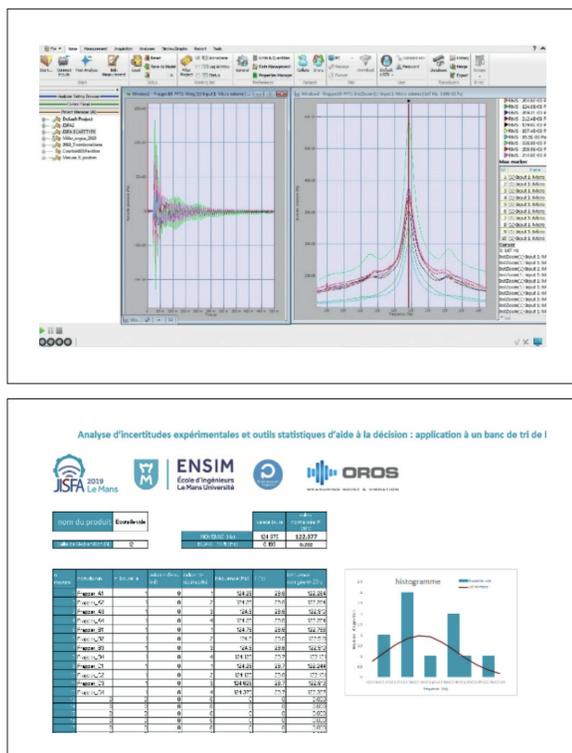


Fig. 3 : Vue de l'interface d'acquisition sous NVGate chaînée à au post-traitement automatisé sous Excel

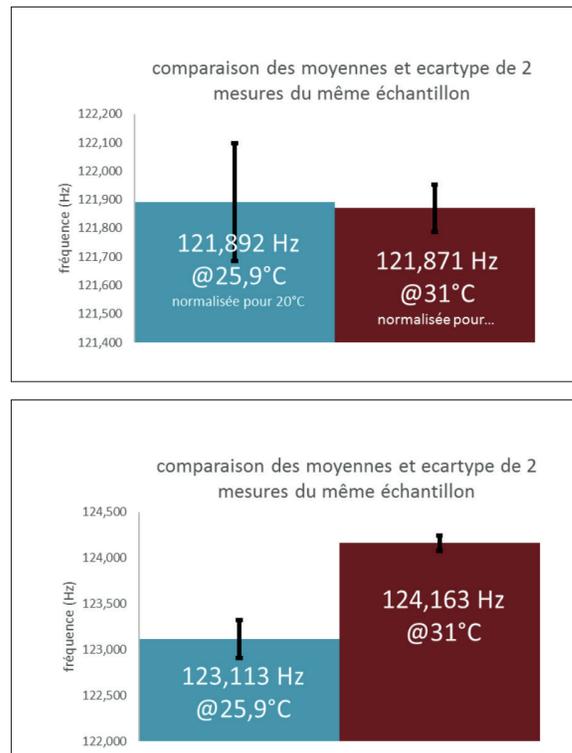


Fig. 4 : Influence de la correction de la température

Résultats

Actions pour la réduction des incertitudes

Dans un premier temps, il est important de réduire au maximum les incertitudes de mesure afin de diminuer les seuils de discrimination d'une bouteille par rapport à la population de bouteilles vides.

Deux incertitudes de type naturelles ont été identifiées : la méthode expérimentale et l'influence de la température. Compte tenu de son faible écart-type (voir tableau 1), la méthode expérimentale par excitation mécanique impulsionnelle a été retenue.

	Claquement de doigt	Souffle	Chiquenaude
Ecart-type (Hz)	0,3	2,3	0,2

Tabl. 1 : Comparaison des écarts types des méthodes

La température a une influence directe sur la célérité du son donc sur la fréquence de résonance du système. Afin de réduire cette incertitude naturelle, nous avons décidé de mesurer cette température à l'aide de thermocouple directement branché sur les analyseurs OROS et de normaliser la fréquence mesurée pour une fréquence équivalente à 20 °C (voir figure 4).

Pour réduire les incertitudes liées à l'instrumentation, nous avons dimensionné la résolution fréquentielle de l'analyseur OROS en configuration FFT à $f = 0,125$ Hz en fonction de la distribution de l'échantillon de référence que l'on veut quantifier.

Les personnes ayant opté pour un réglage plus grossier de la FFT, afin de raccourcir le temps d'acquisition, sont tombées dans un cas où l'incertitude expérimentale était supérieure à la dispersion des fréquences des produits. Ce réglage plus grossier ne permettait pas ensuite de réaliser une bonne discrimination des bouteilles défectueuses.

Application du test statistique pour la comparaison de résultats expérimentaux

Afin de comparer deux résultats expérimentaux, ici la distribution des fréquences de résonance d'un échantillon de bouteilles vides (dix bouteilles différentes) d'une part et la distribution des fréquences de résonance d'une bouteille à tester d'autre part, il convient de réaliser un test statistique. Compte tenu du petit nombre de mesures, nous avons utilisé le test de Student utilisant la loi du même nom. Comparativement à une loi normale, celle-ci permet d'élargir les incertitudes en fonction du nombre de mesures et de l'indice de confiance désiré. L'utilisation de cette distribution de Student permet une discrimination plus robuste que la méthode qualitative des recouvrements des barres d'erreurs utilisant la distribution de Gauss, valable dans le cas des grands nombres.

En utilisant cette méthode, le seuil de détection d'une bouteille non vide a pu être évalué expérimentalement. Compte tenu des incertitudes de mesures et de la dispersion des bouteilles vides, le test de Student a permis de détecter un volume d'eau minimal autour de 20 ml avec un indice de confiance de 95 % (voir Tableau 2). Pour diminuer ce seuil de détection, il conviendrait de diminuer davantage nos incertitudes.

	Échantillon de référence	0 ml	10 ml	20 ml
Moyenne (Hz)	121,67	121,88	121,88	122,6
Ecart-type (Hz)	0,34	0,01	0,07	0,2
Test de Student		IDENTIQUE	IDENTIQUE	DIFFERENT

Tabl. 2 : Résultats du test de Student pour différentes bouteilles comparées à l'échantillon de référence

Conclusion

Par cette mise en pratique, l'atelier a permis de mettre en évidence le caractère statistique des données de mesures et l'importance de la connaissance du dispositif pour comprendre et réduire les incertitudes de mesures. Un cas d'application du test de Student a également été mené afin de montrer son intérêt comme outil d'aide à la décision. Bien que pressé par le temps, ces points ont pu être abordés dans un contexte favorisant les interactions avec les encadrants mais aussi entre les participants. L'organisation même de ce TP a été pour nous l'occasion de renforcer nos connaissances en analyse statistique ainsi que nos liens entre utilisateurs, fournisseurs et membres du groupe spécialisé EXACT de la SFA.

Remerciements

François Gautier (ENSIM/LAUM) pour la phase brainstorming initial, Jean-Michel Genevaux (ENSIM/LAUM) et Cécile Guianvarc'h (CNAM) pour les conseils en statistiques, Damien Proust (OROS) et Charles-Étienne Lamort (OROS) pour le prêt et la mise en place du matériel OROS lors des JISFA, Olivier Blazère (VIAXYS) pour le prêt des microphones lors des JISFA.

Références bibliographiques

[1] Genevaux JM., Potel C., Gestion des aléas : chaînes de côtes et répartition des intervalles ; utilisation des incertitudes en TP, LAUM (Laboratoire d'Acoustique de l'Université) - UMR 6613 CNRS

[2] Protassov K., Analyse statistique des données expérimentales, Collection Grenoble Science