Intelligibilité du numérique

N° 7 | 2025
Le 4ème paradigme en question

Les apports du son dans la restitution du sens : de la sonification à la musification des données

David LAMBOLEY *Doctorant*
IMSIC
Université de Toulon

Édition électronique :
URL :
https://intelligibilite-numerique.numerev.com/articles/revue-7/3213-les-apports-du-son-dans-la-restitution-du-sens-de-la-sonification-a-la-musification-des-donnees
Date de publication : 04/05/2025

CertiScience© *Certifié évalué par les pairs*

Cette publication est sous licence **CC BY-NC-ND** (Attribution - No commercial - No derivatives).

Pour **citer cette publication** : LAMBOLEY, D. (2025) Les apports du son dans la restitution du sens : de la sonification à la musification des données. *Intelligibilité du numérique*, (7). https://doi.org/10.34745/

Dans un monde saturé par les données numériques, où l'information est omniprésente et les volumes à traiter deviennent exponentiels, la question de leur intelligibilité pour les humains se pose de façon inédite et pressante. Comme le souligne Bruno Bachimont (2022), la difficulté réside non seulement dans la constitution de corpus pertinents à partir de vastes ensembles, mais également dans la visualisation et l'interprétation des résultats, souvent opaques en raison de la complexité des opérations qui les sous-tendent. C'est précisément dans cette perspective que le son, à travers la sonification et la musification, se révèle être une alternative intéressante. La musification est ici envisagée comme une démarche fondamentalement épistémologique ; sa finalité n'étant pas de transformer les données en création purement esthétique, mais de les rendre intelligibles en exploitant notre sensibilité auditive et nos compétences musicales naturelles. Cet article se propose d'explorer en profondeur les apports du son dans la restitution du sens. Cette approche démontrera la capacité de la musification à réconcilier, par l'intégration de la rigueur objective et de l'expérience sensorielle, les sciences de la nature et les sciences de l'homme.

The contributions of sound to the restitution of meaning: from sonification to the musification of data

In a world saturated with digital data, where information is ubiquitous and the volumes to be processed are becoming exponential, the question of their intelligibility for humans arises in an unprecedented and pressing manner. As Bruno Bachimont (2022) underlines, the difficulty lies not only in the constitution of relevant corpora from vast sets, but also in the visualization and interpretation of results, often opaque due to the complexity of the operations that underpin them. It is precisely from this perspective that sound, through sonification and musification, proves to be an interesting alternative. Musification is here conceived as a fundamentally epistemological approach; its purpose is not to transform data into purely aesthetic creation, but to make them intelligible by exploiting our auditory sensitivity and our natural musical skills. This article aims to explore in depth

the contributions of sound to the restitution of meaning. This approach will demonstrate musification's ability to reconcile, through the integration of objective rigor and sensory experience, the natural sciences and the human sciences.

Mots-clés :
Épistémologie, Sémiotique, Sonification, Musification, Réalisme structural, Systèmes complexes, Agents artificiels, Invariants morphologiques, Intelligibilité des données, Epistemology, Semiotics, Data intelligibility, Sonification, Musification, Structural realism, Complex systems, Artificial agents, Morphological invariants

---

1. Introduction

Dans un monde saturé par les données numériques, où l'information est omniprésente et les volumes à traiter deviennent exponentiels, la question de leur intelligibilité pour les humains se pose de façon inédite et pressante. Le 4ème paradigme de la science (Gray, 2009), caractérisé par la prolifération de bases de données massives et l'automatisation des traitements, confronte en effet les chercheurs et le public à une double problématique. Comme le souligne Bruno Bachimont (2022), la difficulté réside non seulement dans la constitution de corpus pertinents à partir de vastes ensembles, mais également dans la visualisation et l'interprétation des résultats, souvent opaques en raison de la complexité des opérations qui les sous-tendent.

Cette opacité est révélatrice d'un phénomène que Bachimont (2014) qualifie de nominalisme radical du numérique. En écho au nominalisme médiéval, qui avait mis à distance le lien ontologique entre la langue et la nature, le numérique opère selon lui une transformation similaire en réduisant les contenus à de simples faits constatés et analysables par le calcul. Dans ce contexte, la connaissance tend à se réduire essentiellement au traitement algorithmique et à l'analyse statistique, risquant de déconnecter les données de leur signification intrinsèque et de la richesse de la culture humaine dont elles sont issues.

Face à ce défi épistémologique, alors que la visualisation des données demeure la modalité dominante de représentation de l'information, notre démarche propose une voie différente. Il s'agit de dépasser ce nominalisme en lui substituant ce que Bachimont (2022) appelle un réalisme de la perception. Cette approche vise à renouer avec une compréhension intuitive et incarnée des phénomènes, en s'appuyant sur les capacités sensorielles inhérentes à l'être humain. C'est précisément dans cette perspective que le

son, à travers la sonification et la musification, se révèle être une proposition intéressante. Le son offre en effet une modalité unique pour “donner du sens aux données” (Bachimont, 2022), exploitant notre perception fine du mouvement, des structures, des symétries et des processus temporels pour révéler des informations qui échappent souvent aux représentations visuelles traditionnelles.

La sonification, comprise comme « *l’utilisation de signaux acoustiques non vocaux pour transmettre des informations* » (Kramer et al., 1999, p. 3), constitue le socle de cette démarche. Loin d'être une simple mise en son des données, elle représente une alternative pertinente à la visualisation, tirant parti des particularités de l’audition humaine. Au-delà de cette approche globale, nous nous intéresserons particulièrement à la musification, une forme particulière de sonification qui exploite les qualités intrinsèques de l'organisation musicale pour favoriser une compréhension plus riche et intuitive des données. La musification est ici envisagée comme une démarche fondamentalement épistémologique ; sa finalité n’étant pas de transformer les données en création purement esthétique, mais de les rendre intelligibles en exploitant notre sensibilité auditive et nos compétences musicales naturelles pour donner corps aux structures sous-jacentes des données massives.

Cet article se propose d'explorer en profondeur les apports du son dans la restitution du sens. Dans cette perspective, nous commencerons par la définition et les fondements de la sonification, avant de nous intéresser à la phénoménologie de l'écoute et de la perception sonore. Nous distinguerons ensuite la sonification de la musification, en détaillant ses mécanismes et ses modèles cognitifs. Enfin, nous examinerons ses conditions de légitimité et ses applications potentielles, pour terminer notre argumentaire en faveur d'une perspective philosophique ancrée dans le réalisme structural. Cette approche démontrera la capacité de la musification à réconcilier, par l'intégration de la rigueur objective et de l'expérience sensorielle, les sciences de la nature et les sciences de l'homme.

2. Définition et fondements de la sonification

La sonification, dans son sens le plus général, désigne « *la transformation de relations de données en relations perçues dans un signal acoustique dans le but de faciliter la communication ou l’interprétation* » (Kramer *et al*., 1999, p.3). Introduit en 1992 par Gregory Kramer, lors de la création de l'International Community for Auditory Display (ICAD), le concept s'inscrit dans le champ disciplinaire plus large de l'affichage auditif, qui englobe la capture, le traitement et la diffusion des données sonores.

Le terme générique de sonification désigne tant une discipline émergente qu'une technique, rendant ses frontières difficiles à délimiter aujourd'hui. Intrinsèquement interdisciplinaire, elle mobilise les domaines de la perception, de l'acoustique, du design, des arts et de l'ingénierie. Elle nécessite par ailleurs la coopération de

nombreux corps de métiers tels que des psychologues, informaticiens, ingénieurs, physiciens, compositeurs et musiciens, sans oublier les spécialistes du domaine concerné.

Une autre définition plus complète la présente comme une technique systématique et une pratique scientifique à part entière :

> *“Tout comme la visualisation scientifique, la sonification vise à permettre aux auditeurs humains d'utiliser leurs compétences perceptuelles très développées (dans ce cas-ci, les compétences d'écoute) pour donner un sens aux données. Plus précisément, la sonification fait référence à la technique utilisée pour créer un signal sonore de manière systématique et bien définie, qui implique les données examinées comme un ingrédient essentiel de l'informatique sonore.”* (Hermann, Hunt, & Neuhoff, 2011, p. 1)

2.1. Les conditions nécessaires pour définir la sonification

On observe aujourd'hui un nombre croissant d'artistes et de musiciens qui intègrent des données numériques dans leurs œuvres, au point de qualifier à tort leurs pièces de sonifications. En outre, la musique électronique contemporaine rejoignant fréquemment l'esthétique sonore de certaines de ces sonifications, une clarification sur les conditions préalables à l'usage du terme nous paraît indispensable afin de distinguer la création musicale de la sonification proprement dite.

Pour éclairer ce point, Hermann *et al*. (2011, p. 9) rappellent :

“ Une technique qui prend des données en entrée et produit un signal sonore mérite l'appellation de sonification, si et seulement si les conditions suivantes sont réunies” :

- **Le son reflète une propriété ou une relation contenue dans les données.** Un bruit d'objet naturel n'est pas une sonification, car aucune donnée externe n'entre en jeu. En revanche, frapper régulièrement une bouteille partiellement remplie d'eau répond bien à la définition : la hauteur du son qui varie en fonction du niveau de remplissage traduit la donnée représentant la quantité d'eau.
- **La transformation est complète et systématique.** Les règles liant données, interactions et variations sonores doivent être clairement spécifiées. Le hasard peut être admis, mais son domaine d'application doit être explicitement circonscrit.
- **La sonification est reproductible.** Soumis aux mêmes données et aux mêmes déclencheurs, le système doit générer un résultat structurellement identique. Des tests psychophysiques répétés doivent également aboutir aux mêmes conclusions.
- **Le dispositif accepte des données différentes et reste opérant en répétition avec les mêmes données.** Ainsi, jouer d'un instrument n'est pas considéré comme la sonification de l'état émotionnel de l'interprète, puisqu'il est

impossible de reproduire exactement ces données internes. En revanche, les gestes appliqués à l'instrument, considérés comme des données externes, peuvent être sonifiés. L'analyse permet alors de se focaliser sur les modèles d'interaction, plutôt que sur l'effet esthétique ou émotionnel de la musique.

2.2. Les différentes catégories taxinomiques de la sonification

2.2.1. L'audification

C'est la méthode de sonification la plus simple. Elle consiste à transformer des données physiques afin de les rendre audibles dans le champ de la perception humaine. Ces données peuvent être des ondes électromagnétiques ou mécaniques issues de capteurs en temps réel ou de modélisations physiques. Puisqu'elles sont inaudibles, leur sonification nécessite une transformation d'échelle temporelle et fréquentielle afin de les transposer dans le spectre sonore de l'auditeur (20 Hz à 20 kHz).

Selon Hermann *et al*. (2011, p. 240) :

> *“Dans l'audification, la relation est des plus intimes : les données parlent d'elles-mêmes... Bien que de nombreuses étapes de traitement utiles telles que le rééchantillonnage, le filtrage, la déformation non linéaire et l'étirement du temps permettent d'affiner la transition entre les données et l'espace sonore, les données deviennent un signal.”*

L'avantage de cette technique est de permettre la détection d'anomalies sur un ensemble de données, de les identifier et de les classer plus facilement ou encore de vérifier si un changement de conditions affecte une série entière. L'oreille humaine étant particulièrement sensible aux irrégularités et performante dans la détection de certains motifs dans le bruit, elle est précieuse dans l'analyse de signaux complexes.

L'audification est notamment utilisée en statistiques, médecine (EEG, ECG), sismologie ou astrophysique. N'exigeant pas de traitement avancé, cette méthode est la plus ancienne, comme en témoignent les expériences de Julius Bernstein qui fit entendre dès 1880 les potentiels d'action musculaires à travers un combiné téléphonique. Parmi d'autres applications concrètes, on la retrouve dans l'étude des signaux sismiques, l'analyse des ondes radio en astrophysique, ou encore le monitoring des flux de données financiers.

2.2.2. La mise en correspondance de paramètres (PMSon)

Cette méthode de sonification est si répandue qu'on la confond souvent avec la sonification elle-même. Elle consiste à mettre en relation la dimension des données avec la variation des paramètres du son (hauteur, intensité, durée, timbre, spatialisation).

Selon Hermann et al. (2011, p. 363) :

> "*Dans la sonification par mapping, la relation est médiatisée... Tout en étant très flexible et adaptable, la nature de la relation entre les données et le signal fait que les données contrôlent le signal sonore.”*

De nombreuses variations des paramètres sonores étant possibles, leur choix et leur mise en correspondance nécessitent de nombreux tests afin de trouver la meilleure représentation du phénomène étudié. En l'occurrence, les mappings les plus intuitifs ne sont pas toujours les plus aptes à sonifier efficacement. En outre, cette technique soulève principalement une question de lisibilité auditive : lorsque trop de variables sont superposées, l'écoute peut devenir confuse. La sonification par mapping impose par conséquent une pédagogie perceptive où il faut "apprendre à entendre" ce que chaque son signifie.

2.2.3. La sonification basée sur des modèles (MBS)

Cette méthode récente développée par Thomas Hermann consiste à simuler un système physique ou mathématique dont le comportement est influencé par les données. Ces dernières ne produisent pas directement un son, mais elles modifient les paramètres d'un modèle acoustique. Cette technique permet la construction d'un « objet virtuel » (réseau de masses-ressorts, membrane, champ de particules par exemple) dont les paramètres physiques (masses, raideurs, amortissements, topologie) sont calculés à partir du jeu de données. Par la suite, l'utilisateur ou un processus automatique vient exciter ce modèle, et les vibrations ou collisions qu'il produit sont ainsi directement rendues audibles.

La sonification basée sur des modèles se fonde sur deux intuitions majeures :

- **L'interaction** : la perception se construit à travers l'action, selon le principe de la **cognition incarnée** (Varela, Thompson, & Rosch, 1991).
- **L'écoute quotidienne** : nous sommes experts pour identifier la taille, la matière ou l'énergie d'un objet rien qu'en entendant sa réponse mécanique (Gaver, 1993).

Cette approche est donc particulièrement adaptée à l'exploration interactive et à la découverte de phénomènes émergents, car elle permet de percevoir le comportement global du système étudié et d'en comprendre le fonctionnement par une démarche heuristique.

2.2.4. Earcons et icônes auditives

Les earcons sont des signaux sonores abstraits, courts, souvent de nature musicale ou synthétique, qui peuvent représenter tout type d'information, bien qu'ils ne possèdent aucun lien sémantique avec celle-ci. Leur utilisation nécessite donc un apprentissage de la part de l'utilisateur afin qu'il acquière une forme de grammaire sonore permettant d'associer instantanément chaque motif auditif à la fonction, à l'état ou à l'alerte qu'il signale. Ils sont par exemple utilisés dans les systèmes d'exploitation (sons de démarrage ou d'extinction), les smartphones (notification de messages) ou les véhicules (alarme de portière). Il est souvent intéressant de les combiner afin d'établir des filiations et une hiérarchie entre eux, et ainsi de favoriser une certaine homogénéité sonore dans le système sonifié, notamment au sein des interfaces homme-machine.

À l'inverse, les icônes auditives sont des signaux sonores concrets, intrinsèquement liés à l'événement qu'ils désignent (feuille froissée pour le vidage de la corbeille). Ce lien sémantique, immédiatement reconnaissable, réduit fortement l'apprentissage requis par l'utilisateur. Leur efficacité repose sur une rapidité de compréhension, l'allégement de la charge visuelle et parfois même sur leur capacité à incarner une marque commerciale. On notera que leur utilisation reste limitée aux actions pour lesquelles un son réaliste préexiste, les icônes auditives se montrant moins adaptées à la représentation de concepts abstraits.

2.2.5. La sonification de l'espace ondulatoire (WSS)

La WSS est une technique expérimentale qui s'intéresse particulièrement aux données indexées dans l'espace ou dans le temps. Sa particularité est d'établir un lien inédit entre les données et leur représentation auditive, en balayant un champ scalaire (espace d'ondes) le long d'une trajectoire guidée par les données.

Selon Hermann e*t al*. (2011, p. 403) :

> *“Cette approche permet à la fois une définition hautement contrôlée de la représentation auditive ainsi que des variations sonores subtiles mais acoustiquement complexes au fur et à mesure que le modèle global change.”*

Cette technique est particulièrement intéressante pour la sonification de données biomédicales, ainsi que pour les applications liées au sport ou à la réadaptation, domaines où les mouvements répétitifs se traduisent par des orbites mesurables. La sonification de l'espace ondulatoire fonctionnant en temps réel, le son perçu pendant l'activité agit comme un retour immédiat d'information et renseigne ainsi sur les relations existantes entre l'exécution du mouvement et sa conséquence.

3. Réalité sensible et structuration symbolique

3.1. Pourquoi mettre les données en sons ?

Ayant pour ambition d'apporter une nouvelle intelligibilité aux données numériques, notamment celles issues du Big Data, la sonification ne saurait se réduire à une pratique purement esthétique, didactique ou communicationnelle. Par sa volonté d'instaurer une relation acoustique cohérente entre les phénomènes encodés et notre perception, elle ouvre en effet une véritable réflexion épistémologique sur la médiation de l'information. D'abord, elle invite à s'interroger sur la manière dont l'auditeur accède au monde par ses sens ; c'est-à-dire comment il transforme les percepts sensoriels, guidé par ses modèles internes, en représentations abstraites. Il s'agit ici de comprendre la solidité et la testabilité des structures de sens qui émergent de ce processus. Cette démarche implique par conséquent de considérer l'existence, au sein même des phénomènes, de véritables invariants perceptifs capables d'orienter et de contraindre l'expérience sensible. Elle conduit en outre à se questionner sur la façon dont notre système cognitif segmente, organise et manipule ces invariants pour élaborer des unités intelligibles.

3.2. Réalisme perceptif et modèles prédictifs

Touchant à la nature même de la connaissance et à la fiabilité de nos sens, l'opposition entre réalisme direct et réalisme indirect est un vieux débat qui anime l'histoire de la philosophie empiriste depuis des siècles. Dès l'Antiquité grecque, des penseurs comme Aristote soulignaient déjà l'importance de l'observation et de l'expérience sensorielle dans l'acquisition de la connaissance, questionnant par là même sur la nature de la réalité et la manière dont nous y accédons.

Plus tard, aux XVIIe et XVIIIe siècles, ce débat atteignit son apogée avec l'apparition des grands noms de l'empirisme britannique tels que John Locke, George Berkeley et David Hume. Durant cette période, le réalisme perceptif connut une phase intense de contestation et de développement, ce qui conduisit à une diversification de ses formes et à une sophistication de ses arguments. Cette tension entre l'intuition d'un accès immédiat au réel et les questions soulevées par la découverte de phénomènes perceptifs complexes a ainsi durablement marqué la philosophie de la perception et continue, dans une certaine mesure, d'alimenter les débats actuels.

3.2.1. Définition

Le réalisme perceptif désigne la position philosophique selon laquelle nos perceptions

nous donnent un accès direct au monde extérieur tel qu'il est, ou du moins, à des objets et des propriétés qui existent indépendamment de notre esprit. Cette position s'oppose à l'idéalisme, qui considère que le monde n'étant qu'une représentation mentale, il n'a pas d'existence autonome.

Le réalisme perceptif se décline en deux variantes :

- **Le réalisme direct** (ou naïf) : nous percevons le monde directement, sans aucun intermédiaire. Lorsque nous voyons une table, nous sommes en contact immédiat et direct avec la table et ses propriétés telles que sa forme ou sa couleur. Des philosophes comme Thomas Reid, figure de proue du réalisme écossais du sens commun, soutiennent que notre expérience quotidienne confirme cette idée d'un accès immédiat et non interprété au réel. Cette théorie simple et intuitive évite de postuler l'existence d'entités intermédiaires, mais elle est souvent critiquée pour sa conception infaillible de la perception.
- **Le réalisme indirect** (ou représentationnel) : notre perception du monde est médiatisée par des entités internes, telles que des représentations mentales ou des données sensorielles. Cette théorie défend l'idée selon laquelle nous ne sommes pas conscients des objets physiques eux-mêmes, mais plutôt d'intermédiaires causés par les objets externes et dont ils sont la représentation. Les arguments classiques contre le réalisme direct (notamment l'illusion, l'hallucination ou la variation perceptive – un même objet pouvant apparaître différemment selon l'observateur ou les conditions) ont historiquement alimenté une préférence pour des formes de réalisme indirect.

Pour répondre à ces objections, de nombreuses écoles de pensée au sein du réalisme perceptif ont vu le jour, dont voici un court récapitulatif :

- **Réalisme scientifique** : Les théories visent à décrire la structure véritable du monde, jusque dans ses entités invisibles ; leur succès prédictif s'explique par cette adéquation (Boyd, 1983 ; Putnam, 1975).
- **Réalisme écologique direct** : La perception est appréhendée comme un couplage immédiat organisme-environnement dans lequel elle détecte les possibilités d'action (*affordances*) offertes par le milieu (Gibson, 1979).
- **Disjonctivisme** : Les expériences de perception authentique et d'hallucination relèvent de catégories ontologiquement distinctes, même si elles peuvent être confondues par le sujet percevant (Snowdon, 1980 ; McDowell, 1982).
- **Neurophénoménologie** : Programme interdisciplinaire, apparenté à certaines versions du réalisme direct, qui met en relation données neuronales et descriptions subjectives de l'expérience (Varela, 1996 ; Lutz *et al*., 2013).
- **Théorie représentationaliste** : Illusions et hallucinations sont des représentations erronées dans lesquelles ce que vise l'esprit ne correspond pas à ce qui existe réellement (Dretske, 1995).
- **Réalisme critique** : Certaines qualités sensibles, dites primaires (forme, taille, mouvement), rendent fidèlement compte des objets externes, tandis que d'autres, dites secondaires (couleur, goût, son) dépendent partiellement de l'esprit et

attestent d’une médiation dans notre accès au réel (Russell, 1912).

Ces nombreuses variations du réalisme perceptif illustrent la richesse des approches visant à concilier l'idée d'un monde externe indépendant avec la complexité de notre expérience perceptive.

3.3. Codage prédictif et inférence active

Au XXe siècle, la psychologie expérimentale va encore complexifier ce schéma, en montrant que la perception est toujours conditionnée par l’action et par l’attente. Les recherches récentes montrent que la perception ne se réduit pas à une simple réception passive d’informations provenant du monde extérieur ; elle est au contraire influencée par la conjonction de l’action de l’individu sur son environnement, ses attentes, ses connaissances antérieures ou encore ses intentions (Dehaene, 2014). Ces observations rejoignent les théories motrices qui soutiennent qu’en écoutant la parole, nous accédons directement aux gestes articulatoires qui la génèrent (Liberman & Mattingly, 1985 ; Fowler, 1986).

Au cours des deux dernières décennies, les théories du codage prédictif et de l’inférence active (Friston, 2010) ont marqué un nouveau tournant. Elles permettent de mieux comprendre comment le cerveau construit activement notre perception du monde, en cherchant à minimiser en permanence l'erreur entre ses prédictions internes et les signaux sensoriels qu'il reçoit. Souvent associée à l'hypothèse du cerveau bayésien, cette approche réconcilie réalisme et constructivisme, affirmant que, bien que le monde existe indépendamment de nous, notre perception est activement construite par l'organisme.

Pour ce faire, le cerveau cherche constamment à minimiser son coût d'énergie libre (une mesure de la surprise), en ajustant ses prédictions ou en agissant sur l'environnement. Par exemple, cette action peut se traduire par des mouvements oculaires optimisant la captation de l’information, la manipulation directe d'objets pour que les sensations correspondent aux attentes, ou encore par l'ingestion d'eau lorsque le corps détecte une déshydratation menaçant son homéostasie.

Dans cette perspective, les illusions s’expliqueraient par les déficiences de nos schémas internes. Trop simples ou trop rigides, ils peinent à intégrer des données nouvelles. Firestone et Scholl (2016) ont par ailleurs montré que si notre cerveau ajuste bien l'interprétation, il ne crée pas le contenu sensoriel *ex nihilo*. Ainsi, l'illusion est moins une fabrication qu'un indice de la négociation, parfois conflictuelle, entre nos prédictions et ce que nos sens nous renvoient. Ces dynamiques de construction active de la perception trouvent leurs racines dans des théories fondamentales de l'organisation sensorielle, telles que celles de la Gestalt (Wertheimer, 1938 ; Wagemans *et al*., 2012) et de la sémiogenèse développée par le Groupe µ.

Concernant la sonification, cet éclairage nous permet de mieux comprendre comment les modèles de codage prédictif et de l'inférence active orientent l'écoute. Si la perception n'était qu'un artefact mental, rien ne garantirait qu'un motif sonore reflète une dynamique dont les données sont issues. Inversement, si elle relevait d'une transparence naïve, on omettrait la part d'inférence qui guide l'écoute. Dans ce cadre, l'épistémologie la plus pertinente est pragmatique-écologique : une forme sonore ne vaut que par la robustesse des prédictions qu'elle rend possibles ainsi que par la possibilité pour l'auditeur de les mettre à l'épreuve en ajustant son modèle prédictif.

Selon cette épistémologie, une sonification est adéquate si :

- Le mapping retenu implémente un modèle causal explicite, formalisable (en principe sous forme de distributions bayésiennes), qui relie la structure des données (par ex. des variables climatiques, des rythmes neuronaux) aux invariants du signal sonore.
- Les erreurs de prédiction produites lors de l'interaction de l'auditeur font office de diagnostic : elles doivent réorienter l'attention ou l'action exploratoire afin que la divergence informationnelle se réduise de manière continue.
- Les écarts répétés et clairement vérifiables entre prédictions et observations nécessitent une mise à jour transparente et accessible du mapping ou de la théorie sous-jacente, conformément au principe popperien de réfutabilité et à l'exigence de reproductibilité scientifique.

Un tel dispositif satisfait à une double exigence : il est réaliste, car le contenu sémantique du son renvoie à des régularités objectives ; et il est constructiviste, car l'interprétation dépend d'un modèle interne en permanence mis à l'épreuve. Dans cette configuration, les illusions auditives qui émergent ne sont donc pas des anomalies arbitraires. Au contraire, elles signalent la zone de validité du modèle et fournissent le gradient d'apprentissage qui orientera sa mise à jour (Firestone & Scholl, 2016). Par conséquent, la valeur scientifique d'une sonification se mesure autant par la robustesse de la réduction d'incertitude vérifiable auprès de différents auditeurs que par la traçabilité des prédictions qu'elle met en jeu. Sans ces conditions, aucun énoncé inductif tiré de l'écoute ne saurait être tenu pour fiable.

3.4. Flux sensoriel et structuration symbolique

En mobilisant le principe d'énergie libre et la modélisation hiérarchique bayésienne, les théories du codage prédictif et de l'inférence active nous offrent aujourd'hui un cadre explicatif pertinent pour décrire les processus cognitifs. Elles expliquent comment le système perceptif segmente spontanément le flux sensoriel selon les lois de la Gestalt, tout en intégrant les opérations de sémiogenèse décrites par le Groupe µ. Dans ce cadre, la signification naît de l'interaction entre des attentes internes, des figures formelles et des contraintes du milieu.

Il y a près d'un siècle, les travaux de la psychologie de la Gestalt (Wagemans *et al.*, 2012) ont démontré que notre système perceptif (qu'il soit visuel ou auditif), plutôt que de percevoir des fragments isolés, tend à organiser le flot continu d'informations capté par nos sens en formes cohérentes et significatives (Wertheimer, 1938). Les lois gestaltistes telles que la proximité, la similarité, la bonne continuation ou la clôture expliquent ainsi comment notre cerveau structure spontanément les éléments pour former des entités (formes, figure etc.) appelées Gestalts.

Cette organisation se vérifie dans le domaine auditif, avec, par exemple, le célèbre effet *cocktail-party*, où l'auditeur isole sans effort la voix de son interlocuteur parmi un brouhaha (Shinn-Cunningham, 2008). De même, le *streaming* auditif mis en évidence par Bregman permet de scinder un même signal acoustique en objets sonores distincts, notamment lorsque des différences suffisamment marquées de hauteur, de timbre, de rythme ou de position spatiale sont détectées (Bregman & Campbell, 1971).

Dans la même lignée que ces théories modernes, le Groupe µ souligne avec justesse que "percevoir, c'est déjà sémiotiser" (Groupe µ et *al*., 2011, p. 282), c'est-à-dire donner du sens et produire des signes. Selon le concept de la sémiogenèse développé par le groupe de chercheurs belge, la perception est en effet décrite comme un processus actif de création de sens, qui se déroule en deux étapes cycliques (Groupe µ, 1992). D'abord l'anasémiose, pendant laquelle la perception discrétise le continu sensoriel (ou gradient) par l'application de seuils, faisant ainsi émerger des entités et des qualités. Ensuite la catasémiose, où ces structurations orientent l'action possible sur le monde, le sens étant ici considéré comme la capacité du contenu informationnel à mobiliser l'action de l'organisme dans son environnement.

Dans le cadre de la perception sonore, la boucle dipolaire identifiée dans ce processus d'anasémiose fonde la mesure même des écarts acoustiques. Sans cette comparaison minimale, impliquant toujours deux valeurs et deux points de référence sensoriels, aucune variation de hauteur ou de timbre ne pourrait devenir signifiante. En pratique, cela implique qu'une sonification efficace doit régler ses seuils afin de maintenir un juste équilibre entre redondance et nouveauté : trop faibles, ils noient l'auditeur dans le bruit ; trop élevés, ils masquent les micro-écarts générateurs de sens. Pour transformer ces écarts en formes réellement interprétables, il convient de déterminer comment les faire entendre. C'est ici qu'intervient la grille plastique proposée par le Groupe µ (1970). Les quatre variables qu'elle recense décrivent les différentes manières de manipuler les écarts acoustiques :

- **Contraste** : rendre un seuil audible par un saut net d'intensité, de hauteur ou de densité spectrale.
- **Modulation** : souligner la progression d'un écart par une variation continue (glissando, fondu, filtre évolutif).
- **Rythme** : inscrire l'écart dans une alternance temporelle régulière ou délibérément perturbée.
- **Texture** : modeler la granularité du signal (grain, bruit, rugosité) pour révéler des microstructures autrement imperceptibles.

Tandis que les seuils de perception peuvent indiquer où un changement devient pertinent, la grille plastique indique comment le rendre perceptible et signifiant. Par l'articulation judicieuse de ces deux composantes, une sonification ne se contente pas uniquement de présenter des données : elle les convertit en formes auditives optimisées pour l'interprétation humaine. Cette organisation n'est pas seulement modale, car elle bascule rapidement dans un espace amodal d'abstraction où les caractéristiques sensorielles deviennent secondaires. C'est précisément pour cette raison que le cerveau humain est capable de comparer un motif rythmique, un diagramme ou un concept mathématique, ces derniers opérant à un niveau d'unités n'appartenant plus à leur modalité d'origine (Dehaene, 2014). Cet ancrage transmodal est d'ailleurs constitutif du développement cognitif humain. Dès les premiers mois, le nourrisson transfère spontanément une expérience d'une modalité sensorielle à une autre. Il construit ce que Zénouda nomme une "gestalt amodale", une synthèse auditive, visuelle et motrice dont les structures temporelles s'enracinent dans l'inconscient bien avant l'émergence du langage (Zénouda, 2023).

Dans le domaine de l'audition, cette capacité d'abstraction se traduit par une affinité particulière avec les rapports proportionnels. On sait, en effet, depuis Pythagore jusqu'à Helmholtz (1877), que l'oreille simplifie le spectre en fractions entières, générant la notion de consonance et, partiellement, celle de tonalité. Cette sensibilité aux proportions explique pourquoi de légères dérives rythmiques ou fréquentielles sont si saillantes. De même, si la perception des proportions musicales peut varier selon les cultures (McDermott *et al*., 2016), de nombreux phénomènes dynamiques (cycles circadiens, variations cardiaques, oscillations climatiques, etc.) peuvent néanmoins faire sens lorsqu'ils sont représentés par le son, l'auditeur détectant intuitivement les écarts aux relations proportionnelles attendues.

Dans le contexte de la sonification, cette sensibilité permet d'indexer les variables de données sur des intervalles ou des régularités que l'oreille reconnaît comme stables. Par exemple, un ratio de fréquence simple peut indiquer un seuil critique ; un léger désaccord signaler une anomalie ; ou une syncope rythmique mettre en évidence une rupture de tendance. Inscrite dans la grille plastique citée précédemment, cette stratégie mobilise seuils perceptifs, structure amodale et invariants auditifs. Elle assure que le signal restitue toujours un équilibre subtil entre une redondance assurant un ancrage, et une nouveauté porteuse d'information. Ainsi, une sonification rigoureuse repose sur la co-émergence d'une forme auditive stable : une interaction dynamique où contraintes physiques, traitements computationnels et capacités perceptives s'ajustent et se régulent mutuellement au fil du processus de médiation.

4. Phénoménologie de l'écoute et de la perception sonore

4.1. De l'expérience subjective à la compréhension du monde

Dans son approche questionnant le son en tant que forme intelligible, Günther Anders (2020) nous offre un précieux éclairage pour comprendre comment l'écoute, et plus particulièrement l'écoute musicale, peut transformer l'auditeur sur le plan ontologique. Il suggère en effet que lorsque l'être humain est placé dans une situation musicale qui l'implique dans des formes particulières de temps et de mouvement, il est transformé par ces dernières. Éloigné de son quotidien, il se trouve ainsi projeté dans un autre mode d'être. Cette expérience transformatrice modifie radicalement la perception de l'individu, l'arrachant de sa subjectivité habituelle pour l'ancrer dans une nouvelle forme d'existence sensorielle et temporelle. Ici, le son n'est donc pas seulement perçu passivement ; il construit activement la réalité subjective de l'auditeur et son rapport au monde.

Dans cette perspective, on peut supposer que la musique constitue une expérience initiatique ; ce qui explique pourquoi dans de nombreuses cultures le fait musical revêt souvent un caractère thérapeutique, mystique ou sacré (Rouget, 1980 ; Lambeau, 2010 ; Foley, 2020). Ce pouvoir transformateur du sonore trouve son origine dans sa dimension dynamique : le son n'est jamais figé et ne peut donc que se déployer dans le temps. Comme le souligne Jean-François Bordron (2017), il est un événement suspendu entre le passé et le futur qui prend place dans une temporalité vécue et liée au vivant. L'intelligibilité du son ne saurait se limiter au décodage d'informations ; elle relève davantage d'une profonde mise en relation avec les phénomènes et l'existence, au-delà de la simple analyse d'un signal audible.

Dans le prolongement de la pensée d'Anders, Don Ihde (1976) a également œuvré à restituer au son sa pleine épaisseur phénoménologique. S'appuyant sur Husserl et Heidegger, il propose une phénoménologie du son où la perception et l'attention auditives sont des dimensions centrales. L'un des apports majeurs de sa méthodologie réside dans l'évitement des métaphores visuelles lors de l'expérience auditive. Convaincu que la philosophie occidentale traditionnelle est trop influencée par la vue, ce qu'il nomme "l'oculocentrisme" ; il suggère que l'adoption d'une description du sonore enracinée dans les concepts heideggériens (tels que l'appel, le silence ou la voix) permettrait une ouverture salvatrice sur de nouveaux modes de pensée.

Décrire le son en termes purement physiques (ondes, fréquences) omettrait ce qui nous touche avant tout : que tout son se manifeste comme une voix, c'est-à-dire comme une prise de parole de quelque chose qui se présente à nous. Ce concept, étendu par Ihde à toutes les choses sonores (y compris les machines), suggère que tous les sons, selon lui, ne seraient en définitive que les voix des choses, des autres, des dieux et de soi-même.

Cette approche originale adoptée par Ihde révèle trois aspects essentiels du son :

- **L'intentionnalité auditive** : un son est toujours le son d'une chose. Par exemple, entendre un grincement, c'est immédiatement être mis en présence de la porte

qui grince. L’audible instaure un lien inévitable avec sa source, sans nécessiter de la voir.

- **La temporalité et la proximité** : à l'inverse de la vision qui établit une distance, le son enveloppe et se déploie. Sa nature éphémère oblige à une écoute ancrée dans le temps, sensible au flux, au rythme ou à l'événement.
- **La dimension affective et significative** : dire qu’un bruit est la voix d’une chose, c’est reconnaître qu’il porte déjà un sens tel que le danger, l’invitation ou la présence. Ihde élargit ici la voix au-delà du langage articulé pour y englober toute “donation” auditive du monde (Marion, 1997). Cette “donation”, par son intensité et son irréductibilité au concept, peut alors revêtir une dimension quasi sacrée, où le son, comme un événement pur, se donne en débordant toute mesure : c’est précisément l'un des pouvoirs troublant de la musique.

La position d’Ihde sur l'évitement de toute référence visuelle lors de l'écoute est particulièrement pertinente dans le cadre de la représentation des mégadonnées. Dans la mesure où ces données sont souvent temporelles, les métaphores visuelles limitent la perception des motifs auditifs inhérents à ces données complexes. C’est précisément pour cette raison que les promoteurs de la sonification la présentent comme une alternative intéressante à la datavisualisation. De plus, d'aucuns considèrent la sonification non pas comme une simple substitution technique, mais comme un impératif pratique, voire un changement épistémologique nécessaire dans l’approche des données (Kramer, 1994).

Dans ses travaux ultérieurs, Ihde (1990) montrera que nos rapports au sonore passent toujours par des instruments qui prolongent, filtrent ou transforment l’intentionnalité auditive. Le geste post-phénoménologique qu’il défend consiste à décrire comment le corps, l’artefact et le monde se construisent mutuellement :

- **Le corps module son propre schéma sensoriel** : par exemple, le cardiologue, par son stéthoscope, entend le cœur du patient comme un paysage intérieur.
- **L’artefact se révèle toujours polyvalent** : un même microphone peut servir aussi bien au soin, à la surveillance ou à la création artistique.
- **Le monde, par la médiation technique, apparaît sous de nouvelles formes** : l’océan perçu depuis un sonar se révèle comme un réseau de bips interprétables.

La méthodologie d'Ihde, qui emprunte à Husserl le procédé “d'époché,” est une réduction phénoménologique qui consiste à mettre entre parenthèses les croyances naturelles sur le monde pour accéder aux choses telles qu'elles apparaissent dans l'expérience. Transposée à l’écoute, cette réduction permet de se concentrer sur le phénomène sonore en lui-même, évitant ainsi de le réduire immédiatement à sa cause perçue ou à une image visuelle. Le cœur de cette démarche est donc l'intention, qui guide vers quoi se focaliser ou le type d’expérience vers laquelle se diriger. Différentes dimensions de la cognition incarnée (Varela *et al.*, 1991), notamment la dimension sensorimotrice et l’affectivité immédiate, sont mobilisées dans un geste qui articule des composantes intuitives, heuristiques et herméneutiques. Pour ce faire, la méthode pour transposer la réduction phénoménologique à l’écoute passe par trois étapes

complémentaires et simultanées :

- **Épochè auditive** : suspendre les explications physiques pour décrire ce qui se donne à l'écoute.
- **Variations imaginaires** : déplacer l'attention entre bruit de fond et événement saillant pour faire apparaître la structure figure/fond propre au sonore.
- **Horizon acoustique** : le son n'est pas bordé par une limite ; il enveloppe et situe le sujet dans un champ de résonances en mouvement.

4.2. L'objet sonore de Schaeffer

Dans son *Traité des objets musicaux* (1966), Pierre Schaeffer, pionnier de la musique concrète, introduit le concept central d'"objet sonore" dans une démarche qui rappelle celle de la réduction phénoménologique d'Anders et d'Ihde. Par cette approche, il remet en cause l'analyse musicale traditionnelle et vise à se concentrer sur le phénomène sonore en tant que tel, détaché de sa source ou de son contexte musical conventionnel. L'apport de Schaeffer demeure essentiel pour comprendre comment la perception auditive et l'expérience subjective du sonore peuvent initier de nouvelles formes de composition et d'analyse musicale, ouvrant ainsi la voie à l'expérimentation et à l'élargissement des frontières musicales.

En substance, l'objet sonore de Schaeffer pourrait se définir comme une perception globale et autonome ; un tout organisé qui se présente comme identique à travers différentes écoutes (Schaeffer, 1966).

Parmi les exemples emblématiques de ce procédé, citons les expériences du sillon fermé, où Schaeffer boucla pour la première fois un court fragment de son afin de l'analyser ; ou encore l'expérience de la cloche coupée où, tronquant par erreur l'attaque d'un son de cloche en le bouclant, il obtint contre toute attente un son de flûte.

Dans la continuité de l'objet sonore, Schaeffer distingue cinq modes d'écoute interconnectés et actifs simultanément. Ces modes, du plus rudimentaire au plus élaboré, offrent un cadre complet pour analyser comment nous appréhendons les phénomènes sonores :

- **Ouïr (écoute brute)** : Écoute non intentionnelle et courante, où un son est perçu sans attention particulière. Par ex. le bruit de la circulation en ville.
- **Écouter (écoute causale)** : Écoute dirigée vers la source pour en identifier la cause (tendre l'oreille vers un bruit inhabituel par ex.).
- **Entendre (écoute sémantique)** : Écoute orientée vers le sens ou le message, visant à comprendre la signification du son au-delà de son « *être* ».
- **Comprendre (écoute sémantique/linguistique)** : Écoute visant la construction du sens et la compréhension des valeurs véhiculées par le son, traité comme un

signe linguistique (écouter de la musique et ressentir des émotions par ex.).
- **Écoute réduite (écoute analytique)** : Écoute centrée sur les qualités propres du son, indépendamment de sa source ou de son sens (forme, timbre, dynamique etc.).

On notera que ces modes peuvent être catégorisés selon les axes abstrait/concret et objectif/subjectif. Ces dualismes sont universellement présents dans toute activité de perception. En outre, l'écoute réduite n'annule pas les quatre premières ; mais les suspend provisoirement pour mieux observer l'objet sonore.

Si chaque mode d'écoute répond à des besoins spécifiques, l'écoute réduite est cependant considérée comme le moyen privilégié pour faire émerger l'objet sonore dans un contexte musical. C'est par cette mise entre parenthèses de sa cause et de son sens habituel que le son, affranchi de ses contingences, peut révéler ses qualités intrinsèques et devenir une matière musicale autonome. Schaeffer souligne également que l'écoute réduite libère la musique des contraintes instrumentales et des systèmes de notation préétablis. Les sons du quotidien et les bruits peuvent alors être considérés comme des matériaux musicaux à part entière. C'est pourquoi il considérait l'écoute réduite comme un exercice indispensable pour affiner la perception auditive et sensibiliser l'auditeur aux nuances, textures et dynamiques des sons, y compris hors contexte musical.

On remarquera cependant que cette suspension de la référence n'est possible que par la nature acousmatique du son en musique, où la source est cachée. Ici, l'œuvre ne fournit pas de clé de décodage et le public n'attend rien d'autre que de vivre une expérience perceptive. C'est pourquoi l'écoute réduite est la base de la musique concrète : en enregistrant et transformant des sons du monde réel (bouclage, inversion, étirement, superposition, etc.), les compositeurs créent des œuvres où le son, par ses qualités propres, est l'élément principal, et non une simple représentation.

4.3. Sonification et écoute réduite

Néanmoins, dans le cadre de la sonification des données, l'application directe de la réduction schaefferienne peut rapidement poser des problèmes. L'auditeur, sachant ou devinant que la sonification est une visualisation sonore, perçoit inévitablement des liens entre les paramètres sonores et les données. Même si le son est acousmatique, la cause (la donnée) est toujours sous-entendue, orientant spontanément l'auditeur vers une écoute causale ou sémantique (Vickers, 2016). En d'autres termes, l'écoute réduite et la sonification ont des intentions opposées : la première met le sens entre parenthèses, tandis que la seconde vise précisément à en produire.

Afin de surmonter cet obstacle, qui pourrait d'emblée disqualifier l'écoute réduite en sonification, il est essentiel de l'intégrer dans un parcours global et une méthodologie spécifique, où chaque type d'écoute répond à des objectifs distincts. Par cette méthode,

la sonification s'inscrit alors pleinement dans la continuité du projet de Schaeffer, considérant le son avant tout comme une matière première. Elle devient un pont entre l'art sonore et l'analyse des données, prolongeant directement l'héritage de la musique concrète. L'idée fondamentale demeure l'utilisation de la manipulation technique du son pour créer une expérience à la fois esthétique et informationnelle.

Alors que la musique concrète, à son origine, visait principalement à révéler de nouvelles perspectives artistiques, la sonification, quant à elle, oriente aujourd'hui cette démarche vers la découverte de structures cachées au sein des données, transformant ainsi l'acte de composer en exploration scientifique. Grâce à l'utilisation majoritaire de sons de synthèse, la sonification peut également être considérée comme l'héritière fonctionnelle des musiques électroniques et, plus largement, de l'ensemble de la musique électroacoustique. Nécessitant flexibilité et contrôle précis sur les paramètres sonores, les sons de synthèse sont parfaitement adaptés à la sonification, car ils permettent non seulement de créer des timbres distincts et univoques, mais aussi de contrôler finement les paramètres sonores ou de générer des sons en temps réel.

Cette parenté conceptuelle entre musique concrète et sonification se manifeste tant dans la méthode que dans l'acte perceptif, révélant une continuité méthodologique. D'abord, les outils numériques contemporains, qu'il s'agisse d'algorithmes ou de logiciels de programmation sonore, héritent directement des bandes magnétiques et des anciens studios d'enregistrement. De même, les interfaces de mapping interactif prolongent la logique des tables de mixage, permettant une mise en relation dynamique du son et des données. Enfin, les techniques de traitement du son (filtrage, granulation, modulation, spatialisation) développées pour la musique concrète sont adaptées et utilisées en sonification pour sculpter le rendu sonore. Ensuite, une continuité perceptive guide l'utilisateur. Auditeur novice ou analyste confirmé, chacun est invité à mobiliser diverses formes d'écoute pour décrypter le sens ou identifier des motifs. C'est précisément l'invitation faite par Schaeffer à alterner écoute réduite et écoute causale qui fonde cette méthode.

Concrètement, le dispositif de sonification peut d'abord se présenter comme une texture sonore neutre, telle une toile de fond permettant à l'oreille de s'acclimater. C'est l'écoute réduite qui est ici sollicitée pour se concentrer sur les qualités intrinsèques du son (timbre, dynamique, spatialisation), sans référence directe aux données. Cette phase initiale de conception s'apparente à un banc d'essai acoustique, où se façonne une palette sonore stable et agréable. Ce n'est qu'après une action explicite de l'utilisateur que la dimension informative se dévoile : la légende sonore apparaît alors, permettant de relier chaque paramètre du son à une variable de données et de se concentrer sur les détails de l'information.

Cette transition entre une écoute centrée sur le son et une écoute axée sur les données est au cœur de l'expérience. Pour garantir cette fluidité et efficacité, une double évaluation est nécessaire. D'une part, celle de la qualité perceptive offerte par l'écoute réduite, qui comprend l'agrément d'écoute, l'absence de fatigue et la clarté des

contrastes. D'autre part, celle de l'efficacité fonctionnelle du système, évaluant l'exactitude de l'interprétation des données, le temps de réponse et la charge mentale associée au décodage.

5. Introduction à la musification

5.1. Définition

Parmi l'ensemble des techniques de sonification, la musification est une sous-catégorie de sonification par mapping particulièrement intéressante, car elle privilégie une approche plus expérientielle du signal sonore et apporte une dimension sémantique et perceptive inédite aux données. En favorisant une écoute esthétique, axée sur la cohérence perceptive, la continuité formelle et la suggestivité interprétative (Barrass & Vickers, 2011), elle rejoint ainsi l'idée de Günther Anders, selon laquelle la musique peut rendre le temps audible et transformer des abstractions techniques en une expérience concrète et partageable. Il ne s'agit donc pas ici d'une simple esthétisation des données, mais d'une transposition de leurs structures dans un espace morphologique exploitant les aptitudes musicales de l'auditeur. Dans cet espace, des éléments comme les motifs, les tensions, les résolutions, les timbres ou les contrastes agissent comme des médiateurs cognitifs qui rendent les données plus intelligibles.

L'idée fondamentale qui guide la musification est que l'organisation musicale, comprise en tant que grammaire temporelle du sensible (Moles, 1958), offre une grille structurante pertinente pour interpréter des données dynamiques, multidimensionnelles, voire chaotiques. En intégrant délibérément des éléments musicaux, tels que des gammes modales, des instruments aux harmoniques riches ou des structures de tension-résolution, certaines configurations de mapping permettent non seulement de rendre la donnée audible, mais surtout de la percevoir comme une organisation perceptive significative inscrite dans un schéma narratif (Dunham *et al*., 2022).

5.2. Des figures musicales dans les données

5.2.1. Les gammes

Les gammes peuvent être conçues comme des grilles discrètes de lecture où les données sont projetées via un mode de quantification (linéaire, logarithmique, modulo etc.) qui impose une périodicité et une cohérence tonale si désirée. Elles sont

l’équivalent auditif d’une palette de couleurs.

L’usage d’échelles (ionien, dorien, atonale, micro-tonale, etc.) permet de :

- Créer des univers sonores avec des valeurs affectives spécifiques et une musicalité immédiate, plus engageante et réduisant la fatigue de l’auditeur (Neuhoff, 2011).
- Compresser sémantiquement : un même degré de la gamme représentant des valeurs proches ; on peut résumer une information sans en perdre la tendance (Krumhansl, 1990).
- Réduire le bruit : une forte densité de points représentés pouvant saturer la tessiture sonore, la gamme impose un pas minimum entre les hauteurs qui facilite la perception de motifs distincts (Bregman, 1990).
- Ajuster la résolution perceptive : une gamme plus ou moins dense (pentatonique, chromatique etc.), permet d’adapter le niveau de détail auditif aux objectifs de l’analyse (Hermann, Hunt, & Neuhoff, 2011).
- Faciliter l’intégration multimodale : les degrés d’une gamme associés à des couleurs ou des positions visuelles communes renforcent la mémorisation et la compréhension (Walker, 2007).
- Uniformiser la comparaison entre jeux de données : la projection de plusieurs séries hétérogènes sur une tonalité permet d’enchaîner ou de superposer les sonifications sans collision de hauteurs (Barrass & Vickers 2011).
- Prévenir la surcharge temporelle : via le fenêtrage ou l’agrégation, la gamme permet de maintenir une densité d’événements sonore intelligible, même lorsque les flux de données sont très massifs (Hermann, Hunt, & Neuhoff, 2011).

5.2.2. Les accords

En tant que superpositions organisées de hauteurs, les accords agissent comme des condensateurs de complexité en offrant une appréhension globale des groupes de données. Ils jouent ici le même rôle que la gamme, mais en élargissant le filtre aux relations entre variables.

Ils permettent de :

- Regrouper plusieurs variables au sein d’un même objet sonore (Hermann, Hunt, & Neuhoff, 2011).
- Coder sémantiquement : les qualités, densités ou voix des accords font office de lexique affectif (Juslin & Västfjäll, 2008).
- Filtrer plus largement le signal sonore : chaque voix étant déjà quantifiée, la superposition crée une enveloppe spectrale stable (Bregman, 1990).
- Créer une narration temporelle : en chaînant des accords entre eux, des anomalies, ruptures, ou corrélations apparaissent intuitivement (Vickers, 2016).

Par exemple, la superposition de trois dimensions dans un espace sonore peut produire un accord consonant ou dissonant, reflétant la compatibilité ou le conflit entre des variables. Plus encore, l'agencement temporel de ces accords ou leur complexité peuvent être des indices de transitions dynamiques, d'instabilités structurelles ou d'interactions non linéaires au sein d'un jeu de données (Bregman, 1990).

5.2.3. Le timbre

En tant que signature spectrale et temporelle d'un son, le timbre constitue un vecteur multidimensionnel par excellence (Grey, 1977). Tandis qu'une note occupe un seul degré sur la gamme, son timbre peut varier simultanément sur la brillance, le taux de bruit, l'inharmonicité, l'attaque, la rugosité, le vibrato, etc. (McAdams, 1993). Il agit ainsi comme un hyper-canal qui ajoute des couches d'information sans encombrer la hauteur ni le rythme.

Il permet de :

- Porter plusieurs variables simultanément dans un même grain sonore, chacune étant mappée sur un aspect distinct du timbre (Grey, 1977).
- Coder sémantiquement : la pureté, la saturation, le grain ou la résonance forment un lexique affectif qui peut signaler une régularité, une complexité, une tension etc. (Vickers & Hogg, 2006).
- Filtrer et texturer finement le signal : des variations micro-spectrales rendent perceptibles de petits changements sans surcharger la mélodie (Hermann, Hunt, & Neuhoff, 2011).
- Spatialiser l'information : couplé au panoramique ou à la profondeur, il crée un axe supplémentaire dans le paysage sonore (Bregman, 1990).
- Tracer une morphologie évolutive : la trajectoire temporelle du timbre peut révéler des transitions, des instabilités ou des phases de stabilisation dans les données (Smalley, 1997).

5.2.4. Le rythme

En tant que succession d'impulsions, d'accents et de silences, le rythme convertit la dynamique d'un jeu de données en une temporalité directement ressentie par le corps. Ainsi, du battement macro jusqu'au concept de "microrythme" (Braff, s. d.), il agit comme une horloge interne en matérialisant une cadence, une variabilité ou une structure.

Il permet de :

- Rendre palpable la cadence globale : le tempo suivant l'accélération ou le ralentissement d'un indicateur, il permet de sentir instantanément si un flux s'emballe ou se calme (Hermann, Hunt, & Neuhoff, 2011).

- Encoder la volatilité : la variation, même légère, de l'espacement entre deux battements *(le jitter)* reflète l'instabilité immédiate des données (Vickers & Hogg, 2006).
- Segmenter et structurer : des motifs récurrents, des changements de métrique ou de densité peuvent servir de balises auditives pour marquer des phases, des cycles ou des transitions (Bregman, 1990).
- Alléger le flux sonore : un système d'impulsions utilisant des fenêtres, des seuils ou des subdivisions irrégulières permet de limiter le nombre d'événements et donne le temps d'assimiler chaque information (Large & Jones, 1999).
- Créer des tensions et relâchements narratifs : en juxtaposant des régularités, des syncopes ou des ruptures brusques de tempo, les anomalies, les ruptures ou les corrélations apparaissent intuitivement (Meyer, 1956).
- Inviter à l'ancrage corporel : le système moteur se synchronisant spontanément aux pulsations ; cet alignement peut devenir un canal d'interaction où l'utilisateur explore et valide les données par le geste (Leman, 2008).

Notons que le rythme complète la hauteur, les accords et le timbre en rendant les motifs de la donnée immédiatement palpables et complets. On obtient ainsi une synergie des paramètres qui couvre les quatre questions fondamentales d'un signal :

- Hauteur : "où" se situe la valeur ?
- Accord : "comment" cette valeur se combine avec les autres à cet instant ?
- Timbre : "quelles" caractéristiques internes elle porte ?
- Rythme : "quand" l'événement survient et avec quelle régularité ?

5.3. Musification, algorithmique et modèles cognitifs

En traduisant un corpus numérique en structures sonores que l'oreille peut organiser, comparer et interpréter selon des règles spécifiques (Vickers, 2016), la musification se situe à l'intersection du calcul formel des données et de la modélisation perceptive. Elle prolonge ainsi la composition algorithmique (Xenakis, 1992 ; Dodge & Jerse, 1997) ; les formes musicales émergeant ici de règles transformationnelles appliquées directement aux données brutes et non plus à des paramètres musicaux choisis par l'artiste. Ces formes peuvent notamment être conceptualisées par l'intermédiaire des Unités Sémiotiques Temporelles (UST), développées par le Laboratoire MIM de Marseille (Delalande, 1996), qui désignent des fragments sonores dont la morphologie dynamique porte un sens temporel intrinsèque, agissant comme des formes d'énergie perçues.

On remarquera une étonnante similitude entre le travail du compositeur algorithmique et celui du scientifique des données ; tous deux sélectionnant des fonctions de transformation, définissant des plages de variation, agençant des modules, et observant des effets sur leurs matériaux respectifs.

Elle se manifeste à plusieurs niveaux :

- La partition musicale et la structure de données partagent une fonction

d'organisation fondamentale.
- Le système modulaire de synthèse trouve son équivalent dans le pipeline de traitement des données.
- L'écoute active du musicien partage de grandes similitudes avec l'analyse exploratoire.

Cette analogie révelle la musification non comme une simple transposition, mais comme une véritable modélisation sensible. Elle opère une re-sémiotisation des données, les configurant en des formes sonores à la fois structurantes et expressives. Ce faisant, les formes générées ne sont plus de simples résultats esthétiques, mais d'authentiques objets d'interprétation; offrant ainsi un accès renouvelé à la connaissance des structures intrinsèques aux données numériques.

5.4. Conditions et légitimité de la musification

Cependant, toute musification ne produit pas automatiquement du sens : il existe dans cette pratique un vrai risque de projection arbitraire, d'esthétisation gratuite, voire de confusion perceptive. Pour éviter cet écueil, il est par conséquent impératif de déterminer les conditions d'une musification pertinente, c'est-à-dire d'une mise en forme sonore capable de structurer l'écoute et de guider l'interprétation.

Trois critères fondamentaux nous semblent pouvoir garantir la qualité de cette musification :

- **Pertinence perceptive** : les structures produites doivent être non seulement audibles, mais également facilement catégorisables, comparables et interprétables par l'auditeur.
- **Isomorphisme intelligible** : la forme sonore doit conserver, de manière analogique ou symbolique, les relations fondamentales et la structure essentielle présentes dans les données d'origine.
- **Intégration contextuelle** : la musification doit être conçue en fonction de l'usage visé tel que : l'exploration scientifique, le monitoring, la médiation pédagogique ou la création artistique.

En outre, il est important de noter que sonifier ne garantit pas nécessairement la vérité, mais propose plutôt un canal perceptif supplémentaire. On peut donc parfaitement sonifier des données non mesurées (simulations, statistiques, nombres abstraits), à condition de clarifier la chaîne d'inférence : Quelle est la source ? Quel est le modèle ou l'hypothèse ? Comment vérifie-t-on que ce que l'on croit entendre est bien lié au phénomène ciblé ? Une fois ces trois points documentés et que l'incertitude reste audible ou chiffrée, la sonification conserve alors toute sa légitimité en tant qu'outil scientifique, même lorsqu'il n'existe pas de point de contact direct avec un quelconque capteur.

Dans ces conditions, le son se révèle comme un puissant outil d'épistémologie

expérimentale : au-delà d’une simple traduction sensorielle, il permet une mise en forme du réel s'élaborant à travers les schèmes fondamentaux de la perception humaine. Par conséquent, une musification bien conçue ne se contente pas de faire entendre les données ; elle fait résonner notre monde vécu avec nos capacités cognitives, dans la mesure où notre corps et notre esprit constituent eux-mêmes les structures fondamentales du monde qu'ils perçoivent (Merleau-Ponty, 1945).

6. Du réalisme perceptif au réalisme structural

6.1. Des signatures sonores universelles ?

L'idée que certaines configurations sonores provoquent des effets significatifs sur les systèmes vivants n'est pas nouvelle. Par exemple, il est démontré que des effets physiologiques, tels que la hausse de l'ocytocine ou la modulation du cortisol, sont associés à certaines musiques chez l'humain (Chanda & Levitin, 2013), tandis que des réponses de croissance accrues sont observées chez les végétaux (Gagliano et al., 2012). Celles-ci convergent le plus souvent vers un même profil acoustique : un tempo modéré, une forte consonance et du bruit rose (rapport 1/*f*). Ces caractéristiques, loin d'être propres au biologique, sont des signatures structurelles universelles observées dans la dynamique de nombreux systèmes complexes, qu'ils soient physiques ou vivants (Voss & Clarke, 1975).

Cette alliance spécifique entre régularité prédictible et légère imprévisibilité renvoie à l'idéal pythagoricien de l'*harmonia mundi* et à la tripartition de Boèce (*musica mundana, humana et instrumentalis*), qui considèrent la musique humaine comme une traduction de l'ordre cosmique. Plus près de nous, Abraham Moles (1958) actualise cette idée par la notion d’esthétique de l'information : un signal est jugé plaisant lorsqu'il allie de façon optimale redondance et surprise, autrement dit lorsqu'il épouse le régime statistique des systèmes complexes évoqués précédemment.

6.2. Invariants acoustiques et expérience sensible

Dans le prolongement du réalisme perceptif, la détection d’harmonies ou de structures caractéristiques correspond à la saisie d’invariants relationnels au sein des objets étudiés. Si la préférence esthétique pour la consonance varie selon les cultures, la distinction entre consonance et dissonance repose sur des corrélats neurophysiologiques liés à la périodicité du signal et à la rugosité acoustique (Plomp & Levelt, 1965). Ici, la consonance n’est donc pas un jugement arbitraire, mais un indicateur de cohérence structurelle, immédiatement appréhendable par le système auditif.

Des penseurs tels que J. J. Gibson (1979) ont montré que notre système auditif est capable de percevoir directement ces invariants écologiques présents dans l'environnement. Pour aller plus loin, Merleau-Ponty (1945) décrit le corps comme un entrelacs de chair et de monde intrinsèquement capable d'éprouver la structure intime des forces qui l'entourent. Ainsi, une musification qui met en évidence des signatures consonantes et des fluctuations de rapport permet à l'auditeur d'entendre l'ordre structurel que recèlent les données. Inversement, une tendance vers la dissonance ou le bruit blanc signale une rupture d'équilibre, voire une anomalie significative au sein du système.

6.3. Vers un réalisme structural

Cette capacité soulève la question de l'universalité de la méthode : peut-on imaginer qu'une sonification, en révélant les principes physiques et mathématiques sous-jacents aux phénomènes, puisse dépasser les barrières disciplinaires et les limites cognitives pour offrir une compréhension partagée du monde ? Si nous considérons une équation non pas comme une abstraction pure, mais comme l'expression de relations structurales constitutives du réel, alors la sonification en devient l'écho sonore.

Cette approche trouve un appui épistémologique chez Domokos et *al*. (2020) qui démontrent que la fragmentation naturelle de la matière, au-delà du chaos apparent, tend statistiquement vers l'invariant géométrique du cube. Par extension, les objets sonores générés par musification ne sont plus de simples représentations, mais des signatures auditives traduisant les caractéristiques intrinsèques et les propriétés relationnelles des phénomènes qu'ils décrivent. En faisant écho aux intuitions pythagoriciennes et platoniciennes sur l'ordre mathématique du monde, ce positionnement défend l'hypothèse d'une correspondance entre les régularités présentes dans les structures du réel et nos capacités perceptives.

Il s'agit là d'un déplacement vers le réalisme structural qui implique que si la donnée numérique est, par nature, une inscription coupée de son origine, la musification permettrait d'en favoriser la compréhension en mettant en évidence des invariants relationnels. Dans ces conditions, en utilisant la donnée comme un véritable instrument de mesure, le chercheur n'écoute pas l'algorithme lui-même, mais la manière dont la trace du réel contraint ce dernier à manifester des signatures intelligibles. Cette démarche, articulant rigueur formelle et expérience sensible, propose ainsi une herméneutique du numérique dont la vocation serait de réconcilier les sciences de la nature et les sciences de l'homme, dans l'esprit de la pensée complexe d'Edgar Morin (2001).

7. Conclusion

Dans cet article, nous avons tenté de démontrer que la sonification, et plus particulièrement la musification, peut constituer un moyen pertinent de mieux comprendre les systèmes complexes. Face à l'opacité croissante des modèles numériques et à la saturation visuelle des interfaces, l'audition mérite d'être envisagée non comme un canal secondaire, mais comme un instrument à part entière de connaissance et de restitution du sens. Il convient toutefois de souligner que la sonification demeure aujourd'hui une pratique en développement, dont les dispositifs n'exploitent encore qu'une partie de son potentiel. L'avenir de ce champ expérimental résidera, selon nous, dans la conception d'outils dédiés à l'exploration en temps réel de phénomènes complexes, qu'il s'agisse de dynamiques physiques, biologiques ou sociales; ainsi que dans l'évaluation rigoureuse de leur apport cognitif.

En outre, l'intégration de signatures sonores dans l'apprentissage supervisé pourrait constituer une voie prometteuse, offrant aux agents artificiels une modalité supplémentaire pour appréhender la complexité de leur environnement, qu'il soit physique ou simulé. C'est notamment ce que démontrent les avancées en ingénierie biologique, où la musification permet par exemple la conception de nouvelles protéines assistée par intelligence artificielle (Kim et al., 2020). L'objectif de ce travail était de proposer un cadre théorique susceptible d'encourager les communautés scientifiques à considérer plus systématiquement le son comme outil d'investigation et d'innovation. En articulant calcul formel et formes sonores, la musification ne prétend pas se substituer aux méthodes analytiques existantes ; elle offre plutôt une voie complémentaire pour rendre les données perceptibles, leur restituant ainsi une dimension qui les rend plus intelligibles et exploitables.

8. Webographie

Braun, R. (MIT). Analyse de la dynamique cellulaire par la sonification. Étude sur la chimiotaxie bactérienne. Disponible sur : https://www.youtube.com/watch?v=2n__djVRgd8

NASA. Musification de données astrophysiques : la découverte de 5 000 exoplanètes. Disponible sur : https://www.youtube.com/watch?v=yv4DbU1CWAY

Temple, M. Sonification et visualisation en temps réel du génome du COVID-19. Plateforme interactive. Disponible sur :https://coronavirus.dnasonification.org/

Pauletto, S., & Barrass, S. Approches méthodologiques : du sound design à la sonification des données. Ressource pédagogique. Disponible sur :https://www.youtube.com/watch?v=v_hilp0t2-I

ICAD (2004). Listening to the Mind Listening : expérimentation collective de musification de données cérébrales (EEG). Concert et archives sonores. Disponible sur : https://www.icad.org/websiteV2.0/Conferences/ICAD2004/concert.htm

9. Bibliographie

Anders, G. (2020). *Phénoménologie de l'écoute* (M. Kaltenecker & D. Meur, Trans.). Éditions de la Philharmonie de Paris.

Bachimont, B. (2014). Le nominalisme et la culture : questions posées par les enjeux du numérique. In B. Stiegler (Ed.), *Digital studies, organologie des savoirs et technologies de la connaissance* (pp. 63–78). FYP Éditions.

Bachimont, B. (2022). Donner du sens aux données : les ruses du numérique. *Interfaces numériques, 11*(2). https://doi.org/10.25965/interfaces-numeriques.4838

Barrass, S., & Vickers, P. (2011). Sonification design and aesthetics. In T. Hermann, A. Hunt, & J. G. Neuhoff (Eds.), *The sonification handbook* (pp. 145–172). Logos Verlag.

Bordron, J.-F. (2017). Comment le son nous informe-t-il ? Communication & langages, 193(3), 49-62. https://doi.org/10.3917/comla.193.0049

Boyd, R. N. (1983). On the current status of the issue of scientific realism. *Erkenntnis, 19*(1–3), 45–90.

Braff, M. (n.d.). Basic principles. In *General theory of rhythm*. http://general-theory-of-rhythm.org/basic-principles/

Bregman, A. S. (1990). *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound*. MIT Press.

Chanda, M. L., & Levitin, D. J. (2013). The neurochemistry of music. *Trends in Cognitive Sciences, 17*(4), 179–193. https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.02.007

Dehaene, S. (2014). *Consciousness and the brain: Deciphering how the brain codes our thoughts*. Viking.

Delalande, F. (1996). Les unités sémiotiques temporelles : problématique et essai de définition. In *Les unités sémiotiques temporelles, éléments nouveaux d'analyse musicale* (pp. 1–43). Laboratoire MIM / Musurgia.

Dodge, C., & Jerse, T. A. (1997). *Computer music: Synthesis, composition, and performance* (2nd ed.). Schirmer Books.

Domokos, G., Jerolmack, D. J., Kun, F., & Török, J. (2020). Plato's cube and the natural geometry of fragmentation. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 117*(31), 18178–18185.

Dretske, F. (1995). *Naturalizing the mind*. MIT Press.

Dunham, P., Zareei, M. H., McKinnon, D., & Carnegie, D. (2022). Material Media Sonification: Sounding the visibly present artefact. *Organised Sound*, *27*(2), 243–253. https://doi.org/10.1017/S1355771822000383

Firestone, C., & Scholl, B. J. (2016). Cognition does not affect perception: Evaluating the evidence for top-down effects. *Behavioral and Brain Sciences, 39*, e229. https://doi.org/10.1017/S0140525X15000965

Fowler, C. A. (1986). An event approach to speech perception. *Journal of Phonetics, 14*, 3–28. https://doi.org/10.1016/S0095-4470(19)30607-2

Friston, K. (2010). The free-energy principle. *Nature Reviews Neuroscience, 11*, 127–138. https://doi.org/10.1038/nrn2787

Gagliano, M., Mancuso, S., & Robert, D. (2012). Towards understanding plant bioacoustics. Trends in Plant Science, 17(6), 323–325. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.03.002
Gaver, W. W. (1993). What in the World Do We Hear?: An Ecological Approach to Auditory Event Perception. *Ecological Psychology*, *5*(1), 1–29. https://doi.org/10.1207/s15326969eco0501_1
Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception.* Houghton, Mifflin and Company.
Gray, J. (2009). *The fourth paradigm: Data-intensive scientific discovery*. Microsoft Research.
Groupe µ. (1970). *Rhétorique générale*. Larousse.
Groupe µ. (1992). *Traité du signe visuel : Pour une rhétorique de l'image*. Seuil.
Groupe µ, Édeline, F., & Klinkenberg, J.-M. (2011). Pourquoi y a-t-il du sens plutôt que rien ? *Signata, 2*, 281–313. https://doi.org/10.4000/signata.729
Grey, J. M. (1977). Multidimensional perceptual scaling of musical timbres. *The Journal of the Acoustical Society of America, 61*(5), 1270–1277. https://doi.org/10.1121/1.381428
Helmholtz, H. von. (1877). *On the sensations of tone* (A. J. Ellis, Trans.). Longmans & Green.
Hermann, T., Hunt, A., & Neuhoff, J. G. (Eds.). (2011). *The sonification handbook*. Logos Verlag.
Ihde, D. (1976). *Listening and voice: A phenomenology of sound*. Ohio University Press.
Ihde, D. (1990). *Technology and the lifeworld: From garden to Earth*. Indiana University Press.
Iyer, V. (2002). Embodied Mind, Situated Cognition, and Expressive Microtiming in African-American Music. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, *19*(3), 387–414. https://doi.org/10.1525/mp.2002.19.3.387
Juslin, P. N., & Västfjäll, D. (2008). Emotional responses to music: The need to consider underlying mechanisms. *Behavioral and Brain Sciences*, *31*(5), 559–575. https://doi:10.1017/S0140525X08005293
Kim, C. H., Yu, C. H., Stephanopoulos, G., & Buehler, M. J. (2020). Sonification based de novo protein design using artificial intelligence, structure prediction, and analysis using molecular modeling. APL Bioengineering, 4(1), 016108. https://doi.org/10.1063/1.5133026
Kramer, G. (Ed.). (1994). *Auditory display: Sonification, audification, and auditory interfaces*. Addison-Wesley.
Kramer, G., Walker, B. N., Bonebright, T., Cook, P., Flowers, J., Miner, N., et al. (1999). Sonification report: Status of the field, recommendations for the future. ICAD.
Krumhansl, C. L. (1990). Cognitive foundations of musical pitch. Oxford University Press.
Large, E. W., & Jones, M. R. (1999). The dynamics of attentional rhythm. Psychological Review, 106(1), 119–159.https://doi.org/10.2307/40285567
Leman, M. (2008). *Embodied music cognition and mediation technology*. MIT Press.
Liberman, A. M., & Mattingly, I. G. (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition, 21*(1), 1–36. https://doi.org/10.1016/0010-0277(85)90021-6
Lutz, A., Dunne, J. D., & Davidson, R. J. (2013). Meditation and the brain: Attention, self-regulation, and consciousness. In P. D. Zelazo (Ed.), The Oxford Handbook of

Developmental Psychology, Vol. 2: Self and Oddity (pp. 487–527). Oxford University Press.
Marion, J.-L. (1997). *Étant donné : Essai d'une phénoménologie de la donation*. PUF.
McAdams, S. (1993). Recognition of sound sources and events. In S. McAdams & E. Bigand (Eds.), *Thinking in sound: The cognitive psychology of human audition* (pp. 146–198). Clarendon Press/Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198522577.003.0006
McDermott, J. H., Schultz, A. F., Undurraga, E. A., & Godoy, R. A. (2016). Indifference to dissonance in native Amazonians reveals cultural variation in music perception. *Nature*, *535*(7613), 547–550. https://doi.org/10.1038/nature18635
McDowell, J. (1982). Criteria, defeasibility, and knowledge. *Proceedings of the British Academy, 68*, 455–479.
Merleau-Ponty, M. (1945). *Phénoménologie de la perception*. Gallimard.
Meyer, L. B. (1956). *Emotion and meaning in music*. University of Chicago Press.
Moles, A. (1958). *Théorie de l'information et perception esthétique*. Flammarion.
Morin, E. (2001). *La méthode, tome 5 : L'humanité de l'humanité. L'identité et la conscience*. Seuil.
Neuhoff, J. G. (2011). Perception, cognition and action in auditory displays. In T. Hermann, A. Hunt, & J. G. Neuhoff (Eds.), *The sonification handbook* (pp. 63–85). Logos Verlag.
Plomp, R. and Levelt, W.J.M. (1965) Tonal Consonance and Critical Bandwith. The Journal of the Acoustical Society of America, 38, 548-560. https://doi.org/10.1121/1.1909741
Putnam, H. (1975). *Mathematics, matter and method: Philosophical papers* (Vol. 1). Cambridge University Press.
Rouget, G. (1980). *La musique et la transe*. Gallimard.
Russell, B. (1912). *The problems of philosophy*. Williams & Norgate.
Schaeffer, P. (1966). *Traité des objets musicaux*. Seuil.
Shinn-Cunningham B. G. (2008). Object-based auditory and visual attention. *Trends in cognitive sciences*, *12*(5), 182–186. https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.02.003
Snowdon, P. (1980). Perception, vision and causation. *Proceedings of the Aristotelian Society, 81*, 175–192.
Smalley, D. (1997). Spectromorphology: Explaining sound-shapes. *Organised Sound, 2*(2), 107–126 https://doi:10.1017/S1355771897009059
Varela, F. J. (1996). Neurophenomenology: A methodological remedy for the hard problem. *Journal of Consciousness Studies, 3*(4), 330–349.
Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The embodied mind: Cognitive science and human experience*. MIT Press. https://doi.org/10.7551/mitpress/6730.001.0001
Vickers, P., & Hogg, B. (2006). Sonification Abstraite/Sonification Concrète: An 'Æsthetic Perspective Space' for Classifying Auditory Displays in the Ars Musica Domain. In Proceedings of the 12th International Conference on Auditory Display (ICAD 2006) (pp. 210–216). London, UK.
Vickers, P. (2011). Sonification and music: Report on the 17th International Conference on Auditory Display. *Computer Music Journal, 35*(4), 84–91. https://doi.org/10.48550/arXiv.1311.5426
Vickers, P. (2016). Sonification and music, music and sonification. In M. Cobussen, V.

Meelberg, & B. Truax (Eds.), The Routledge Companion to Sounding Art (pp. 135–144). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315770567
Voss, R. F., & Clarke, J. (1975). « 1/f noise » in music and speech. Nature, 258(5533), 317–318. https://doi.org/10.1038/258317a0
Walker, B. N. (2002). Magnitude estimation of conceptual data dimensions for use in sonification. *Journal of Experimental Psychology: Applied, 8*(4), 211–221. https://doi.org/10.1037/1076-898X.8.4.211
Wagemans, J., Elder, J. H., Kubovy, M., Palmer, S. E., Peterson, M. A., Singh, M., & von der Heydt, R. (2012). A century of Gestalt psychology in visual perception: I. Perceptual grouping and figure–ground organization. *Psychological Bulletin, 138*(6), 1172–1217. https://doi.org/10.1037/a0029333
Wertheimer, M. (1938). Laws of organization in perceptual forms. In W. D. Ellis (Ed.), *A source book of Gestalt psychology* (pp. 71–88). Routledge & Kegan Paul.
Xenakis, I. (1992). *Formalized music*. Pendragon Press.
Zénouda, H. (2023). *La signification musicale : éléments pour une grammaire multimodale*. Dans B. Aroufoune (dir.), *À la racine du récit : écriture, création, communication*. https://hal.science/hal-05066659