

Histoires d'audition, d'ondelettes

et de chauves-souris

Par B. ESCUDIÉ (*)

Le regard critique que porte l'Histoire des Sciences et des Techniques sur l'évolution des moyens d'analyse des Signaux conduit quelquefois à des confrontations inattendues entre « vieilleries » ⁽¹⁾ et procédés nouveaux. Une fois n'est pas coutume et c'est une telle aventure que nous allons tenter de conter. Le traitement du signal a beaucoup d'interactions avec l'acoustique actuelle dans le domaine aérien et marin; depuis longtemps ces interactions existaient sans que l'on s'en doutât.

Dès le début des études sur l'audition par Helmholtz (1868-1874), cet auteur partant des constatations des musiciens modélisa le récepteur auditif par une batterie de récepteurs accordés : les sphères résonnantes d'Helmholtz ! Dès 1872 König réalise un analyseur visualisant la réponse acoustique de chaque sphère par voie opto-mécanique. C'est le début d'une analyse spectrale ou même harmonique, que l'on a peut-être rapprochée un peu rapidement de celle due à J. Fourier. La représentation obtenue revient à développer l'onde de pression à l'aide des réponses impulsionnelles des sphères. Comme ces sphères résonnantes sont à largeur de bande relative constante (ou surtension constante) et que leurs fréquences d'accord sont déterminées par la gamme musicale, les spécialistes de l'époque utilisaient, sans le noter explicitement, une invariance par changement d'échelle. Guidés par leurs intuitions physiques et les données musicales les acousticiens poursuivirent dans cette voie en instaurant l'analyse par bande d'octave, ou fraction d'octave. Ce point de vue prévalut dans les études acoustiques de signaux notamment dans le cas des analyseurs définis par L. Pimonov entre autres [1, 16].

(*) RHST/LTS/UA346, ICPI, 25, rue du Plat, 69288 Lyon Cedex 02.

(1) C'est souvent le qualificatif employé pour parler de cette démarche par un certain nombre de personnes.

Parallèlement, l'analyse de Fourier faisait des progrès théoriques et pratiques.

L'apparition des calculateurs analogiques mécaniques, électriques et optiques, puis l'emploi des calculateurs numériques, allaient fournir des possibilités étendues à l'analyse harmonique de Fourier [2, 3]. L'analyse conjointe en temps et fréquence apparue en Acoustique et en Radioélectricité devait suivre un développement semblable en utilisant l'invariance spectrale par translation, comme pour l'analyse de Fourier.

Les études menées depuis 30 ans sur les systèmes SONAR des chauves-souris ont confirmé les vues prémonitoires de Spallanzani datant de 1794. Les développements de telles recherches ont amené les traiteurs de signaux à étudier les signaux à large bande et le caractère parallèle des récepteurs neuroacoustiques (cf. *TS*, Éditorial Complexité des Systèmes Sonars biologiques, *TS*, 4, n° 4, p. 277-279, 1987). Très rapidement la structure de ceux-ci révélait des cellules d'analyse à surtension constante et des procédés de traitement faisant appel à des corrélations entre copie codée du signal et écho bruité reçu, codé de manière similaire. Du débat qui s'établit depuis 10 ans sur la validité de cette approche devait sortir l'hypothèse d'un traitement à corrélation dans le plan « temps » et à corrélation dans le plan « temps et fréquence ». Il ne pouvait être envisagé à partir de la batterie de récepteurs à bandes relatives constantes, [4, 4d et 5].

L'innovation théorique, qui conduisit à la représentation en ONDELETTES devait venir d'un autre domaine : la géophysique. Les difficultés de représentation des Signaux issus de la technique « vibrosismique » devait conduire J. Morlet à généraliser le traitement en bande d'octave de l'acoustique [6]. Le traitement par

ondelettes de forme constante, c'est-à-dire invariant en forme par changement d'échelle temporelle était né : il utilisait pour sa définition le mot usuel des géophysiciens, l'ondelette, associé à une impulsion. Ce traitement formait l'intercorrélation du Signal analysé avec la réponse d'un filtre à bande relative constante appelée ondelette. C'était en fait la fonction d'ambiguïté en compression du Signal et du filtre d'analyse qualifié d'ondelette. Appuyé sur une approche théorique, due à l'intérêt manifesté par les physiciens théoriciens et les mathématiciens, ce procédé d'analyse développa rapidement dans l'Acoustique et d'autres domaines de la Physique et notamment en traitement du signal [7, 8, 9]. Ce faisant, la boucle initiée vers 1870 se refermait. Issu, 1 siècle auparavant, d'études sur l'audition, la représentation en bande d'octave limitée d'abord à l'Acoustique allait se transformer en un procédé général mettant en œuvre l'invariance par changement d'échelle. Profitant de ce caractère fondamental manifesté dans bien des phénomènes, les études théoriques suscitaient dès 1987 un nouvel intérêt pour les récepteurs neuroacoustiques à surtension constante. Récemment les points de vue défendus par P. Flandrin *et al.* (*Réunion Ondelettes*, Marseille, mai 1989, *Colloque GRETSI*, juin 1989, . . .) à propos des systèmes SONARS des chauves-souris recevaient l'appui de résultats expérimentaux remarquables dus au spécialiste réputé qu'est J. A. Simmons [10]. La représentation temps échelle, ou scalogramme définie par P. Flandrin, en liaison avec l'analyse temps fréquence, permet d'envisager la modélisation de ces récepteurs à ondelettes. Ce sont les organes de Corti de l'oreille interne qui jouent le rôle d'ondelette analysante du signal reçu [10]. Cette courte histoire suggère une double réflexion. L'intuition du découvreur, si nécessaire qu'elle soit, ne peut s'appuyer que sur une technologie de calcul ou d'expérimentation adaptée. Les délais d'admission des idées de Fourier et d'Helmholtz en sont les manifestations. Le

développement d'une technique nouvelle ne se fait qu'en présence de procédés de mesure convenables, et lorsqu'une claire perception de l'approche théorique existe. L'appareil de mesure est une théorie solidifiée disait éloquemment G. Bachelard. Ce fut le cas pour le procédé d'analyse par bande d'octave devenu représentation en ondelette de portée générale.

Ces péripéties sont la manifestation d'un fait épistémologique plus profond. La spécialisation dans un domaine, si elle est bien comprise, conduit à la prise en compte de problèmes généraux relatifs à d'autres disciplines. Dans ce cas les théories du Traitement du Signal peuvent évoluer et jouer pleinement leur rôle en parlant les langues multiples de l'analyse des signaux. B. Escudié tient à remercier P. Flandrin et A. Grossmann pour leurs avis et opinions au cours de fructueuses discussions.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] (a) L. PIMONOV, *Vibrations en Régime Transitoire*, 1962, Dunod, Paris.
 - (b) B. ESCUDIÉ et A. GROSSMANN, Des sphères d'Helmholtz aux Ondelettes de Morlet, *Congrès Acoustique SFA*, Lyon, 1990.
 - [2] J. B. ROBERT, Les premiers calculs des coefficients des séries de Fourier, *Colloque Histoire de l'Informatique*, Grenoble, 1, mai 1988, p. 429-436.
 - [3] B. ESCUDIÉ, L'informatique et l'évolution de l'analyse spectrale, *cf.* [2], 2, 1988, p. 123.
 - [4] (a) P. FLANDRIN dans *Animal Sonar Systems Helsingor*, 1986, P. NACHTIGAL éd., Plenum Press, 1988.
 - (b) P. FLANDRIN, *Colloque Nat. Traitement Signal GRETSI*, 1987.
 - [5] B. TORRESANI et B. ESCUDIÉ, *Réunion Ondelettes*, Marseille, 1989 (à paraître).
 - [6] J. MORLET, *Geophysics*, 47, 1982, p. 222-236.
 - [7] A. GROSSMANN et J. MORLET, *SIAM Journ. Math. An.*, 1984, p. 723-736.
 - [8] Y. MEYER, *Pour la Science*, octobre 1987.
 - [9] *Wavelets*, J. M. COMBE, A. GROSSMANN et P. TCHAMIJCHAN éd., *Time frequency methods and phase space*, Springer Verlag, 1989.
 - [10] J. A. SIMMONS, *Journ. Acoust. Soc. Am.*, n° 4, p. 1318-1332 et p. 1333-1350.
- Pour une information plus vaste on peut consulter :
- P. LIÉNARD, *Rev. Acoustique SFA*, 2, mars 1989, p. 1-17.
- J. B. ROBERT, *Rev. Palais de la Découverte*, 17, n° 168, mai 1989, p. 23-43.
- R. BRACEWELL, *Pour la Science*, n° 142, août 1989, p. 74-85.
- I. GRATTAN-GUINNESS et J. RAVETZ, *Joseph Fourier 1768-1830*, MIT Press, Londres, 1972.
- J. FOURIER, *Théorie Analytique de la chaleur*, Réédition J. SABAY, 1989.