

école
normale
supérieure
de lyon



ENS
LYON

une brève histoire des sons, entre théories et instruments de mesure

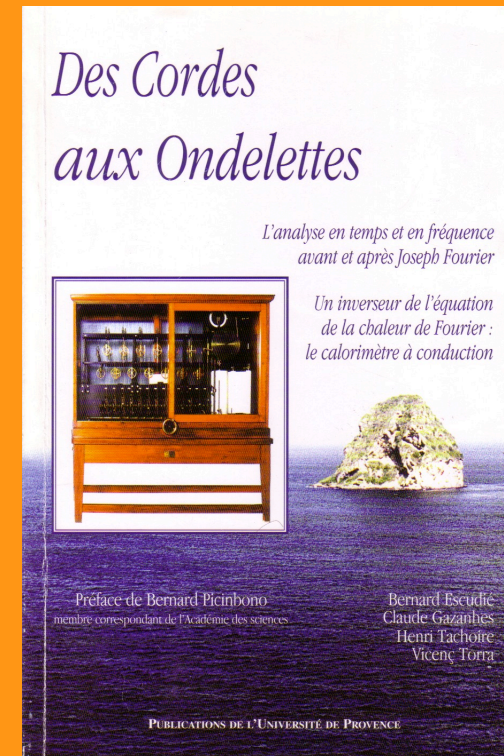
Patrick Flandrin

CNRS - Laboratoire de Physique

Des Cordes aux Ondelettes

Bernard Escudié (+)
Claude Gazanhes
Henri Tachoire
Vicenç Torra

Publications de l'Université de Provence, 2001



une histoire des sons ? |

un exemple de construction scientifique

naissance, évolution, extensions

les sons comme objets de science

de la musique à l'acoustique

le rôle des instruments de mesure

médiateurs de l'aller-retour théorie-expérience

l'école pythagoricienne

les sons procèdent du mouvement :

« Si tout demeurerait dans le repos et l'immobilité, il y aurait silence [...] aucun bruit ne frapperait l'oreille. Donc, pour que l'on puisse entendre quelque chose, il faut nécessairement qu'il y ait eu percussion et mouvement. [...] les sons seront plus aigus s'ils résultent de mouvements plus denses et plus nombreux, [...] plus graves s'ils résultent de mouvements plus rares et en plus petit nombre. » Euclide

le monocorde de Pythagore (580-490 av JC)

hauteur des sons et rapport de longueurs

de l'antiquité au moyen-âge I

l'héritage pythagoricien

l'harmonie des sphères de Platon (428-348 av JC)

la pensée est réservée à un « Monde des Idées » au-delà des phénomènes

Aristote (384-322 av JC)

référence dominante jusqu'à Thomas d'Aquin et sa condamnation en 1277

la naissance de la science expérimentale

Roger Bacon (1216-1292)

« Le raisonnement ne prouve rien, tout dépend de l'expérience »

l'observation comme base des théories

les lois de Kepler (1571-1630)

impossibilité de concilier le système de Copernic et les polyèdres platoniciens

l'expérimentation au-delà de l'observation

Galilée (1564-1642)

introduction de la notion de fréquence (« numeri delle vibrazioni »)

loi des longueurs pour le pendule simple

Marin Mersenne (1588-1648)

lois des cordes vibrantes

vers une science des sons I

de la musique...

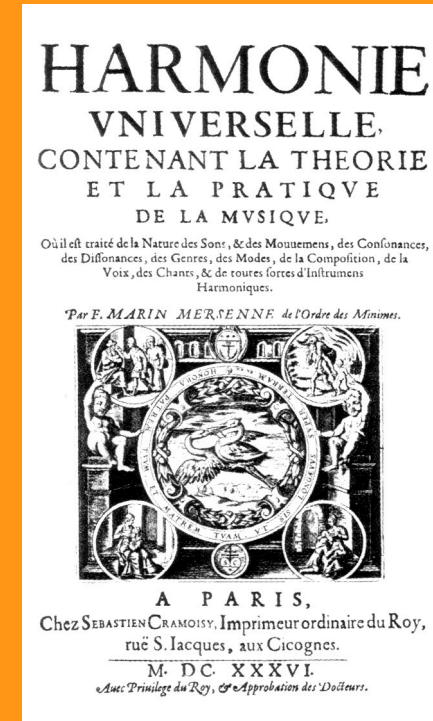
de Pythagore à Mersenne

l'harmonie comme maître-mot

... à l'acoustique

Joseph Sauveur (1653-1716)

« J'ai donc cru qu'il y avait une science supérieure à la Musique, que j'ai appelée Acoustique, qui a pour objet le Son en général, au lieu que la Musique a pour objet le Son en tant qu'il est agréable à l'ouïe »



le calcul et l'observation

1747 : l'équation de d'Alembert (1717-1783)
et sa solution propagative « arbitraire »

1748 : la condition initiale arbitraire de Leonhard Euler (1707-1783)
et sa réfutation par d'Alembert en 1750

1753 : la solution trigonométrique de Daniel Bernoulli (1700-1782)
basée sur les expériences de Sauveur et sa mise en doute par Euler

1759 : l'arbitrage de Lagrange
et la confirmation des résultats d'Euler et des solutions de Bernoulli

Joseph Fourier (1768-1830) |

1807

Théorie de la propagation de la chaleur dans les solides

note non publiée

1811

Théorie mathématique de la chaleur et sa vérification expérimentale

Prix de l'Académie

1822

Théorie analytique de la chaleur



« L'étude approfondie de la nature est la source la plus féconde des découvertes mathématiques »

les bases de l'analyse spectrale I

son « pur »

fréquence

hauteur de note

amplitude

intensité, volume

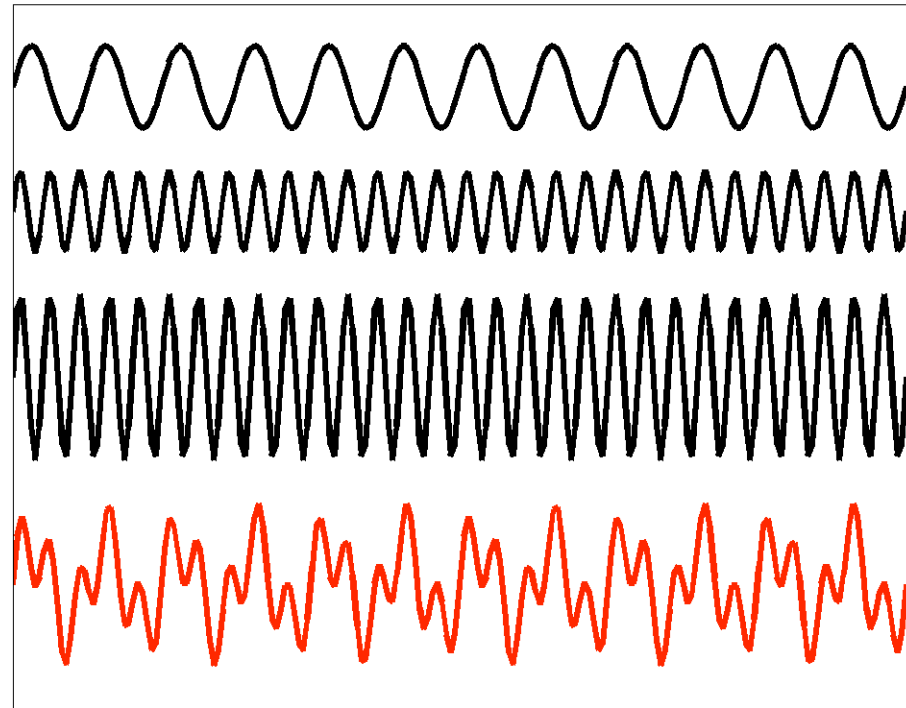
son « réaliste »

timbre

structure harmonique

accord

notes multiples



J. Fourier (1822) :

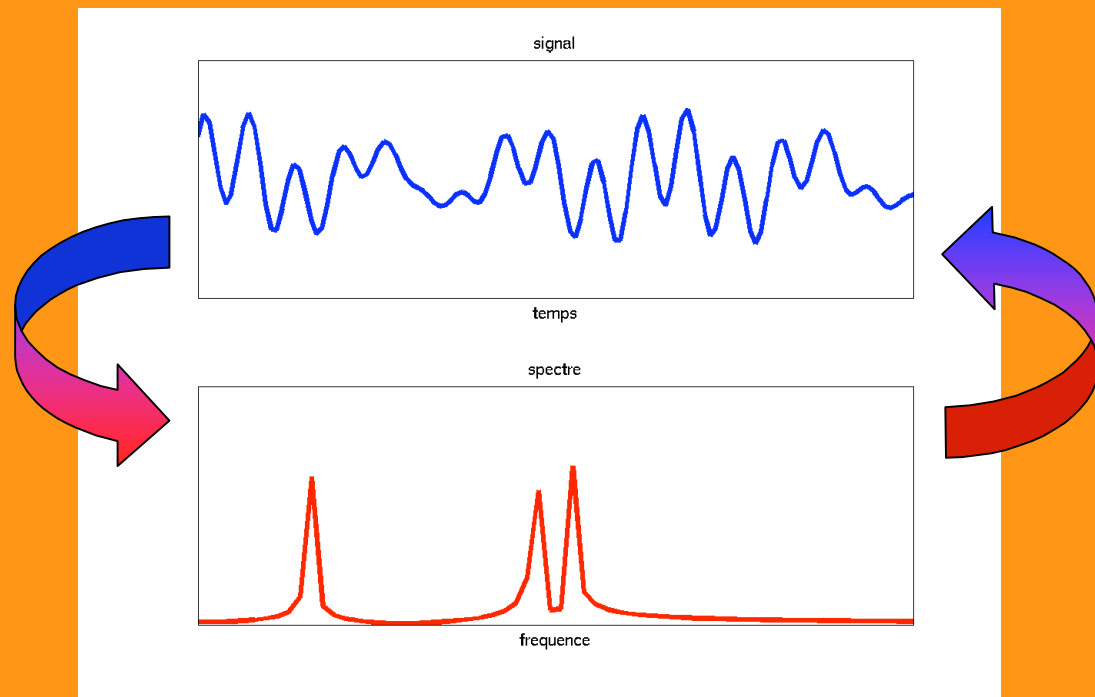
« ***tout*** signal (ou son) réaliste

peut se représenter comme une superposition de sons purs »

analyse de Fourier I

associe à une suite d'événements dans le temps (*signal*) une collection de fréquences (son *spectre*)

... et vice-versa !



Fourier et son héritage I

de l'équation de la chaleur...

...à celle des cordes vibrantes...

...et à l'ensemble des sciences physico-mathématiques

optique, électricité, etc.

Fourier = 22 900 000 citations sur Google
(Einstein = 40 900 000, Newton = 66 700 000,
Madonna = 60 900 000, etc.)

coefficients de Fourier ?

analyse/synthèse

XIX^{ème} siècle

mécanique, optique, acoustique

XX(I)^{ème} siècle

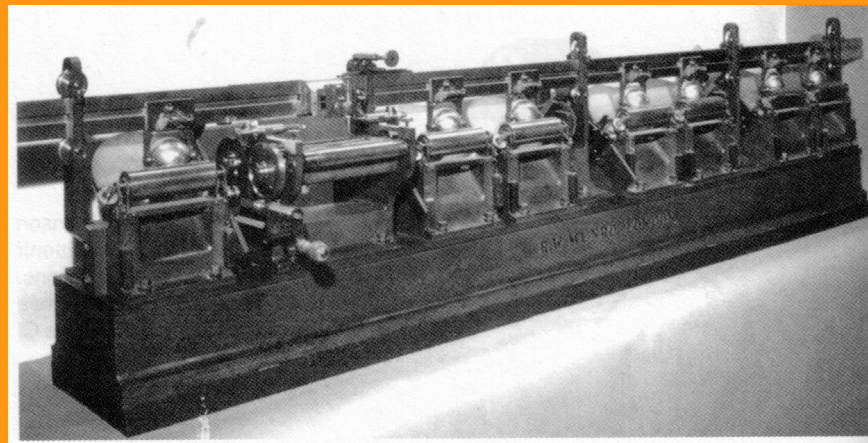
électrotechnique, électronique, informatique

analyseur de Thomson (1878)

calcul des coefficients de marée pour le *Royal Meteorological Office* de Londres

intégration du produit de 2 fonctions par un système « disque - sphère - cylindre »

7 intégrateurs pour
7 coefficients
complété par le
synthétiseur de
Kelvin



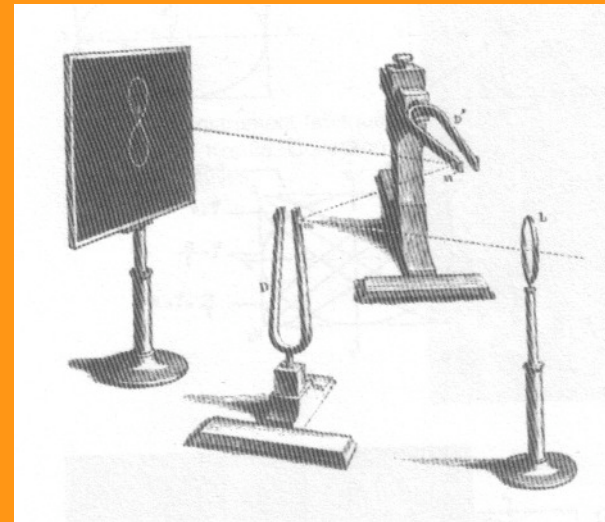
de l'optique à la mécanique I

Lissajous

composition de deux
vibrations
battements

analyseur de Henrici

table oscillante
planimètre



analyser les sons ?

seconde loi d'Ohm (1843)

« direct » vs. « différé »

« direct »

théorie de l'audition de Helmholtz (1862)

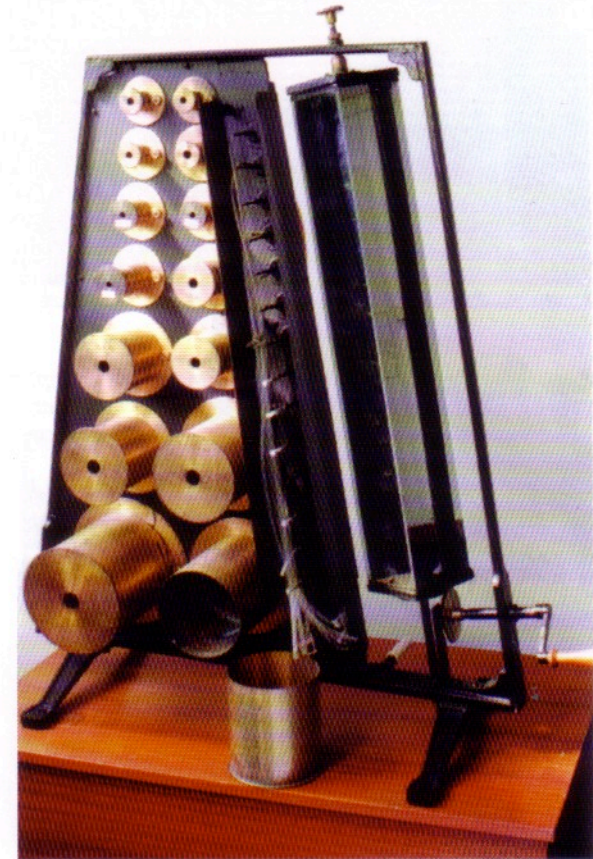
principe de *résonance*

« différé »

paléophone de Cros (1877)

phonographe d'Edison (1878)

analyseur de Koenig (1862) résonateurs d'Helmholtz flammes manométriques

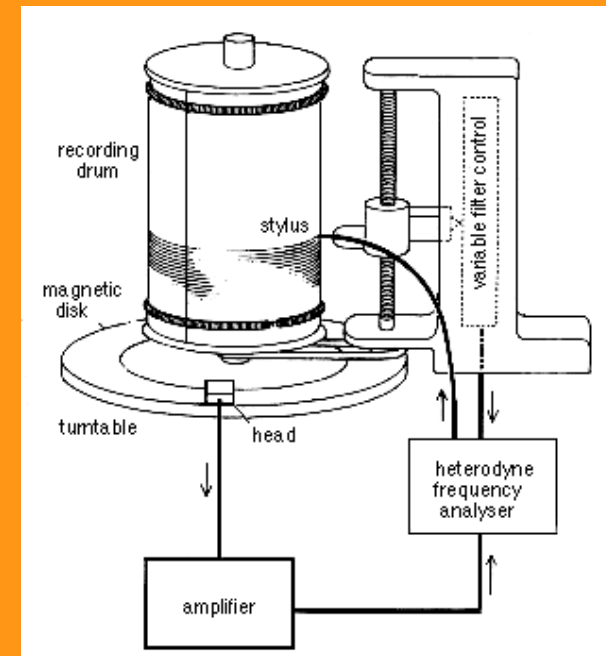


Appareil de Koenig pour l'analyse du timbre des sons. Document
Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, CNRS, Marseille.

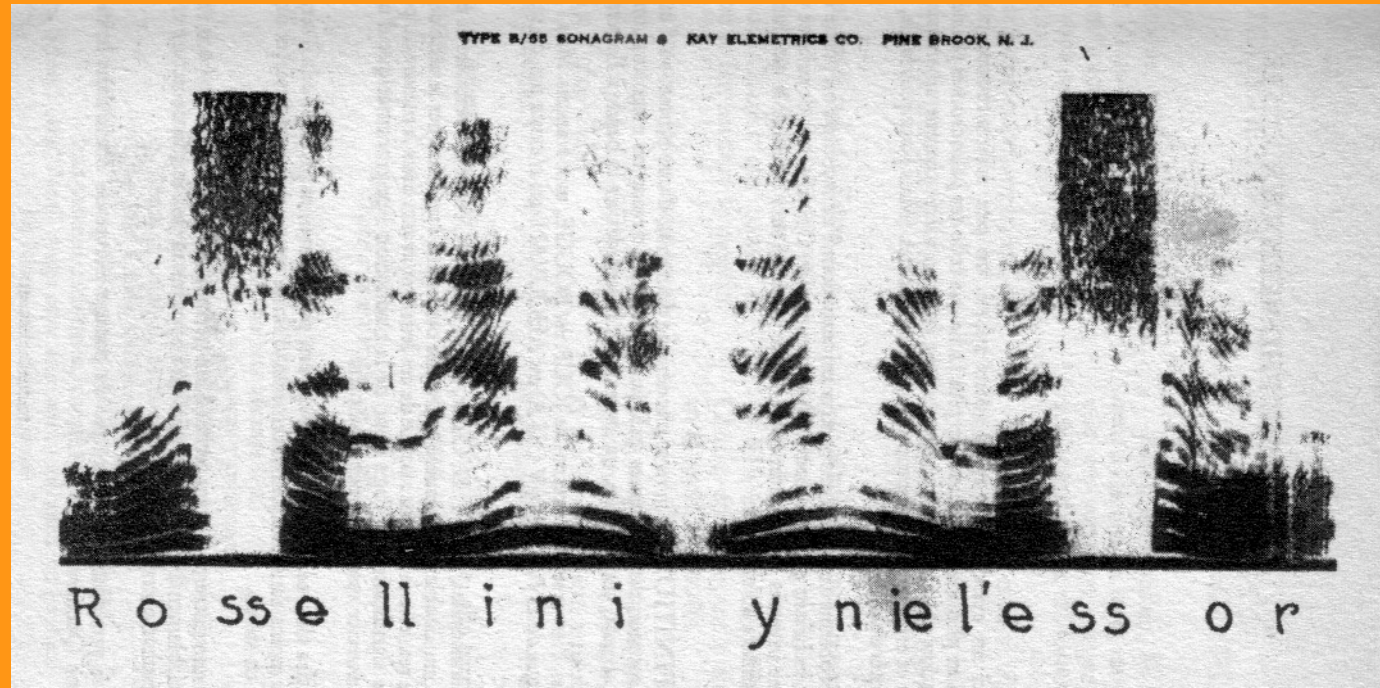
**spectrographe de
Potter (1930), puis de
Koenig, Dunn & Lacy (1946)**

tambour enregistreur
filtrage passe-bande
asservi à la rotation
papier électrosensible

« **visible speech** »



un exemple I



« **palindrome phonétique** »

Luc Etienne, *La Bibliothèque Oulipienne*, No. 27

électronique et informatique I

Bardeen, Schockley & Brattain (1947)

transistor

sonographe électronique de Kay Electric Co.
(1965)

Shannon (1948)

théorie de l'information et de la communication

Cooley & Tukey (1965)

FFT (Fast Fourier Transform)
du matériel au logiciel

des possibilités nouvelles I

représenter

de la physique aux mathématiques
dématérialisation

reproduire

synthèse, perception

transmettre

codage, compression

comprendre

analyse, transcription, ré-éducation

modifier

traitement, débruitage, extraction, artefacts
(Shepard & Risset)



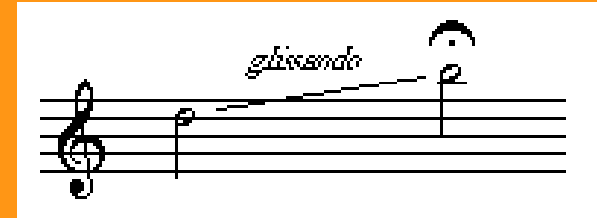
au-delà de Fourier : intuition I

la notation musicale

hauteur des notes (fréquence)

durée (temps)

intensité



une portée mathématique ?

décomposer sur des « grains » localisés en temps
et en fréquence

« déployer » l'intensité spectrale au cours du
temps

temps-fréquence, ondelettes (1980-)

principe

utiliser une transformation inversible
sommer des « grains » temps-fréquence

applications

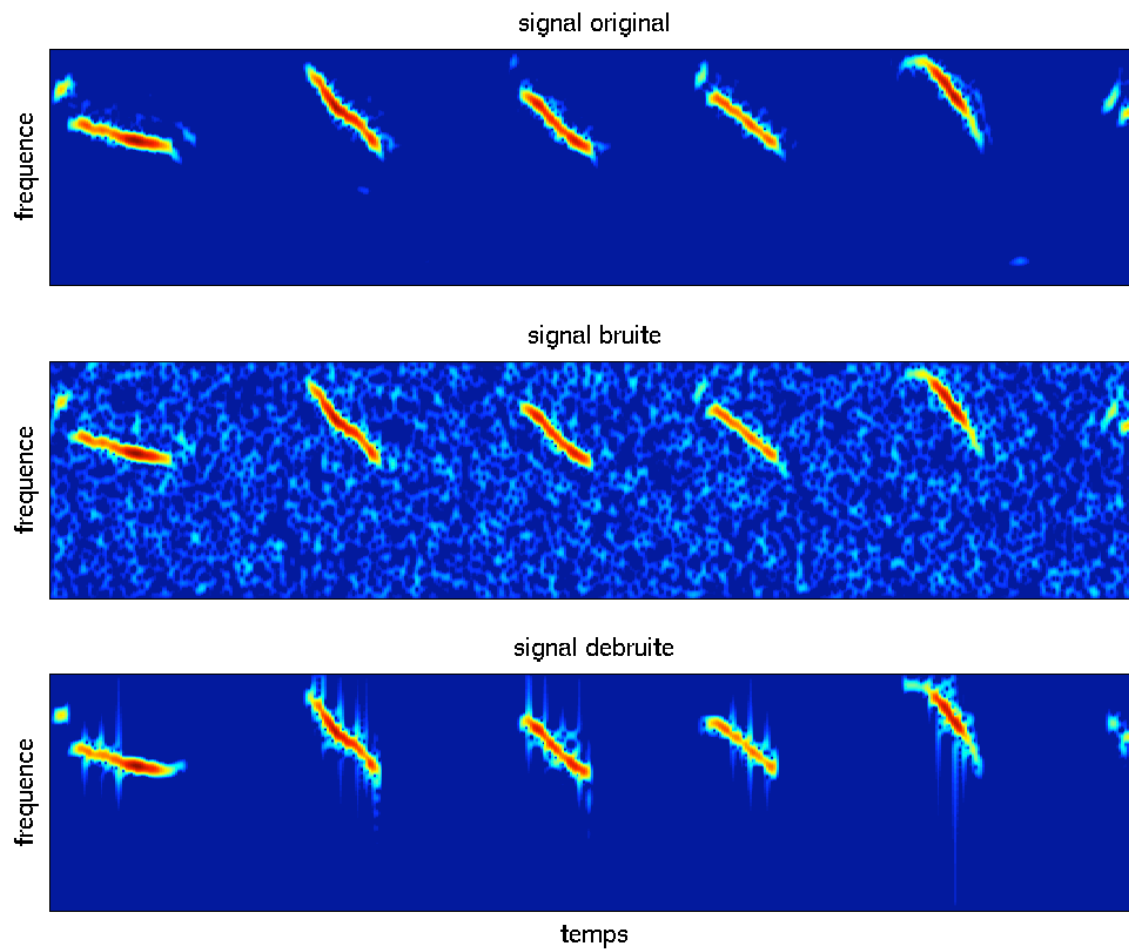
transformations, manipulations (transposition,
débruitage, etc.)

transmission, codage, compression
(paramétrisation, reconstruction partielle)

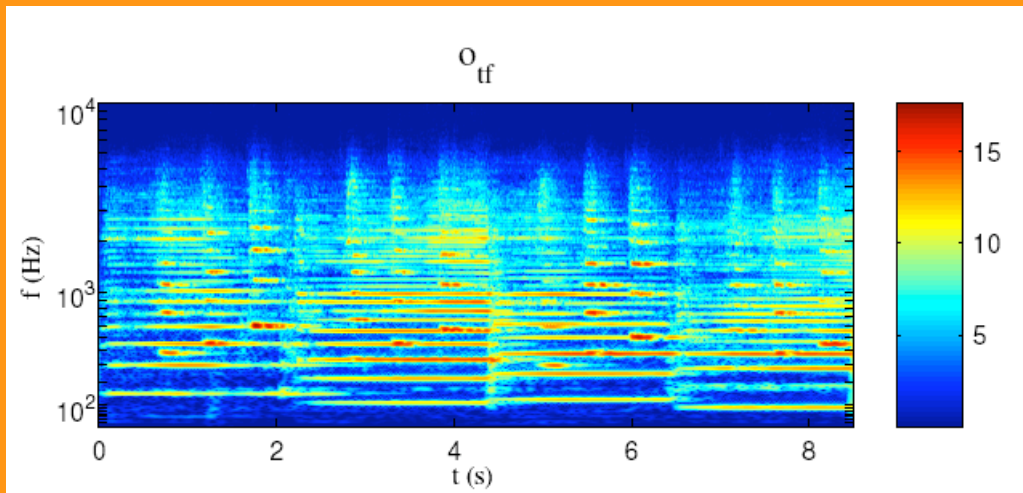
ré-éducation

création d'artefacts

débruitage I

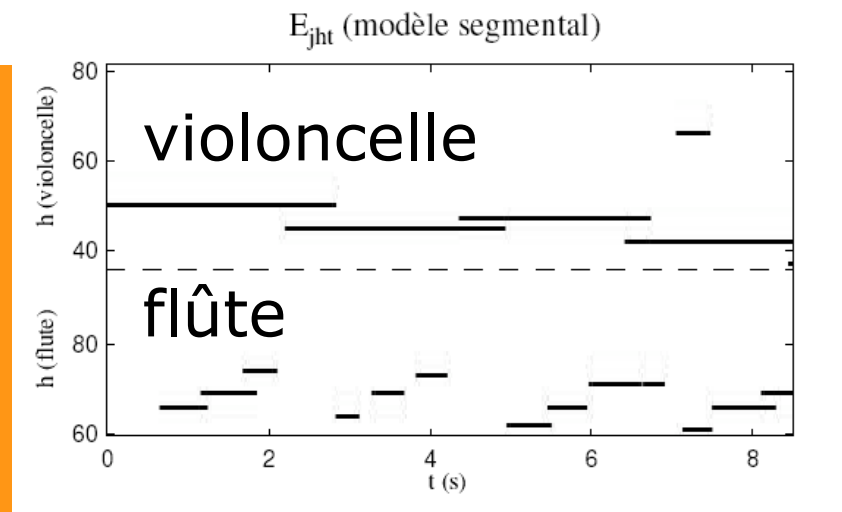
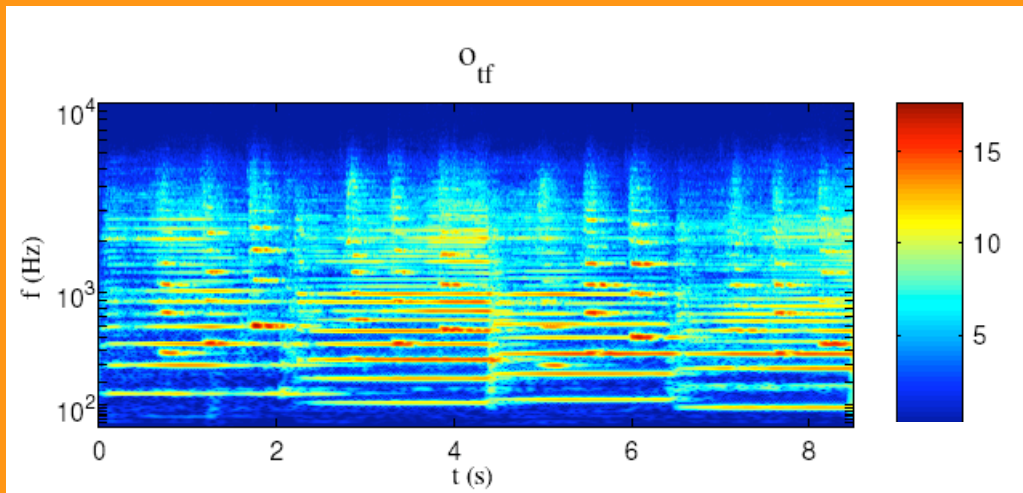


séparation et transcription I



mélange sonore
superposition temporelle et fréquentielle

séparation et transcription I



(Vincent, 2004)

une perspective historique

des théories en devenir

observer et agir

analyser, synthétiser

**les instruments de mesure comme médiateurs
et comme révélateurs**

« Les instruments sont des théories matérialisées »
G. Bachelard (*Le Nouvel Esprit Scientifique*, 1934)