

# Traitement du signal et des images

Marine Campedel (ISEP 95)

Enseignant-chercheur au laboratoire de

Traitement du Signal et des Images (TSI) de l'ENST Paris

A travers cet article, nous tentons de définir le domaine d'activité de cette discipline, qui se nourrit de toutes les sciences dont relèvent les signaux qu'elle traite, qu'ils soient naturels ou créés par l'homme. En reliant cette définition à la notion d'information, nous retraçons les étapes de son essor, porté par les avancées technologiques analogiques et numériques. Nous mettons en évidence quelques applications industrielles clés et présentons les axes de recherche les plus en vogue.

## 1. Notion de traitement du signal

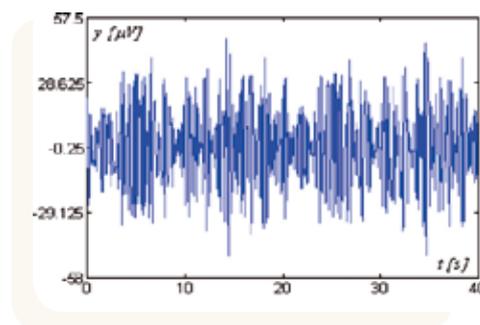
### Qu'est-ce qu'un signal ?

Une définition basique de la notion de traitement du signal peut être, comme l'indique l'encyclopédie du web wikipedia<sup>1</sup>, la discipline qui développe et étudie les techniques d'analyse et de traitement des signaux. De quels signaux s'agit-il ? La plupart du temps, les signaux considérés sont produits par des capteurs ou instruments de mesures divers, voire la télévision, l'ordinateur,... Il existe énormément de signaux différents : les signaux de télécommunications (créés par des ingénieurs pour transporter une information par modulation), les signaux géophysiques (issus de capteurs observant la terre, par exemple des courbes d'évolution de température ou de pression, des signaux d'ondes de vibration, des images aériennes), les signaux cosmiques (captés par les radiotélescopes par exemple), les signaux biologiques (mesurés à différents endroits du corps humain et en particulier, les images IRM, les échographies, les électrocardiogrammes,...), les signaux interpersonnels tels l'écriture ou la parole (signaux complexes car c'est le cerveau humain qui les interprète). Les signaux peuvent être distingués par leurs modes de production mais aussi par leurs natures mathématiques : réels/complexes, déterministes/aléatoires, analogiques/numériques.

En outre, certains présentent un caractère temporel (signal de parole par exemple), d'autres un caractère spatial (l'image 2D, 3D), parfois les deux (vidéo).

### De quand date le traitement du signal ?

Étant donnée la diversité des signaux à traiter, il est difficile de dater la discipline du traitement du signal. Par exemple, l'écriture étant considérée comme un signal, tout ce qui consiste à retranscrire, traduire, interpréter le texte associé peut alors être considéré comme du traitement de ce signal et remonte à des centaines d'années. Plus précisément, la cryptologie a fait son apparition en 480 avant J.C. et l'on date la cryptanalyse (développement de techniques d'encodage et décodage de messages) du 9<sup>ème</sup> siècle !



Électro-encéphalogramme

<sup>1</sup> <http://fr.wikipedia.org>

Afin de préciser cette notion de traitement du signal, nous proposons d'exploiter la définition suivante<sup>2</sup> : « Le traitement du signal consiste en un ensemble de théories et de méthodes, relativement indépendantes du signal traité, permettant de créer, d'analyser, de modifier, de classifier, et finalement de reconnaître les signaux ». Cette définition illustre parfaitement l'ambition de la discipline!

L'indépendance des méthodes de traitement du signal envers les signaux à traiter mérite effectivement une discussion : certains traitements reposent sur des théories mathématiques (statistiques, probabilités, analyse de Fourier...) ou physiques qui existent indépendamment des signaux auxquels ils s'appliquent ; cependant, il existe de nombreux traitements, en particulier tous ceux qui reposent sur la description, la modélisation des signaux, notamment à partir de modèles physiques (les modèles de capteurs optiques en vue d'une déconvolution, le modèle source/filtre de production de la parole exploité

par les codeurs à bas débit, la modélisation du cerveau par segmentation d'images, ...) qui sont intrinsèquement liés à l'origine, à la nature des signaux. Ainsi l'on comprend mieux la difficulté de définir le domaine d'activité du « traitement du signal », puisqu'il se nourrit finalement de toutes les disciplines scientifiques dont sont issus les signaux à traiter. Il s'intéresse à la fois aux mécanismes de production des signaux, à leur manipulation ainsi qu'à leur interprétation. Son essor est relié directement à celui des technologies, qui donnent accès à de nouveaux signaux (le multimédia, les séries financières, les images 3D,...) pour lesquels sont développées de nouvelles applications et donc de nouveaux traitements. L'avènement du numérique a révolutionné l'approche du traitement du signal en rendant plus aisée la manipulation des signaux, en permettant une reproduction transparente, en assurant un contrôle de la précision et de la fiabilité des calculateurs, enfin, en proposant des technologies embarquées (DSP : Digital Signal Processor).



De gauche à droite : Charles Fourier (1768-1830), Harry Nyquist (1889-1976), Norbert Wiener (1894-1964), Richard Hamming (1915-1998), Claude Shannon (1916-2001)

... La Femme du traitement des images : Lenna !

Lenna Soderberg, suédoise et playmate du magazine Playboy, est la femme la plus célèbre du traitement d'image...

Sa photo (ci-contre), parue dans le numéro de novembre 1978, fut utilisée partiellement (très illégalement mais finalement très rentablement pour Playboy qui fit sa meilleure vente avec 7 161 561 exemplaires vendus) afin d'évaluer la qualité d'algorithmes de traitements. Seul son portrait est utilisé bien sur !

Lenna, exploitée par des milliers de traiteurs du signal prétextant tester tel ou tel algorithme de compression ou de segmentation, est devenue rapidement populaire, du fait « d'un bon mélange de régions plates et une texture qui fait du bon travail [...] » (dixit D.C. Munson, éditeur IEEE en 1996)... si bien qu'elle était l'invitée d'honneur de la 50<sup>ème</sup> conférence annuelle de la Society for Imaging Science in Technology (1997).

Femmes lectrices, excusez donc cette provocation...



<sup>2</sup> « Traitement du Signal » Notes de cours - Henri Leich et Thierry Dutoit- Faculté polytechnique de Mons- TCTS Lab – 2001

# Traitement du signal et des images

Quelques repères historiques...

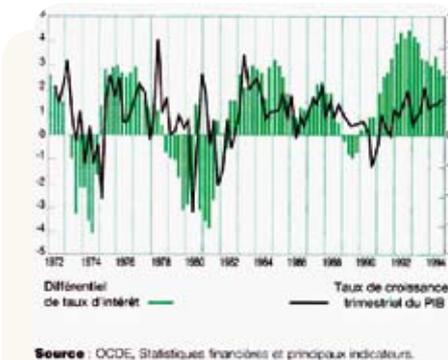
Années	Mathématiques et Physique	Applications
1440		Gutenberg invente l'imprimerie
1792		Invention du télégraphe.
1804 -1807	Analyse de Fourier	
1816 - 1838		Invention de la photographie.
1835		Code Morse.
1854	Georges Boole présente les principes de l'algèbre booléenne.	
1872		Traitement d'images : Charles Gillot introduit des effets de trame sur les images photographiques.
1876		Invention du téléphone par Graham Bell.
1888	Découverte des ondes radio par H. Hertz.	
1890-1896		Invention de la TSF par Édouard Branly et développement par Marconi. Herman Hollerith fonde une compagnie qui prendra le nom d'IBM.
1904		Hülsmeier a l'idée d'utiliser des ondes radio pour un système de navigation anti-collision.
1910	Ondelettes de Alfred Haar.	
1920	Fisher présente la sélection de données et sa définition de la pertinence d'une information.	
1928	Principe de l'échantillonnage formulé par Nyquist (sera prouvé successivement par Kotelnikov en 1933, Whittaker en 1935, Gabor en 1946 et Shannon en 1949).	
1935	Nyquist et Hartley s'intéressent à la quantification de la quantité d'information dans une image.	Apparition du radar à impulsion.
1936	Notion de calculabilité Turing introduit sa machine virtuelle.	
1943		Modélisation du cerveau par Mc Culloch et Pitts, à l'aide de psychon.
1945	Théorie de l'amplification de Bode (et 1 <sup>ers</sup> brevets dès 1940).	
1947		John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley inventent le transistor
1948	Wiener publie « Cybernetics » Shannon publie « A mathematical theory of Communication »	
1956		Apparition de l'expression « intelligence artificielle » 1 <sup>er</sup> oscilloscope produit par Hewlett Packard
1960		1 <sup>er</sup> ordinateur commercial avec écran et clavier (PDP1 de DEC)
1962		Apparition du mot « informatique »
1965	FFT : méthode rapide de calcul de la Transformée de Fourier discrète	
1967		Apparition de CMOS
1970	CCD (Coupled Charge Device) de Boyle et Smith	
1981		1 <sup>er</sup> IBM PC (DOS) 8088
1982		Annnonce de l'Internet 1 <sup>ère</sup> norme vidéo numérique 4:2:2 (CCIR 601)
1984		1 <sup>ère</sup> caméra professionnelle couleur équipée d'un CCD
1988	Ondelettes de Daubechies	Naissance de MPEG (Motion Picture Expert Group)
1990	Développement de SVM et des méthodes dites à noyau	

## Pluridisciplinarité et notion d'information

Le traitement du signal est une science de l'ingénieur, qui se nourrit de différentes disciplines scientifiques théoriques et appliquées. Il semble que jusqu'au début du 20<sup>ème</sup> siècle, il n'existe pas vraiment de collaboration productive entre les savants et les techniciens ou les ingénieurs. Celle-ci prend forme autour de la notion d'« information » qui tend à rassembler les physiciens, les mathématiciens, les biologistes et les ingénieurs, ces derniers s'intéressant plutôt à une formalisation quantifiable de cette notion. Cette collaboration se concrétise, après la deuxième guerre mondiale, en 1948, avec la publication de l'ouvrage de Claude Shannon (1916-2001) intitulé « A Mathematical Theory of Communication » qui devient rapidement une théorie de référence. La notion d'information y est directement reliée à une grandeur mesurable, l'entropie ; cette dernière permet, selon le deuxième principe de la thermodynamique, de mesurer le niveau de dégénérescence d'un système physique. En effet ce principe dit que l'énergie tend à se dégrader et à rendre tout homogène, entraînant la mort du système. L'information, quant à elle, lutte contre l'entropie en tentant d'imposer un ordre à un message, à l'aide de règles syntaxiques et lexicales ; elle se fait redondante pour résister aux bruits de transmission produits par les machines<sup>3</sup>. Cette théorie de l'information est l'aboutissement de divers travaux de Shannon<sup>4</sup> : ceux sur la modélisation d'un mode général de communication faisant intervenir la notion d'intelligence à transmettre, ainsi que ceux sur la cryptographie (1941) et la quantification du message à transmettre, problème sur lequel ont travaillé également deux ingénieurs connus : Ralph Hartley (1888-1970) et Harry Nyquist (1889-1976).

Parallèlement, parmi les statisticiens, dès 1922, Ronald Aylmer Fisher (1890-1962) s'intéresse à la définition de la « pertinence de l'information » contenue dans des données, à travers des méthodes de « réduction de données ». En biologie, autour de 1943, Walter Pitts (1923-1969), jeune mathématicien, associé à Warren McCulloch (1898-1969), psychiatre, s'intéressent à la gestion de l'information par l'être humain et présentent une modélisation du cerveau exploitant des psychons, unités psychiques élémentaires (boîtes noires au fonctionnement binaire) permettant « un calcul logique des idées immanentes dans l'activité nerveuse »<sup>5</sup>. Les recherches menées sur cette notion d'information prennent ainsi des formes différentes, s'appliquant, d'une part dans le cadre des télécommunications, au codage, au stockage et à la transmission des signaux, et d'autre part dans le cadre de la modélisation de l'esprit

humain et plus particulièrement du processus d'acquisition des connaissances. À cheval sur ces deux domaines d'application, le mathématicien Norbert Wiener (1894-1964), désigné par certains comme le père du traitement du signal, présente dans les années 30, différents travaux sur l'analyse harmonique et les transformées de Fourier dans le domaine complexe. Pendant la deuxième guerre mondiale, il travaille (pour l'armée américaine), à la conception d'un calculateur capable de contrôler un canon antiaérien. Ce calculateur exploite des fonctions du domaine temporel correspondant à différentes mesures ; ces signaux sont filtrés pour faciliter leur modélisation et leur extrapolation, ce qui définit la base de la théorie de la prédiction. En outre, Wiener s'intéresse alors à la modélisation du comportement des hommes pouvant intervenir dans le système (pilote de l'avion visé) et pose ainsi, dans ses publications de 1948, les bases de l'interaction homme/machine et de la cybernétique.



Source : OCDE, Statistiques françaises et principaux indicateurs.

à la conception d'un calculateur capable de contrôler un canon antiaérien. Ce calculateur exploite des fonctions du domaine temporel correspondant à différentes mesures ; ces signaux sont filtrés pour faciliter leur modélisation et leur extrapolation, ce qui définit la base de la théorie de la prédiction. En outre, Wiener s'intéresse alors à la modélisation du comportement des hommes pouvant intervenir dans le système (pilote de l'avion visé) et pose ainsi, dans ses publications de 1948, les bases de l'interaction homme/machine et de la cybernétique.

En pratique,...

## En pratique,...

Parallèlement aux travaux des scientifiques tels que Shannon, Wiener et les autres, des ingénieurs mettent au point des calculateurs toujours plus puissants. Elle est bien loin la Pascaline, machine capable d'effectuer des additions et des soustractions, qu'avait mise au point Blaise Pascal en 1646 pour aider son père collecteur d'impôts !

Dans les années 20, les seuls biens de consommation à base d'électronique sont les radios et les phonographes. Les transistors n'apparaissent qu'au début des années 50 et les circuits intégrés au début des années 60. Le premier microprocesseur n'est disponible qu'en 1971 ! Les puces de traitement du signal, appelées couramment DSPs, ne sont vraiment utilisées qu'à partir du début des années 80. L'exemple historique le plus marquant est celui de la puce de reconnaissance vocale introduite dans la poupée Julie en 1987 : cette dernière tournait la tête lorsqu'elle entendait son nom. Actuellement, il y a environ 100 millions de puces de reconnaissance vocale en usage, 85 millions pour les téléphones à commande vocale et 15 millions

<sup>3</sup> En gardant toutefois un équilibre car trop de redondance ennuie et il faut alors réintroduire du désordre, i.e. de l'entropie, pour attirer l'attention !

<sup>4</sup> Sans omettre le fait qu'à 16 ans, il avait déjà construit un système télégraphique pour communiquer avec un ami habitant à un kilomètre, en utilisant les fils barbelés mitoyens...

<sup>5</sup> « Du comportement des avions ennemis aux modélisations de la connaissance : la notion scientifique et technique d'information. » Jérôme Segal, *Intellectica*, 2004/2, 39, pp 54-77.

pour d'autres applications. Le prix de la technologie est pour beaucoup dans ce développement : en quelques années, ce type de puce est passé de 20\$ à 1\$ l'unité. Les DSPs sont désormais présents dans tous les produits de consommation électronique, qu'il s'agisse de poupées parlantes ou de voitures luxueusement équipées.

Outre aux DSPs, permettant un traitement embarqué des signaux, le 20<sup>ème</sup> siècle a donné naissance à des calculateurs toujours plus performants, exploitant les principes de l'algèbre booléenne exposés dès 1854. Le développement d'ordinateurs toujours plus rapides et précis a permis un essor considérable des algorithmes et applications de traitement du signal. L'association de l'information et de l'automatique donne naissance à une nouvelle discipline, désignée par le terme d'« informatique », inventé par Philippe Dreyfus en 1962.

### Enfinement,...

Cette notion technique et scientifique d'information va permettre l'élaboration d'un cadre de recherche général, exploitant les sciences dures (mathématiques, physique) et les innovations technologiques, conduisant ainsi à la conception de nouvelles applications. Le signal peut se définir désormais comme le support de la variation d'une grandeur physique qui porte de l'information<sup>6</sup>. Le traitement automatique du signal est né ; il a pour ambition de créer, d'analyser, de modifier, de classer, et finalement de reconnaître les signaux, en tant que véhicules d'information.

## 2. Les applications clés du traitement du signal

### Le rôle de l'armée

Qu'il s'agisse de celle des États-Unis ou de la France, l'armée a joué un rôle essentiel dans le développement du traitement du signal. En particulier la deuxième guerre mondiale, a permis de faire se rencontrer, autour d'objectifs militaires, des ingénieurs (qui découvraient la logique booléenne et commençaient à développer des calculateurs plus puissants) et des savants (mathématiciens ou physiciens) réfléchissant à la notion d'information, à la façon de la transmettre et de l'interpréter.

L'un des exemples les plus impressionnants de l'influence de l'armée sur le « traitement du signal » est le développement de la technologie radar<sup>7</sup>. En 1864, James Clerk Maxwell s'intéresse aux ondes électromagnétiques et

propose ses « équations », vérifiées en 1886 par Heinrich Hertz. Ce dernier, dès 1888, met en évidence l'existence des ondes hertziennes, ce qui date le démarrage des technologies radio. Christian Hülsmeyer, ingénieur, suggère, en 1904, d'exploiter les échos radio afin de détecter des obstacles et éviter des collisions en navigation<sup>8</sup>. En 1922, Guglielmo Marconi propose, avec plus de succès, une approche similaire. À la même époque, apparaît le sonar, qui détecte la présence d'obstacles à l'aide de la réflexion d'ondes acoustiques. Les premières expérimentations radar ont lieu dès les années 20 (dont certaines en France !) et au début des années 30, des radars à ondes continues, d'une portée d'une dizaine de kilomètres, sont installés sur la ligne Maginot. Le paquebot Normandie est également équipé d'un système radar (à ondes centimétriques) afin de détecter les icebergs en présence de brouillard. En 1935, Ponte et Guitton mettent au point le tube à faisceau électronique qui émet des impulsions hautes fréquences, ce qui conduit à la réalisation du radar à impulsions. Cette technologie, exploitée pendant la deuxième guerre mondiale, a, dit-on, joué un rôle essentiel dans la bataille d'Angleterre (août-octobre 1940). Où est le traitement du signal dans tout ça ? Partout... Le signal d'écho est capté, amplifié et transformé en signal visuel sur un moniteur. Le succès de la technologie radar et du traitement du signal associé, a permis par la suite le développement des techniques micro-ondes, de l'exploitation des faisceaux hertziens (téléphone, TV, ...), des transmissions satellitaires (imagerie, ...) et portables (GSM). Les ramifications de cette technologie ne se retrouvent pas uniquement dans les télécommunications mais également dans les technologies du biomédical (accélérateurs à particules, générateurs à rayonnement,...). La technologie radar, développée essentiellement à des fins militaires, est donc l'un des moteurs les plus puissants de l'évolution de notre technologie et de notre industrie.

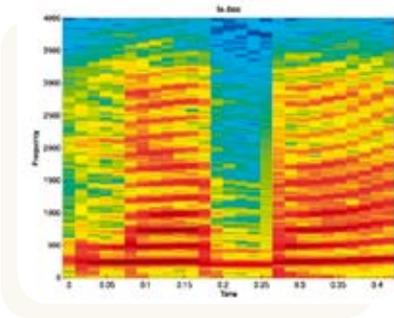
Bien évidemment l'armée ne s'est pas contentée de cette invention. L'effort de guerre déployé au cours de la deuxième guerre mondiale fut colossal, en particulier pour tout ce qui concerne la mise au point de systèmes de communication fiables entre les états-majors alliés. Notamment, en octobre 1940, un projet américain voit le jour pour « rendre le son visible », c'est la naissance de la spectrographie acoustique (cf l'illustration présentant le spectrogramme des mots « là-bas ») et du Vocoder (Voice Coder), ancêtre des codeurs à bas débit de la parole.

<sup>6</sup> « Traitement du Signal » Notes de cours - Henri Leich et Thierry Dutoit- Faculté polytechnique de Mons- TCTS Lab - 2001

<sup>7</sup> « Le Radar 1904-2004, histoire d'un siècle d'innovations techniques et opérationnelles » Yves Blanchard, Thales, Ellipses, 2004.

<sup>8</sup> Ainsi apparaît la technologie radar (Radio Detection And Ranging), système de détection et télémétrie par ondes radio. Cette dénomination est un nom de code employé, par l'US Navy, lors de la deuxième guerre mondiale.

Les efforts scientifiques effectués dans le cadre de l'armée ne se sont pas arrêtés avec la guerre mondiale. Cependant, à moins de collaborer, sous le secret, avec les équipes de recherche militaires, il est difficile de savoir ce que sont les domaines d'activité actuels. La guerre prend des formes nouvelles, notamment médiatiques, technologiques.



Ainsi que nous le verrons dans la suite de cet article, le grand public a accès à une gigantesque source d'informations, plus ou moins contrôlée, par l'intermédiaire de la télévision, de la radio ou de l'Internet mais il manque cruellement d'outils pour qualifier cette information. L'une des armes d'aujourd'hui est indéniablement la manipulation de l'opinion publique à travers les media !

### Le traitement du signal au service du grand public

Le grand public ne connaît généralement pas le terme de « traitement du signal » et pourtant tout le monde peut maintenant le pratiquer. En effet, l'explosion du numérique ne profite pas qu'aux spécialistes scientifiques ; toute personne munie d'un ordinateur et d'un appareil photo (voire une caméra) numérique peut, par exemple, retoucher, modifier facilement ses images. Les musiciens amateurs peuvent aisément composer, s'enregistrer, mixer et finalement éditer et diffuser leur propre CD. Certains diront qu'ils font de l'informatique, d'autres des mathématiques appliquées : ils pratiquent en réalité les deux à la fois, et cela s'appelle du traitement du signal.

L'informatique met à disposition du traitement du signal une gestion physique des données, pour répondre d'une part à des problèmes de mémoire, de rapidité d'accès, de partage des signaux et d'autre part de mise en œuvre des traitements à travers l'élaboration et la programmation d'algorithmes. Les mathématiques, quant à elles, fournissent les outils théoriques nécessaires à l'élaboration de modèles de signaux (modélisation statistique, analyse harmonique, décomposition en ondelettes,...), comme à leur traitement. Ces outils ne sont généralement pas connus des néophytes et pourtant ils sont, au même titre que l'informatique, source de grandes innovations.

Le principal frein à la diffusion des données numériques fut l'absence, dans les années 70, d'une norme numérique. Les technologies se développant très rapidement, chaque constructeur produisait son propre format numérique.

La connexion de différents appareils nécessitait alors de convertir des signaux numériques en analogique : quel gâchis !

En 1982, le CCIR (Comité International de Radiodiffusion) normalise un format vidéo numérique, compatible à l'échelle mondiale (norme 4:2:2 ou CCIR 601) ; les constructeurs s'efforcent désormais de produire des technologies compatibles en respectant les dernières normes en vigueur. Des régies de radiodiffusion entièrement numériques apparaissent dès les années 1980, sans toutefois remplacer les technologies en place (pour des problèmes de formation des techniciens notamment). Les régies des chaînes de télévision profitent elles aussi de l'essor du numérique : la télévision couleur, électronique, des années 50 devient de nos jours entièrement numérique, à l'aide de programmes numériques et d'écrans digitaux. Ceci a été rendu possible grâce à l'apparition de nouvelles technologies mais également aux outils de traitement du signal qui permettent leur exploitation !

Les nouveaux besoins des utilisateurs encouragent également la progression des technologies. En effet, les DSP 32 bits ont été créés pour pouvoir gérer des normes de codage du son toujours plus exigeantes en qualité, en transparence. Que de progrès, parallèlement, dans le domaine des jeux vidéo entre 1980 et 2005 ! La collaboration étroite des technologies et du traitement des signaux audiovisuels permettent actuellement de produire des jeux, en ligne, avec des qualités de création d'images de plus en plus réalistes, des ambiances sonores élaborées, des comportements de personnages de plus en plus *intelligents*.

### Les applications à la mode

Loin d'être exhaustifs, nous pouvons porter notre attention sur trois autres applications majeures, commercialement parlant, du traitement du signal. La première concerne la modélisation des séries financières.

L'objectif premier est généralement de prédire les cours d'actions ou de monnaies, à l'aide de modélisation des signaux. On y traite de séries temporelles, qui peuvent s'observer avec des granularités différentes (1 journée, 1 an) et dont on extrait des comportements (modèles, patterns) permettant d'élaborer des hypothèses sur leur comportement futur à plus ou moins long terme.



Cours du pétrole

Ces modélisations, plus ou moins automatiques, sont tenues secrètes : si tout le monde y avait accès, les cours en seraient influencés et le modèle serait faussé ! Nous observons dans ce domaine la nécessité de maintenir une certaine entropie pour éviter la banqueroute généralisée. La réussite de cette application dépend directement de l'imagination renouvelée des acteurs du traitement du signal...

La seconde application concerne l'imagerie satellitaire. En effet, d'énormes quantités d'images, optiques ou radar, sont transmises chaque jour de tous les endroits du monde. Des centaines de satellites sillonnent notre espace en quête d'information ! Ces images permettent une observation aérienne de notre planète, leur analyse

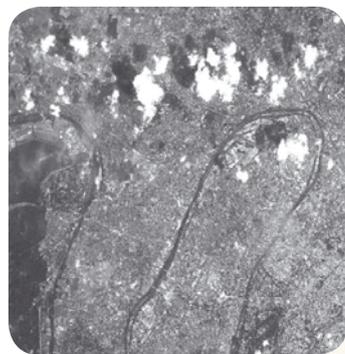
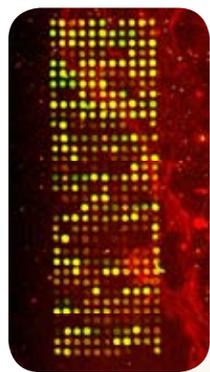


Image SPOT5 @CNES

fournit actuellement des informations météorologiques, géologiques, climatiques, cartographiques... Pour être exploitables elles subissent de nombreux traitements : filtrage du bruit, des nuages pour certains, segmentation, reconstruction 3D,... la puissance des calculateurs à disposition (simples PC ou stations de travail) permet d'envisager des traitements complexes inenvisageables quelques années auparavant ; en outre ces traitements peuvent être maintenant programmés sur DSP et embarqués.

La troisième application, en plein essor, concerne le domaine biomédical et en particulier l'exploitation des puces ADN. En 1905, Wilhem Johannsen dénomme « gènes » les particules de l'hérédité, dont les lois ont été établies depuis 1866 par Gregor Mendel. En 1944, l'ADN est identifié comme porteur de l'information génétique et la notion de code génétique est introduite par Erwin Schrödinger. Dès lors les biologistes n'auront de cesse



de décoder le génome humain (chromosome par chromosome) ou celui d'animaux tels que la souris (décryptée totalement en 2001). En 1987 la technologie des puces ADN fait son apparition : d'un point de vue « signal », cette technologie produit des images d'expression de gènes (cf. image illustrative), localisés dans un espace à deux dimensions. Le traitement automatique de ces images tend à identifier des gènes

(ou groupes de gènes) actifs dans le cadre d'une maladie et de son traitement ; les données sont en général peu nombreuses car la technique est coûteuse et les gènes sont, au contraire, très nombreux (de l'ordre de 20000). Cette application nécessite le développement de technologies nouvelles dont la validité est contrôlée par des experts biologistes. La collaboration des différents domaines scientifiques permet une nouvelle fois l'enrichissement de chacun.

### 3. Enjeux et mutations du traitement du signal

Pendant longtemps l'objectif majeur fut de transmettre les signaux, de donner accès à l'information au plus grand nombre. Avec les progrès des télécommunications, l'avènement du numérique et des ordinateurs personnels connectés à l'Internet, c'est chose faite ! Le problème désormais n'est donc plus d'accéder à l'information mais de récupérer une information pertinente dans l'ensemble de la masse à disposition. La nécessité de s'intéresser au contenu informationnel des signaux nous ramène à la définition que nous avons énoncée au début de cet article, qui relie par essence les notions de signaux et d'information. La discipline du traitement du signal est actuellement en pleine mutation : elle ne se contente plus de gérer les signaux mais intègre désormais ce qui concerne le traitement de l'information.

Cette mutation ne remet pas en cause les problèmes fondamentaux de la discipline, elle leur donne un nouvel aspect. Par exemple, le problème du bruit dans le traitement du signal n'est pas considéré comme résolu, quels qu'aient été les progrès réalisés grâce à la révolution numérique, il a simplement pris une autre forme. Il est maintenant directement relié à la notion de pertinence de l'information, qui reste un des champs majeurs de la recherche en traitement du signal.

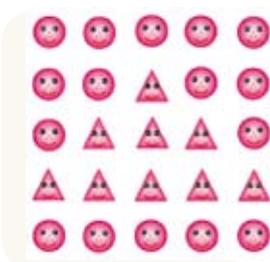
#### Traitement du signal et gestion de bases de données

Une donnée n'est finalement qu'un échantillon de signal, une valeur numérique. L'informatique met au service du traitement du signal des outils de gestion de bases de données (SGBD) afin de mieux gérer les aspects matériels liés au stockage et à la récupération de ces données. Seulement, face à la quantité des signaux à traiter (de l'ordre du téra octets dans le cadre des images satellitaires), de nouvelles stratégies d'organisation sont nécessaires : les catalogues (ils exploitent des métadonnées associées aux données, telles que la date de création, un auteur éventuel,...), les classifications (elles permettent d'associer à des données une description

globale de leur contenu) et les indexations (qui extraient des données une représentation synthétique de leur contenu informationnel) sont de plus en plus exploités, par des procédures automatiques.

Informatique et traitement du signal s'associent dans la tâche de produire des algorithmes rapides permettant de regrouper des données similaires. Les représentations synthétiques ainsi que les groupes produits (clusters) ne sont généralement pas interprétables directement par les êtres humains, ce qui engendre un « fossé sémantique ».

Enfin la notion elle-même de similarité nécessite certaines hypothèses sur la nature de l'information recherchée (cf. illustration : ces données sont-elles similaires ? selon quel critère ?).



### Fossé sémantique

Afin de gérer ce décalage entre les représentations des signaux et leur contenu informationnel, on observe l'émergence des méthodes d'apprentissage. L'objectif est, à l'aide de données étiquetées manuellement, d'apprendre la relation qui relie, dans le cerveau humain, les étiquettes sémantiques utilisées et les représentations des données. Ces méthodes exploitent des modèles tels que les classificateurs de Bayes, les réseaux de neurones ou les Séparateurs à Vaste Marge (SVM). Cependant cette opération d'étiquetage est loin d'être anodine et pose des problèmes liés à la subjectivité et à la limitation intrinsèque des mots employés : décrire une image entière à l'aide de quelques mots clés relève de l'utopie et ne fait que transposer maladroitement un problème d'interprétation visuelle en un problème textuel. En outre, la validité des modèles appris dépend énormément de la qualité et de la quantité des données exploitées ; nous retrouvons ainsi les problématiques posées par Fisher au début du 20<sup>ème</sup> siècle.

Une deuxième approche exploitée pour combler le fossé sémantique consiste à analyser, comprendre et imiter les facultés de l'être humain. Les signaux les plus nombreux, à disposition du grand public, concernent le multimédia. Derrière ce terme se retrouvent généralement les textes, les images et les sons. Ce sont des signaux pour lesquels l'information n'est pas facilement identifiable : c'est notre cerveau qui est capable, par l'intermédiaire de nos sens (la vue et l'ouïe essentiellement) et de nos acquis culturels, d'extraire une information. En essayant de comprendre les mécanismes de la perception humaine, les sons et les images ont pu être compressés efficacement : en effet,

tout ce qui finalement n'est pas capté par l'œil ou l'oreille humaine n'a pas d'intérêt à être codé, de même les signaux qui sont masqués les uns par les autres. Ces propriétés de la perception humaine, et notamment de masquage d'un signal par un autre sont également utilisées pour cacher une signature (visuelle ou acoustique, technique appelée le « watermarking », ou tatouage en français, apparue dans les années 90 à des fins de protection contre les contrefaçons ou les reproductions abusives) ou un bruit de quantification (codage MPEG audio).

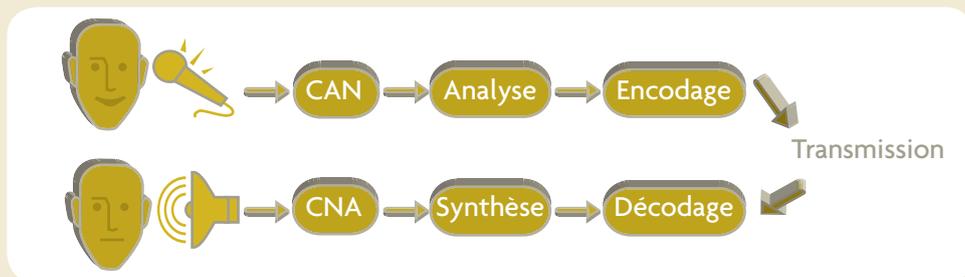
Les progrès des spécialistes en psycho-vision et psycho-acoustique ont favorisé la mise au point de techniques de compression, qui conjointement aux techniques de stockages de données, notamment avec l'introduction du CD (Compact Disk, ou cédérom) autour de 1980, ont occasionné une large diffusion des images et des sons. Ces études ont permis de produire des signaux différents des signaux originaux mais perçus et donc interprétés identiquement. Elles ont également identifié des mécanismes naturels de regroupement des signaux expliquant notamment comment l'oreille humaine peut séparer différentes sources sonores dans un environnement complexe. Cependant elles ne sont pas capables de modéliser les fonctionnalités complètes d'un cerveau humain. Le traitement du signal s'intéresse également aux sciences du langage, non seulement pour améliorer le traitement du signal de parole (codage, reconnaissance ou synthèse de la voix), mais également pour mieux comprendre l'organisation de son contenu sémantique.

### Fusion d'information

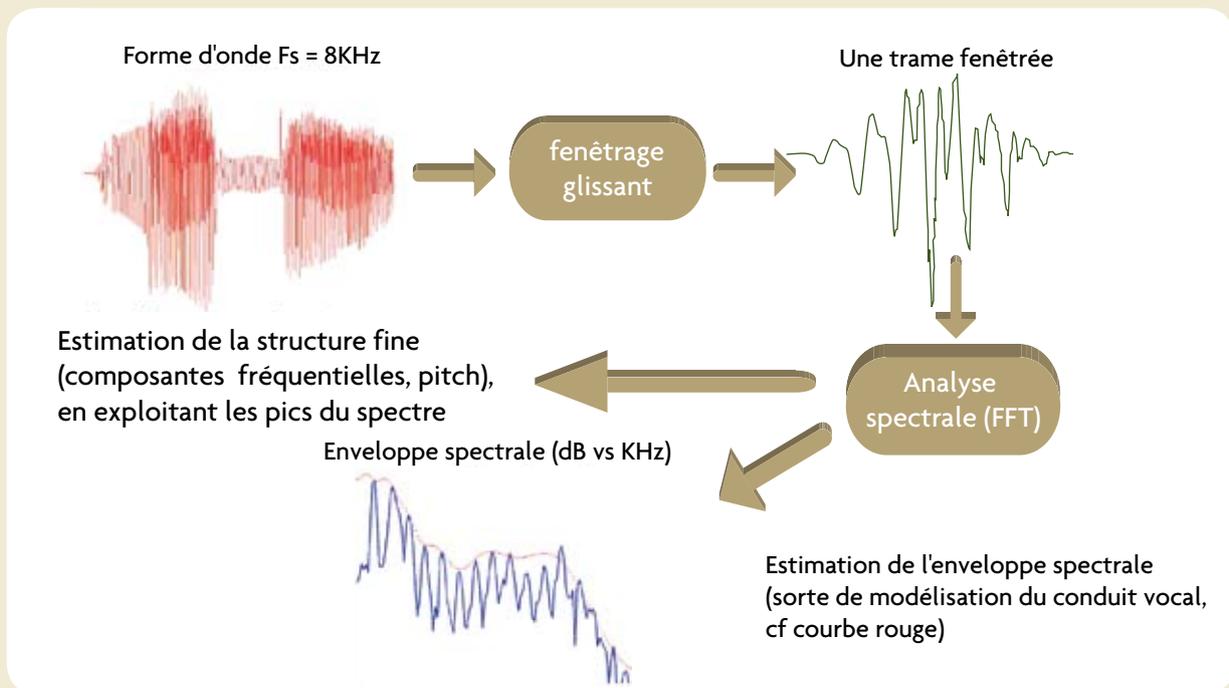
Le troisième axe de recherche que nous souhaitons souligner concerne l'exploitation de ces quantités de signaux à notre disposition. Prenons l'exemple d'une région de la planète présentant un fort risque de catastrophe naturelle : nous pouvons y disposer des capteurs divers et récupérer périodiquement des mesures de température, pression, activité sismique ; nous pouvons également exploiter des vues aériennes prises à diverses époques, diverses résolutions, ou lire les rapports produits par différents observateurs humains... Les sources de renseignement sont diverses, nombreuses, parfois bruitées, complémentaires, souvent redondantes. Un être humain chargé de la surveillance de cette région aurait besoin de plusieurs années d'apprentissage pour interpréter correctement cet ensemble hétérogène de signaux et pouvoir prédire une situation anormale. Bien entendu, des experts humains sont capables après une catastrophe d'en analyser les causes mais cela ne se fait jamais en amont du fait de la quantité des sources d'informations à traiter. Il existe d'ores et déjà des outils capables, pour un signal donné de détecter automatiquement des données

## Exemple plus détaillé d'application : le codage de la parole

Depuis le Vocoder des années 1930-1940, que de chemin parcouru en terme de débit et de qualité de la voix produite par les codeurs ! Le schéma ci-dessous présente les étapes essentielles au traitement de la parole. Quelques codeurs exploitant ce schéma : le Vocoder, le LPC-10, le IMBE (norme INMARSAT) et les codeurs sinusoïdaux en général.



**Analyse de la parole :** ces traitements (fenêtrage et analyse spectrale à court terme) sont très couramment utilisés en traitement de la parole, et pas uniquement à des fins de codage mais également en débruitage, synthèse et reconnaissance de la voix. Ils permettent d'identifier, d'estimer les paramètres essentiels à l'identification du locuteur ainsi qu'au contenu de son discours. Des progrès considérables, d'un point de vue calculatoire, ont été faits lors de l'apparition en 1969 de la Fast Fourier Transform (1965, Tukey et Cooley, IBM) ou FFT. Joseph Fourier (1768-1830), plus connu à son époque pour ses rapports politiques avec Napoléon (il fut nommé préfet de l'Isère à son retour de la campagne d'Egypte), que pour ses travaux scientifiques (controversés : Lagrange et Laplace lui reprochaient, dit-on, dans ses travaux de 1807 sur « la propagation de la chaleur dans les corps solides », de décomposer les fonctions sous forme de séries trigonométriques !), serait surpris de sa postérité !



**Synthèse de la parole :** l'objectif est, à partir des paramètres estimés sur de courtes trames de signal, de générer une voix (la plus proche de la voix originale dans le cadre du codage) la plus naturelle possible. Cette notion de « naturelle » n'est pas anodine et fait appel à des connaissances psychoacoustiques. Il est très important de tenir compte des propriétés de l'oreille et du cerveau humain pour : 1) masquer des imperfections dues au codage ou 2) appliquer un post-traitement rendant plus intelligible le son produit (filtrage perceptif).

aberrantes et, si besoin est, de les corriger. Par contre il n'existe pas encore d'outil capable de gérer des signaux de natures diverses, non synchronisés dans le temps (ni tout à fait dans l'espace), prenant en compte diverses théories sur la formation de tsunamis ou la fonte des glaciers afin de prédire et analyser automatiquement une situation anormale. L'ingénierie des connaissances, discipline à cheval entre l'informatique et le traitement du signal, propose cependant quelques outils de modélisation des connaissances : un long chemin reste à parcourir avant de savoir générer facilement, voire automatiquement, ces modèles (ontologies) !

#### 4. Conclusion

Nous avons montré, à travers cet article, que le traitement du signal a pour ambition de créer, d'analyser, de modifier, de classer, et finalement de reconnaître les signaux, en tant que véhicules d'information. Cette notion, à la fois subjective et objective, est au cœur des problématiques de recherche et développement de la discipline. Elle a permis, dès les années 1930, la rencontre des savants mathématiciens, physiciens, biologistes et des ingénieurs afin de produire des technologies nouvelles générant de nouveaux signaux (tels que le radar) et de

concevoir de puissants calculateurs pour les traiter. La révolution numérique a facilité la transmission de ces signaux, rendant ainsi disponible au plus grand nombre une quantité phénoménale d'informations. Les nouveaux enjeux du traitement du signal concernent l'organisation et la validation de l'information contenue dans les signaux afin de faciliter son exploitation. Cette dernière ne peut efficacement se faire sans intervention humaine et la tendance actuelle tend, à l'instar de Wiener dans les années 30, à intégrer l'homme dans la boucle de traitement.

Le traitement du signal est un domaine vaste qui s'enrichit au contact de l'informatique comme des mathématiques ou de la physique. Il permet de faire collaborer les théoriciens et les techniciens en vue de progrès technologiques à la portée de tous.

Mes remerciements à tous mes collègues de TSI pour leurs références anecdotiques, ainsi qu'à Khalil Mouzawak pour ses conseils de rédaction.



**ASYMPTOTES**  
*Conseil*

**Pour motiver talents et compétences  
à rejoindre votre entreprise dans les secteurs  
des Sciences et Technologies de l'Industrie :**

*Electronique, Microélectronique, Optique,  
Photonique, Nanotechnologies, Mécatronique,  
Automatismes et Systèmes Industriels,  
Energie, Techniques Aéronautiques et Spatiales,  
Télécoms et Technologies de l'Information...*



**Colette LUCAS**  
*Fondatrice d'ASYMPTOTES Conseil en 1991,  
Ingénieur en Electronique, 10 ans d'expérience  
dans la Microélectronique et 17 ans de métier  
comme consultant du secteur High Tech.*

**5, rue Guy Moquet - 91400 ORSAY**  
Tél : 01 69 86 98 98 - Fax : 01 69 86 10 45  
[www.asymptotesconseil.fr](http://www.asymptotesconseil.fr)

#### Marine Campedel

Ancienne élève de l'ISEP (promotion 1995) (née OUDOT), elle a poursuivi ses études et obtenu le titre de docteur de Telecom Paris en Traitement du Signal et des Images en 1998. Après avoir travaillé cinq ans dans l'industrie comme ingénieur de recherche, elle occupe actuellement un poste d'Enseignant-Chercheur à Telecom Paris. Ses domaines de recherche privilégiés concernent l'indexation de grosses bases de données d'images (satellitaires) et de son ; elle s'intéresse à toute la chaîne de traitement qu'il s'agisse de l'extraction de signature ou de la récupération d'information, en s'appuyant sur des techniques d'apprentissage.