

Sonification pour l'exploration et l'analyse de données

Résultats récents et perspectives via l'exemple de la sismologie

Arthur Paté
IEMN (UMR 8520 CNRS)
Département ISEN
41, boulevard Vauban
59046 Lille CEDEX
E-mail : arthur.pate@isen.fr

Lapo Boschi
ISTeP (CNRS UMR 7193)
Sorbonne Université
4, place Jussieu
75252 Paris CEDEX 05

Laurianne Delcor
LAM/d'Alembert (CNRS UMR 7190)
ISTeP (CNRS UMR 7193)
Sorbonne Université
4, place Jussieu
75252 Paris CEDEX 05

Ben Holtzman
Lamont-Doherty Earth Observatory
Columbia University
61 route 9w
p/o box 1000
Palisades NY-10964
USA

**Danièle Dubois, Jean-Loïc Le Carrou,
Claudia Fritz**
LAM/d'Alembert (CNRS UMR 7190)
Sorbonne Université
4, place Jussieu
75252 Paris CEDEX 05

Résumé

La sonification, ou auditory display, propose une représentation des données et résultats scientifiques, plus traditionnellement représentés graphiquement par la modalité visuelle, via la modalité auditive. Si les sons produits sont souvent probants pour la communication auprès du grand public ou pour aiguiller le chercheur à titre individuel, il reste pertinent de s'interroger sur la portée générale et systématisable de la méthode dans le contexte de la recherche scientifique. Des études perceptives sont donc nécessaires afin d'évaluer le lien entre caractéristiques perçues du son et paramètres physiques des données. Cet article relate quelques récentes études pluridisciplinaires menées à l'interface de l'acoustique, de la sismologie et des sciences cognitives, ayant eu pour objet la perception de sons issus de l'audification (compression temporelle) du signal résultant de l'enregistrement de vibrations à la surface terrestre (données sismiques).

Abstract

Sonification, or "auditory display", provides an representation of scientific data and results, which are traditionally represented via the visual channel, via the auditory channel. While it has often been found that sonification is useful in communicating with the general public or for helping individual researchers, it remains to be determined whether the method can be generalized and systematized in scientific research. This calls for perceptual studies, linking the perceived sound features to the physical parameters of the data. This article summarizes recent multidisciplinary studies at the interface of acoustics, seismology and cognitive sciences, whose object was the perception of the audification (i.e. time compression) of the signal resulting from the recording of the Earth's surface vibration (seismic data).

Introduction

Sonification

Laissons la parole aux premiers à avoir proposé une définition de la sonification : « [sonification is] the use of nonspeech audio to convey information. More specifically, sonification is the transformation of data relations into perceived relations in an acoustic signal for the purposes of facilitating communication or interpretation » [1]. Ainsi, en contraste avec l'approche traditionnelle et dominante dans l'histoire des sciences qui est de présenter visuellement l'information et les données [2,3], la sonification que permet le développement des technologies du sonore propose d'utiliser la modalité auditive, à la place ou en complément de la visualisation.

Il s'agit cependant d'identifier plus précisément les propriétés respectives de ces différentes modalités sensorielles qui induisent des traitements perceptifs et cognitifs différents susceptibles de contribuer à l'interprétation des « mêmes » données numériques. La représentation visuelle présente l'avantage de la permanence et son externalité permet en outre la confrontation des points de vue face à elle et donc le débat et l'établissement d'un consensus, que l'audition de par l'inscription temporelle et le caractère transitoire de son existence dans l'environnement permet moins facilement. En conséquence l'inscription graphique a toujours et depuis très longtemps été prévalente dans notre tradition intellectuelle, dans la pratique scientifique, dans l'interprétation et dans la communication des résultats, dans leur passage du numérique au symbolique, à travers des représentations graphiques (par exemple les sonagrammes, les sismogrammes, etc.).

Si la vision humaine est suffisamment entraînée et efficace pour une multitude de tâches d'exploration et d'analyse de données, l'utilisation de l'audition, encore trop peu reconnue de nos jours, a un énorme potentiel :

- les structures et changements temporels, surtout s'ils sont subtils, bruités et rapides, pourraient être plus efficacement détectés « à l'oreille » qu'« à l'œil » ;
- aveugles et mal-voyants¹ pourraient bénéficier d'outils adaptés [4] ;
- en présence de bruit et de multiples sources, les performances du système auditif humain en termes de séparation et localisation ne sont plus à prouver : ceci ouvre la porte à l'écoute simultanée de multiples données sonifiées ;
- contrairement à la vision qui requiert de « regarder » pour « voir », il n'est souvent pas nécessaire d'« écouter » pour « entendre », ainsi le *monitoring* de processus par voie auditive permet à l'opérateur de continuer sa « tâche principale » pendant le *monitoring* en tant que « tâche périphérique » [5].

Parmi les techniques classiques pour réaliser la sonification, le *parameter mapping* permet d'associer une ou plusieurs dimensions des données à une ou plusieurs dimensions sonores, par exemple le taux de CO₂ et la température mesurés associés à la hauteur de deux sons différents². Citons aussi les icônes sonores (*auditory icons*), du jingle publicitaire aux alertes sonores (alarmes, notifications du système d'exploitation informatique [6]) en passant par les *Leitmotive* musicaux (de l'idée fixe de Berlioz au thème du balai de Dukas), comme exemples de méthodes de sonification.

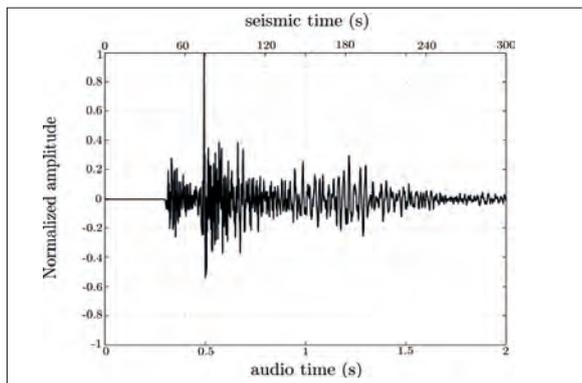


Fig. 1: Exemple d'enregistrement sismique d'une durée de 5 minutes (« seismic time »). Représentation visuelle de l'enregistrement de la composante verticale du déplacement de la surface terrestre lors d'un séisme ayant eu lieu en 2011 dans l'Oklahoma [28]. L'échelle de temps peut être modifiée pour obtenir un son audible (« audio time »). Figure tirée de [25]
Example of a seismic recording of duration 5 minutes ("seismic time"). Visual representation of the recording of the vertical component of the displacement of Earth's surface during an earthquake in Oklahoma in 2011 [28]. Time scale can be modified to obtain an audible sound ("audio time"). Figure from [25]

Dans notre cas, nous utiliserons la technique d'*audification*, qui consiste en la lecture directe d'une série de valeurs numériques comme s'il s'agissait d'échantillons de pression mesurée ordonnés suivant le temps.

Audification

On a coutume de dater les débuts de l'audification aux études pionnières de Speeth [7] puis de Frantti et Levereault [8] qui, au plus fort de la guerre froide, ont montré que l'écoute de sismogrammes audifiés pouvait permettre de différencier séismes et essais nucléaires [9]. L'établissement de la sonification comme une discipline scientifique structurée et reconnue est, quant à lui, habituellement daté de la fin des années 1990 : en effet, le cycle des conférences ICAD³ a encouragé la systématisation des études en sonification. N'oublions pas que, des techniques de sonification, l'audification est peut-être la plus ancienne, et qu'elle est peut-être plus ancienne qu'il est souvent admis, tant sa mise en œuvre ne nécessite que peu d'intervention sur les données, ainsi que nous suggère un trop bref survol historique : dès 1878 téléphone et haut-parleurs, encore balbutiants, étaient utilisés (détournés ?) pour écouter les impulsions nerveuses dans les muscles [11], en 1924 les cris de chauve-souris étaient transposés du domaine ultrasonore au domaine audible (compression temporelle) pour la première fois [12], et les sismologues des années 1950 pouvaient écouter à vitesse accélérée leurs enregistrements sismiques sur bandes magnétiques afin de détecter la position des séismes [12] !

Nous nous concentrerons par la suite sur l'audification de sismogrammes (ou données sismiques)⁴. Le sismogramme représente graphiquement l'évolution au cours du temps de la position ou de la vitesse d'un point à la surface de la Terre, un accroissement temporaire des valeurs mesurées traduisant le passage d'ondes sismiques. En figure 1 nous montrons un exemple utilisé lors de l'étude présentée page suivante. Les ondes sismiques enregistrées ont des fréquences trop basses (typiquement du mHz jusqu'à quelques Hz) pour être audibles. Il suffit donc, pour déplacer ces fréquences dans le domaine audible, de lire les échantillons à une cadence plus rapide que la fréquence d'échantillonnage utilisée lors de l'acquisition⁵. Le rapport entre la nouvelle fréquence d'échantillonnage et l'originale, ou entre vitesses de lecture, est appelé « facteur de compression ». Typiquement, ce facteur est de l'ordre d'une centaine ou d'un millier.

L'audification de données sismiques a été utilisée régulièrement ces dernières années, souvent à des fins pédagogiques⁶ [13,14] ou pour guider un chercheur à titre personnel [15,16,17]. En contraste, notre utilisation s'opère dans un contexte de recherche scientifique pluridisciplinaire : est-il possible, à travers la présentation auditive des données et leur interprétation par différents auditeurs, d'identifier les propriétés pertinentes du signal qui font sens pour distinguer les différentes catégories de phénomènes, acoustiques ou non acoustiques ?

1- Les personnes voyantes également, lorsque la situation rend l'utilisation de la vision difficile ou impossible.

2-<https://www.kqed.org/science/1918660/listen-1200-years-of-earths-climate-transformed-into-sound>, consulté le 12 juillet 2018.

3-International Conference on Auditory Display, maintenant tenue tous les ans. Voir [10] et le site internet <http://www.icad.org/>, consulté le 12 juillet 2018.

4- Un sismogramme comporte habituellement trois composantes (trois directions de l'espace) : nous n'utiliserons dans cet article que la composante verticale du déplacement de la surface terrestre.

5-Les phénomènes oscillatoires ultrasonores peuvent également être audifiés, il suffit de ralentir la vitesse de lecture des données acquises pour ramener les fréquences dans le domaine audible. Voir par exemple le travail de Don Gurnett à partir d'enregistrements d'ondes électromagnétiques <http://www-pw.physics.uiowa.edu/space-audio/>, consulté le 12 juillet 2018

6-Voir le site du Seismic Sound Lab à Columbia University (Lamont-Doherty Earth Observatory ; Computer Music Center) : www.seismiclab.org, consulté le 12 juillet 2018

C'est par un détour par la mise en œuvre de procédures de questionnement adaptées et reposant sur des théories psychologiques précises et explicites quant à la catégorisation des phénomènes sensibles [18,19,20,21] que nous pensons pouvoir développer des nouveaux outils d'exploration et d'analyse, qui mèneraient à l'identification de phénomènes sismiques qui n'auraient pas pu être découverts autrement. À la lecture de la littérature récente en sonification de données scientifiques, l'espoir semble permis : grâce à la sonification, des régularités dans les vents solaires [22] ou dans les flux financiers [23] ont été identifiées, cellules cancéreuses et non-cancéreuses ont pu être différenciées [24] !

Preuve de concept - paramètres sismiques « de base »

Cette première étude⁷ a visé à montrer qu'il était envisageable d'utiliser la modalité auditive pour l'exploration et la compréhension des données sismiques.

Problématique

Des données (enregistrements sismiques) ont été sélectionnées pour former le jeu de données (D1) sur la base de l'existence d'une documentation fine et précise des événements sismiques, de la géologie/topographie du milieu de propagation, et des instruments de mesure (réseau de sismomètres). Ainsi, en connaissant précisément les paramètres des données « en entrée » du problème, nous nous attendons à pouvoir relier ceux-ci aux propriétés perçues des sons.

Protocole

Une base de données de quarante-deux séismes (ou « sources ») enregistrés par dix-sept sismomètres (ou « stations ») « broadband » du réseau *USarray* [27] a été choisie. Stations et sources sont localisées en 2011 dans l'Oklahoma [28]. En sélectionnant dans cette base de données des sous-ensembles de sources ou de stations, il a été possible de réaliser plusieurs tests perceptifs utilisant des stimulations acoustiques construites en contrôlant différents paramètres sismiques :

- D1T1 (1 seul séisme de magnitude 5,6 ; 17 stations : 17 sons résultants, facteur de compression 150)⁸ ;
- D1T2 (22 séismes de magnitude entre 2,5 et 4,8 ; 1 station : 22 sons résultants, facteur de compression 150) ;
- D1T3 (13 séismes de profondeur entre 3 et 6 km, 1 station : 13 sons résultants, facteur de compression 150) ;
- D1T1a et D1T1b (mêmes données que D1T1, facteurs de compression respectivement 250 et 350).

Lors de D1T1, la variable testée était la **position relative entre source et station** (cette position relative pouvant se voir comme une distance, un azimut et une composition du sol le long du chemin de propagation). Lors de D1T2 (resp. D1T3), les séismes choisis différaient par leur **magnitude** (resp. **profondeur**). La raison d'être de la duplication de D1T1 en D1T1a et D1T1b est l'idée de tester l'influence du **facteur de compression**.

Pour chacun des tests, les sons sont proposés aux participants dans le cadre d'une procédure de tri libre (*free sorting task*), déjà utilisée dans la recherche en perception sonore [29], et réalisée ici à l'aide du logiciel *TCL-LabX* [30].

Cette procédure est fondée sur des recherches psychologiques relatives à la structure des catégories sémantiques « naturelles » des participants (experts en différents domaines, mais aussi usagers, etc.) avérée pertinente dans les différents domaines sensoriels y compris dans le domaine du sonore pour appréhender les catégories et les principes de catégorisation de signaux acoustiques de différentes natures, par exemple musicaux [31] ou environnementaux [32]. Les participants sont utilisés comme instruments de mesure rendant compte de manière pertinente des catégories sensorielles, comme les instruments de mesure physiques rendent compte des phénomènes physiques (par exemple acoustiques ou sismiques).

Sur une interface informatique chaque son est représenté par une icône : les sons sont à écouter à volonté (clic sur l'icône) et à trier en groupes (cliquer-glisser) selon leurs similarités et différences. Chaque groupe doit ensuite être décrit verbalement. Le nombre d'écoutes et de groupes, ainsi que les critères de tri sont laissés à la discrétion du participant. L'interface de test est montrée en figures 2 (début d'un test) et 3 (fin d'un test). Notons qu'aucune signification n'est attribuée à la disposition finale des groupes sur l'interface.



Fig. 2 : Interface de tri libre au démarrage d'un test. Chaque icône représente un son
Interface for the free sorting task, at startup. Each icon represent a sound stimulus

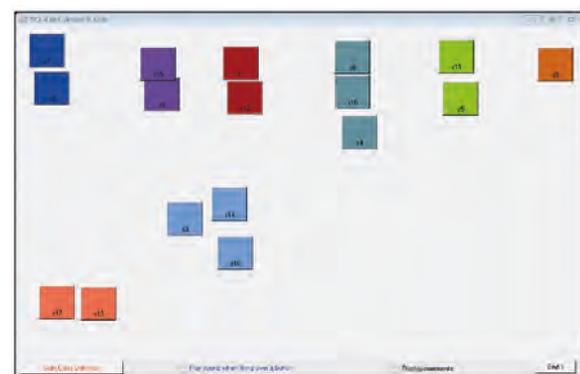


Fig. 3 : Interface de tri libre à la fin d'un test. Les icônes sont triées et assignées à des groupes. Figure tirée de [25]
Interface for the free sorting task, at the end of a test. Icons are sorted and allocated to groups. Figure from [25]

7- Pour davantage de détails, voir [25, 26]

8- Les sons de ce test sont disponibles à l'adresse : <http://hestia.lgs.jussieu.fr/%7Eboschil/sonification.html>

Résultats

Nous donnons dans cette section les résultats de l'analyse des groupes (analyse de proximité) et des descriptions (analyse sémantique).

D1T1 : Les catégories issues du recouvrement des groupes de chaque participant sont représentées en figure 4. Elles montrent clairement un regroupement des sons en fonction de la variable testée, la position relative source/station : il y a des catégories de stations proches, à moyenne distance, et loin de l'épicentre. En premier lieu, c'est la distance source/station qui justifie les groupements, cette distance se traduisant « à l'oreille » par l'émergence de plusieurs « impacts » dus à la différence de temps d'arrivée entre ondes P et S. En second lieu, il y a des différences de timbre dues à différents filtrages de l'onde par différentes compositions géologiques du sol, etc.

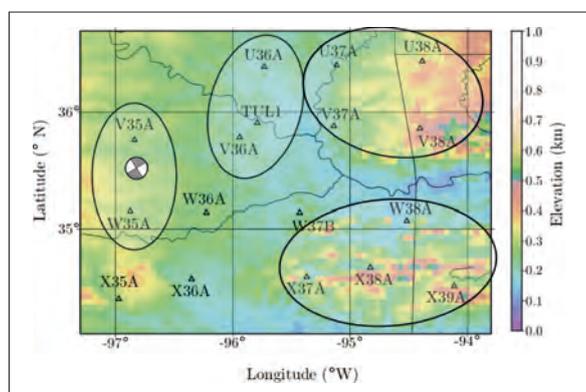


Fig. 4 : Résultats du test D1T1. Projection des positions de l'épicentre du séisme (symbole noir et blanc) et des dix-sept stations (triangles assortis des noms des stations). L'échelle colorée « Elevation » représente la topographie de la surface. Les catégories identifiées sont encerclées de noir. Par exemple, les sons issus de l'audification du séisme enregistré par les stations V35A et W35A ont été perçus comme similaires par suffisamment de participants pour être regroupés dans la même catégorie. Figure inspirée de [26]

Results of test D1T1. Projection of the position of the earthquake epicenter (black and white beach ball symbol) and of the 17 stations (triangles with station name attached). The color scale "Elevation" represents the topography of the surface. The identified categories are circled in black. For example, sounds resulting from the audification of the earthquake signal recorded by stations V35A and W35A were perceived as similar by enough participants to be clustered in the same category. Figure from [26]

D1T2 : La catégorisation s'est effectuée selon deux critères : d'abord une catégorie groupe les signaux de plus forte magnitude, puis les autres catégories groupent les séismes d'épicentres proches.

D1T3 : Les catégories identifiées n'ont pas pu être mises en lien avec des paramètres sismiques. Ceci est peut-être dû au jeu de données n'offrant que des variations de profondeurs trop réduites et peu susceptibles d'être discriminées.

D1T1a et D1T1b : Les catégories sont proches des catégories identifiées pour D1T1, mais on note une hiérarchie différente : certains sous-groupes deviennent des groupes à part entière, ou au contraire des groupes sont scindés en sous-groupes. Ceci est discuté page suivante.

Application - paramètres sismiques « haut niveau »

Problématique

La campagne de test précédente, si elle s'est avérée fructueuse pour relier propriétés perçues des sons et caractéristiques sismiques « de base » (c'est-à-dire dont l'identification peut être automatisable assez facilement), a également montré qu'il était difficile de distinguer l'influence de différents paramètres physiques (distance et angle source/station, propriétés de la source, composition géologique à l'endroit de la station et sur le chemin de propagation, etc.). Ainsi nous avons cherché lors de cette deuxième étude⁹ à nous concentrer tour à tour sur (l'identification des effets perceptifs de) deux paramètres spécifiques : le chemin de propagation et le mécanisme au foyer (représentation du type et de l'orientation de la faille).

Protocole

Chaque nouveau paramètre physique étudié a donné lieu à un jeu de données et à un test perceptif :

- **D2T1** : séismes aux épicentres proches, de magnitudes et profondeurs similaires, et de même mécanisme focal enregistrés par des sismomètres situés de 4000 à 6000 km des épicentres situés a) sur le continent nord-américain, ou b) le long de la côte pacifique ou sur des îles. **La variable principale testée est donc le chemin de propagation**, à travers croûte et lithosphère continentales ou océaniques (voir figure 5).

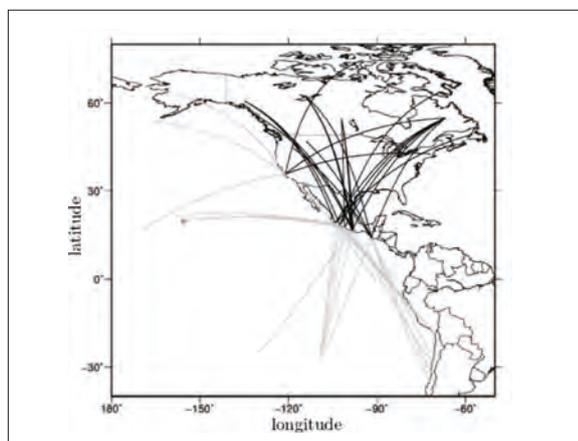


Fig. 5 : D2T1 : Projection sur la surface terrestre des chemins de propagation des ondes sismiques, majoritairement océanique (gris) ou continental (noir). Figure tirée de [33]
D2T1 : Projection on the surface of Earth of the seismic wave propagation paths : mainly oceanic (gray) or continental (black). Figure from [33]

- **D2T2** : séismes aux épicentres proches, de magnitudes et profondeurs similaires, et de chemins de propagation comparables, différant par le mécanisme au foyer, les séismes pouvant résulter d'une faille a) inverse (*thrust*), ou b) décrochante (*strike-slip*) (voir figure 6, page suivante).

⁹- Voir [33] pour davantage de détails.

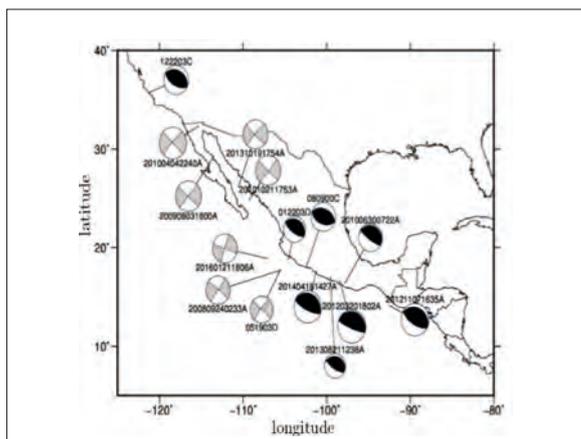


Fig. 6 : D2T2 : Emplacement et mécanisme au foyer des séismes choisis (enregistrements par des sismomètres situés sur le continent nord américain) : faille décrochante (gris) ou inverse (noir). Figure tirée de [33]
D2T2 : Location and focal mechanism for the selected earthquakes (recordings made by sismometers on the North-American continent) : strike-slip (gray) or thrust (black) faults. Figure from [33]

D'après les résultats classiques de sismologie et ceux du premier test perceptif, ainsi que par la construction de nos jeux de données, notre hypothèse était que les ondes sismiques (et donc l'audification, le son) seraient affectées principalement par les deux paramètres choisis. La méthode choisie pour l'étude perceptive a donc été une tâche de catégorisation cette fois contrainte : au lieu d'être libres dans le nombre de groupes à réaliser, les participants devaient classer chaque son (sons présentés un par un) dans l'une ou l'autre des « familles » définies par la présentation de trois exemples lors de la phase de familiarisation. En d'autres termes, les participants devaient décider de l'appartenance à l'une ou l'autre famille en fonction de la ressemblance à la catégorie définie implicitement à partir des trois exemplaires.

Ici, les sons proposés lors du test résultent de l'accélération d'un facteur 1 200 des enregistrements sismiques¹⁰.

Résultats

Contrairement aux tests de la section précédente (p. 36), ayant défini ici auprès des participants les deux « familles » attendues, nous pouvons ici parler des « performances » des participants et supposer qu'il existe des réponses « correctes » (par exemple un son de la famille A a été mis dans la famille A) et « incorrectes » (par exemple un son de la famille B a été mis dans la famille A), à partir des attentes des chercheurs en regard des hypothèses de construction des stimuli. Nous pouvons ainsi définir un taux de réponses correctes pour chaque participant.

Un taux de 63 % et 52 % de réponses correctes a été observé lors des tests D2T1 (chemin de propagation des ondes) et D2T2 (mécanisme au foyer) respectivement. Les bons résultats de D2T1 suggèrent qu'un chemin océanique ou continental de propagation est suffisamment caractéristique pour être repérable auditivement. En revanche, les résultats moyens de D2T2 semblent suggérer que le mécanisme au foyer est un paramètre trop peu discriminant, non signifiant ou trop difficile à interpréter pour le système auditif humain... Mais il subsiste des questions :

Est-ce que l'audition est ici moins performante que la vision ? (voir section Audification et vision, page 39) Est-ce que l'apprentissage pourrait améliorer les performances auditives ? (voir section Influence de l'apprentissage, p. 39)

Discussion

Influence du facteur de compression

La comparaison de D1T1, D1T1a et D1T1b nous permet de constater qu'en changeant le facteur de compression, le niveau de catégorisation employé par les participants est modifié. En effet, l'utilisation de différents facteurs de compression permet de transposer la gamme de fréquences sismiques dans différentes gammes de fréquences audibles (plus le facteur de compression est élevé, plus l'onde sera « lue » rapidement, plus les fréquences audio résultantes seront élevées). Les signaux de base restant identiques, il n'est pas surprenant que les catégories restaient similaires entre D1T1 et D1T1a/b, mais il était également attendu que l'emploi d'une autre gamme de fréquence souligne ou masque certains aspects sonores, aboutissant à la non-différenciation de sous-catégories pour ne produire qu'une catégorie ou conduisant à l'éclatement d'une catégorie en plusieurs sous-catégories. Ainsi, selon les hypothèses des chercheurs (quels aspects sonores ou sismiques souhaitez-vous révéler ?), le facteur de compression peut être décisif pour orienter la perception et la reconnaissance auditive.

Influence de l'expertise des participants

Afin d'affiner nos hypothèses sur le rôle de l'expérience sensorielle et des connaissances préalables des participants tant en acoustique qu'en géologie, nous avons également pu comparer les réponses des participants en contrastant leurs expertises : population d'« acousticiens » et population de « géologues ». Si les deux populations réalisent des groupes similaires ou obtiennent des « performances » similaires sur la base du traitement des propriétés physiques des signaux, ils diffèrent dans la manière de décrire les sons et groupes, qui renvoient à des interprétations différentes.

On peut en effet observer une utilisation différente de la langue pour décrire les phénomènes sonores : les acousticiens utilisent davantage de formes lexicales, utilisant une terminologie propre à l'acoustique, et décrivent « **les sons** » qu'ils identifient dans chaque stimulus, alors que les géologues décrivent « **le son** [d'un séisme] ». Les acousticiens tendent à avoir davantage une approche analytique exprimant les propriétés physiques des sons alors que les géologues témoignent d'une approche globale du phénomène sonore perçu, à partir de l'identification de la source du son (écoute « causale »).

En outre, les acousticiens, entraînés à étudier et décrire les sons, utilisent davantage de mots et un vocabulaire plus varié (termes issus de l'acoustique) que les géologues (vocabulaire de sens commun), témoignant d'interprétations différentes des « mêmes » signaux. Notons également que certains aspects du son ne sont discutés que par une seule des deux populations.

¹⁰- Les sons sont disponibles à l'adresse <http://hestia.jgs.jussieu.fr/%7Eboschil/downloads.html>, consulté le 23 juillet 2018

Audification et vision

La tâche de catégorisation contrainte de chaque extrait sonore lors de D2T1 et D2T2 succédait à une même tâche employant la modalité visuelle : une représentation visuelle (tracé temporel de la mesure du sismomètre) de chaque signal était montrée au participant, qui devait l'attribuer à une des deux familles (également définies à l'aide de trois exemples lors de l'étape de familiarisation). Ceci nous a permis de comparer l'utilisation des modalités visuelle et auditive pour une tâche de catégorisation de signaux sismiques.

Pour les deux tests les performances visuelles dépassaient les performances auditives : 78 % contre 63 % de réponses correctes pour D2T1 (chemin de propagation des ondes), 62 % contre 52 % pour D2T2 (mécanisme au foyer).

De manière non surprenante, la modalité visuelle est, eu égard à la suprématie de la vision dans nos sociétés et dans notre éducation, plus performante : nous sommes beaucoup plus habitués à utiliser la vision dans des tâches de tri, d'identification de similarités, etc. Néanmoins, si on considère le fait que l'exposition à des sons résultant de l'audification de sismogrammes était inédite pour la grande majorité des participants, il est clair que les performances de la modalité auditive sont remarquables, et on peut attendre une amélioration après apprentissage (voir section suivante).

Influence de l'apprentissage

Au vu des résultats du test D2T2, nous avons voulu évaluer si les « performances » des participants pouvaient être améliorées grâce à une période d'apprentissage. Dix-sept personnes sont revenues pour participer une seconde fois à D2T2, cette fois-ci comprenant une phase d'entraînement (vingt-quatre sons, dont douze nouveaux par rapport à la première itération de D2T2, qu'il fallait attribuer à chacune des mêmes familles que précédemment, le protocole indiquant au participant immédiatement après sa réponse s'il avait choisi la réponse « correcte » ou « incorrecte ») précédant la phase de test (trente-six nouveaux sons).

À l'issue de cette deuxième itération, nous avons trouvé que les « performances » se sont améliorées pour treize participants, et que le taux de réponses « correctes » était au-dessus de 70 % pour six participants (soit au-dessus des performances visuelles). Au terme d'un si court apprentissage, ce résultat est très encourageant et la piste mérite d'être explorée plus avant.

Conclusion et perspectives

Ce court article est nécessairement incomplet, et le lecteur souhaitant avoir davantage d'informations pourra se référer à [25,26,33].

Nous avons montré que l'écoute de signaux sismiques audifiés permettait d'identifier des aspects sonores qui pouvaient être associés à des phénomènes physiques, même si les participants n'ont jamais été exposés précédemment à de tels sons. Dans chacun des tests, le tri a été accompagné d'une description verbale des sons et groupes qui nous a permis d'identifier les aspects

sonores pertinents pour les auditeurs et de les comparer aux descripteurs calculés sur les signaux. Pour l'exprimer autrement, ces résultats nous suggèrent que nous pouvons utiliser la puissance du système auditif et cognitif humain pour explorer, analyser et interpréter les signaux sismiques pour enrichir les analyses issues de la vision ou des algorithmes automatiques.

L'exploration auditive de données sismiques pourrait être utilisée par les spécialistes afin de développer heuristiques, inspirations et nouvelles pistes sur des signaux inconnus ou insuffisamment décrits : pourquoi par exemple se focaliser sur des aspects temporels du signal quand des variations de spectre nous paraissent plus marquées et discriminantes après analyse auditive ?

Dans les perspectives immédiates, nous notons les expériences en cours dans notre équipe où l'écoute ne s'opère plus à partir d'un seul canal (un signal à la fois) mais utilise la spatialisation (autant de sources, réelles ou virtuelles, que de sismomètres « écoutés ») afin d'incorporer dans l'analyse la dimension spatiale des données.

Enfin, les performances des systèmes auditif (puissant outil d'analyse spectro-temporelle) et cognitif (capacité à grouper les stimuli suivant leur similarité, en fonction de l'expertise, et en adaptant le choix des critères de tri à la situation) humains peuvent inspirer les recherches actuelles mêlant sismologie et apprentissage automatique : citons Holtzman [34] qui propose la classification automatique de spectrogrammes sismiques (et non simplement de signaux sismiques : les aspects temporels ET spectraux sont considérés) par apprentissage non supervisé (qui peut être vu comme une sorte de tâche de tri libre).

En conclusion provisoire : l'utilisation de la sonification pour l'analyse et l'exploration de données scientifiques montre des premiers résultats prometteurs, qu'il s'agisse de l'utiliser directement ou d'inspirer d'autres champs disciplinaires !

Références bibliographiques

- [1] G. Kramer, B. Walker, T. Bonebright, P. Cook, J. H. Flowers, N. Miner et J. Neuhoff, "Sonification report : Status of the field and research agenda". Technical report, ICAD/NSF, 1999
- [2] J. Goody, "La Raison graphique, La domestication de la pensée sauvage" traduction française, Paris : Ed. de Minuit, 1979
- [3] B. Latour, "Visualization and cognition", *Knowledge and society*, 6(6):1-40, 1986
- [4] S. Targett, M. Fernström, "Audio games : Fun for all? All for fun?", *Proceedings of the International Conference on Auditory Display*, 2003
- [5] T. Hermann, A. Hunt et J. G. Neuhoff, "The Sonification Handbook", Logos Verlag, Berlin, Allemagne, 2011
- [6] W. W. Gaver, "The SonicFinder : An Interface That Uses Auditory Icons", *Human-computer interaction* 4:67-94, 1989
- [7] S. D. Speeth, "Seismometer sounds", *the Journal of the Acoustical Society of America* 33(7):909-916, 1961
- [8] G. E. Frantti et L. A. Levereault, "Auditory discrimination of seismic signals from earthquakes and explosions", *Bulletin of the Seismological Society of America* 55(1):1-25, 1965
- [9] A. Volmar, "Listening to the Cold War : The Nuclear Test Ban Negotiations, Seismology, and Psychoacoustics 1958-1963", *Osiris* 28(1):80-102, 2013
- [10] G. Kramer (Ed.), "Auditory Display : Sonification, Audification, And Auditory Interfaces", Avalon Publishing, 1994

- [11] F. Dombois, "The muscle telephone. The undiscovered start of audification in the 1870s", in J. Kursell (Ed.), *Sounds of Science*, Berlin, Allemagne, pp. 41-45, 2008
- [12] F. Dombois et G. Eckel, "Audification" (chapitre 12), in T. Hermann, A. Hunt et J. G. Neuhoff, "The Sonification Handbook", Logos Verlag, Berlin, Allemagne, 2011
- [13] D. Kilb, Z. Peng, D. Simpson, A. Michael, M. Fisher, D. Rohrlack, "Listen, watch, learn : SeisSound video products", *Seismological Research Letters* 83(2):281-286, 2012
- [14] B. Holtzman, J. Candler, M. Turk et D. Peter, "Seismic sound lab: Sights, sounds and perception of the Earth as an acoustic space", in *Sound, Music, and Motion*, New York : Springer International Publishing, pp. 161-174, 2014
- [15] C. Hayward, "Listening to the Earth sing", in *Auditory Display. Sonification, Audification, and Auditory Interfaces*, G. Kramer (Ed.), Reading : Addison-Wesley, chap. 15, pp. 369-404, 1994
- [16] F. Dombois, "Using audification in planetary seismology", *Proceedings of the International Conference on Auditory Display*, 2001
- [17] F. Dombois, "Auditory seismology. On free oscillations, focal mechanisms, explosions and synthetic seismograms", *Proceedings of the International Conference on Auditory Display*, 2002
- [18] J. S. Bruner, "Acts of meaning", Cambridge : Harvard University Press, 1990
- [19] D. Dubois, "Categories as acts of meaning : the case of categories in olfaction and audition", *Cognitive science Quarterly* 1:35-68, 2000
- [20] D. Dubois, C. Cance, "Vers une sémiotique du sensible : des couleurs en discours et en pratiques", *H.E.L. 34 (1 La linguistique cognitive : histoire et épistémologie)*, pp. 63-96, 2012
- [21] C. Cance, "Termes de couleur en discours et concepts de couleurs", in *Lidilem* (Ed.), *Autour des langues et du langage : Perspective pluridisciplinaire* (pp. 161-168), Grenoble : Presses Universitaires de Grenoble, 2008
- [22] E. Landi, R. L. Alexander, J. R. Gruesbeck, J. A. Gilbert, S. T. Lepri, W. B. Manchester et T. H. Zurbuchen, "Carbon ionization stages as a diagnostic of the solar wind" *Astrophysics Journal* 744(2):100, 2012
- [23] K. V. Nesbitt et S. Barrass, "Finding trading patterns in stock market data", *IEEE Transactions on Computer Graphics and Applications* 24 :45-55, 2004
- [24] D. Vicinanza, R. Stables, G. Clemens et M. Baker, "Assisted differentiated stem cell classification in infrared spectroscopy using auditory feedback", *Proceedings of the International Conference on Auditory Display*, 2014
- [25] A. Paté, L. Boschi, J.-L. Le Carrou et B. Holtzman, "Categorization of seismic sources by auditory display : A blind test", *International Journal on Human-Computer Studies* 85 :57-67, 2015
- [26] A. Paté, L. Boschi, D. Dubois, J.-L. Le Carrou et B. Holtzman, "Auditory display of seismic data : On the use of experts' categorizations and verbal descriptions as heuristics for geoscience", *The Journal of the Acoustical Society of America* 141(3):2143-2162, 2017
- [27] R. Kerr, "Geophysical exploration linking deep earth and backyard geology", *Science* 340:1283-1285, 2013
- [28] K. Keranen, M. Weingarten, G. A. Abers, B. Bekins, S. Ge, "Sharp increase in central Oklahoma seismicity since 2008 induced by massive wastewater injection", *Science* 345 :448-451, 2014
- [29] É. Parizet, V. Koehl, "Application of free sorting tasks to sound quality experiments", *Applied Acoustics*, 73(1):61-65, 2012
- [30] P. Gaillard . *Laissez-nous trier !* In D. Dubois (Ed.), *Le sentir et le dire*, pp. 189-210. Paris, France : L'Harmattan, 2009
- [31] A. Paté, J.-L. Le Carrou, B. Navarret, D. Dubois et B. Fabre, "Influence of the Electric Guitar's Fingerboard Wood on Guitarists' Perception", *Acta Acustica United with Acustica* 101 :347-359, 2015
- [32] C. Guastavino, "Categorization of Environmental Sounds", *Canadian Journal of Experimental Psychology* 61(1):54-63, 2007
- [33] L. Boschi, L. Delcor, J.-L. Le Carrou, C. Fritz, A. Paté et B. Holtzman, "On the Perception of Audified Seismograms", *Seismological Research Letters* 88 (5):1279-1289 (2017)
- [34] B. K. Holtzman, A. Paté, J. Paisley, F. Waldhauser et D. Repetto, "Machine learning reveals cyclic changes in seismic source spectra in Geysers geothermal field", *Science Advances* 4(5):eaao2929, 2018