



*Séance solennelle de l'Académie des sciences / 11 octobre 2011
Discours des nouveaux Membres sous la coupole de l'Institut de France*

Temps, fréquence, échelle

Patrick Flandrin

Monsieur le Président,

Chères consœurs, chers confrères, collègues et amis,

Nous vivons dans un monde de signaux et d'images. Les développements technologiques considérables de ces dernières décennies nous exposent quotidiennement à des quantités d'informations « multimédia » encore inimaginables il y a peu, et nous offrent des possibilités chaque jour plus grandes en matière de communication, de santé, de connaissance. Des sigles comme JPEG, MP3, 3G, GPS ou IRM nous sont devenus familiers, résultats tangibles de l'interaction entre la technologie et une science qui n'existait pas il y a une soixantaine d'années encore, et qui est celle du signal et de l'image.

Historiquement, le « traitement du signal » est né dans l'immédiat après-guerre de problèmes de bruits en acoustique sous-marine. Formalisé avec les travaux pionniers d'André Blanc-Lapierre, qui fut Président de notre Compagnie, puis porté par des personnalités comme Bernard Picinbono et une école française particulièrement active, il a progressivement émergé comme discipline à part entière aux implications extrêmement variées. On pourrait presque dire, dans la mesure où l'une des raisons d'être du traitement du signal est l'extraction d'une information utile à partir de mesures souvent imparfaites, que « tout est signal »... Un peu plus précisément, le traitement du signal est une discipline d'interface, reposant sur trois appuis complémentaires : d'une part la *physique* au sens large pour l'origine de ses objets d'étude, d'autre part les *mathématiques* (l'analyse fonctionnelle, les statistiques, la géométrie) pour la formalisation de ses méthodes et l'évaluation de leurs performances, et enfin l'*informatique* avec le développement d'algorithmes efficaces.

Un des piliers fondamentaux du traitement du signal est la transformation due au mathématicien et physicien français Joseph Fourier, transformation dont on fête cette année précisément le 200^{ème}

anniversaire. Celle-ci, qui permet la décomposition spectrale d'une fonction presque quelconque en fonctions harmoniques (des sinus et des cosinus de toutes fréquences), est un bon exemple des trois appuis dont je viens de parler. Le point de départ de Fourier était l'étude d'un problème tout ce qu'il y a de plus physique, la diffusion de la chaleur, et les méthodes qu'il a mis au point pour l'aborder ont été ensuite la base d'une activité mathématique considérable au XX^{ème} siècle. Enfin, c'est parce que des algorithmes rapides, dits de « Fast Fourier Transform », ont été développés au milieu des années soixante (et surtout popularisés grâce aux possibilités nouvelles offertes par les ordinateurs) que l'analyse de Fourier est devenue incontournable.

L'analyse de Fourier repose sur des fréquences bien définies et supposées « éternelles ». Elle est ainsi bien adaptée aux oscillations en régime permanent et aux situations dites « stationnaires ». Si elle permet ainsi de décrire les signaux en fonction de la fréquence, c'est cependant de manière exclusive par rapport au temps. Pourtant, notre expérience quotidienne ne voit pas d'inconvénient à transcrire de la musique sur une partition où les notes n'occupent que quelques instants, voire à parler de « fréquence instantanée » en écoutant le sifflement d'un oiseau. Ainsi, l'analyse de Fourier creuse un écart d'autant plus grand avec l'interprétation physique que l'on est dans des cas d'évolutions rapides, de transitoires, de tout ce que l'on appelle « non-stationnarités ». C'est à cette question de donner un sens à une description conjointe en temps et fréquence que je me suis intéressé dès le début de mes travaux. Tout comme pour la position et l'impulsion en mécanique quantique, de telles descriptions simultanées sont limitées par des « relations d'incertitude », et le problème de rendre l'analyse spectrale dépendante du temps ne peut recevoir de solution unique. Il est cependant possible d'en construire une théorie cohérente permettant de choisir, par optimalité sous contraintes, les méthodes les plus adaptées pour un problème donné. Et, passant de la théorie à la pratique, il est facile de se convaincre que, dans la Nature, les signaux stationnaires sont bien davantage l'exception que la règle, ce qui offre des champs d'applications particulièrement vastes aux approches temps-fréquence. Ceci m'a permis de côtoyer et de travailler avec des personnes d'horizons très variés. Des biologistes de laboratoire comme de terrain lorsque nous étudions le système d'écholocation sonar des chauve-souris, des mécaniciens et des acousticiens (aussi bien dans le monde académique pour la caractérisation d'ondes de surface dispersives, que dans l'industrie pour le diagnostic de fonctionnement de moteurs thermiques), des médecins pour la quantification de l'activité baroréflexe chez le rat et chez l'homme, ou encore des astrophysiciens pour la détection d'ondes gravitationnelles.

Vers la fin des années 80, les travaux sur l'analyse temps-fréquence se sont doublés de l'émergence d'une approche complémentaire vouée à un grand succès : l'analyse en ondelettes. Je me suis alors intéressé à cette dernière, dans un premier temps par la vision nouvelle qu'elle offrait de l'analyse temps-fréquence, puis rapidement et surtout pour ses propriétés multi-échelles. En effet, qu'est-ce

qu'une analyse en ondelettes ? C'est essentiellement la décomposition d'un signal sur des oscillations qui sont localisées en temps — ce que Fourier ne permet pas —, et qui diffèrent les unes des autres par un changement d'échelle permettant d'explorer différentes bandes de fréquences. Les ondelettes agissent ainsi comme un « microscope mathématique » dont on peut fixer la position et le grandissement, permettant d'effectuer un « zoom local » sur un signal ou une image. Parmi les nombreuses raisons qui ont assuré le succès des ondelettes, je me suis plus particulièrement intéressé à leur adéquation naturelle aux processus dits « invariants d'échelle », ces processus qui se caractérisent par une forme de « fractalité », c'est-à-dire des propriétés du tout qui sont — au moins statistiquement — indiscernables de celles des parties. Faisant suite à des considérations théoriques sur le mouvement brownien fractionnaire, motivées dans un premier temps par l'exemple physique de la turbulence hydrodynamique, j'ai ensuite élargi, en particulier avec Patrice Abry, le champ d'application de ces méthodes à beaucoup d'autres domaines — y compris d'origine technologique comme le trafic internet —, l'ouvrant progressivement à ce que l'on appelle les « systèmes complexes ».

Ces approches mélangeant temps, fréquence et échelle sont aujourd'hui bien balisées et les enjeux se sont déplacés vers des questions nouvelles liées à la quantité toujours plus grande de données disponibles et aux structures qui les portent : données multivariées, multispectrales, graphes topologiques, réseaux d'interaction, etc. Dans ces directions encore, les questions de non-stationnarités, d'évolutions dans le temps (ou dans l'espace) et d'organisation multi-échelles restent centrales.

La vie scientifique, comme la vie tout court, est faite de hasards et de rencontres. Outre bien sûr mes étudiants et collaborateurs, j'ai le plus grand plaisir à remercier aujourd'hui Odile Macchi qui, au fil des ans, m'a toujours apporté un soutien indéfectible. J'ai aussi une pensée particulière pour Bernard Escudié, disparu maintenant depuis un peu plus de quinze ans, qui a éclairé mes années d'élève-ingénieur sous un jour inattendu en me faisant découvrir le traitement du signal et en me confortant dans l'idée de faire de la recherche. J'ai ensuite eu la chance d'être de cette génération qui, encore en début de carrière, a vécu de l'intérieur la révolution des ondelettes. J'y ai fait des rencontres particulièrement marquantes, au premier rang desquelles, s'il faut n'en citer qu'une, celle de Yves Meyer. Sans toutes ces rencontres, ma trajectoire aurait certainement été toute autre. Enfin, je tiens à remercier l'Ecole Normale Supérieure de Lyon qui a accepté il y a maintenant vingt ans le pari de développer une activité « signaux et systèmes » dans son laboratoire de physique et le CNRS qui m'a toujours offert un espace de liberté pour des travaux le plus souvent interdisciplinaires.

J'avais commencé cette intervention en parlant de l'explosion des possibilités offertes dès aujourd'hui par les sciences et technologies de l'information. Au moment de conclure, je voudrais

aussi souligner les responsabilités qui leur sont attachées pour demain. Nous assistons en fait à un curieux paradoxe. D'un côté, la science est omniprésente dans notre vie quotidienne et, d'un autre, elle apparaît étrangement absente de ce que l'on appelle la culture. Il en résulte alors souvent des incompréhensions, parfois des positions irrationnelles, et ceci rend à mon sens d'autant plus indispensable un partage actif avec la société de notre pratique de la science et de l'usage qui en est fait.

Chères consœurs, chers confrères, je mesure l'honneur que vous m'avez fait en m'invitant à faire partie de votre Compagnie. Celle-ci est à mes yeux le lieu par excellence où science rime avec culture, et je me réjouis à l'idée d'y travailler à vos côtés.

Je vous remercie.