

## Avant-propos

Le *Traitement du Signal* est devenu une discipline à part entière, à l'interface entre les outils mathématiques, informatiques et électroniques, et leur application à des domaines variés, concernant par exemple des signaux électromagnétiques (en particulier télécommunications), acoustiques, biomédicaux, astrophysiques... L'utilisation du terme « Signal » au singulier dans la dénomination de ce domaine pourrait laisser croire que, dans un contexte donné, le « traiteur de signal » a pour objectif d'analyser un unique signal à la fois. De nombreuses méthodes de traitement développées dans le passé s'appliquent effectivement à *un* signal, ou prennent en compte les « liens » entre *deux* signaux (en utilisant en particulier la notion de corrélation). Mais, au-delà de ces approches, ces dernières décennies ont vu le développement d'un nouveau pan de cette discipline, concernant le traitement conjoint d'un ensemble de signaux de même nature, qui forment donc un *vecteur de signaux*. Ces signaux proviennent souvent d'un ensemble de capteurs du même type (antennes électromagnétiques, microphones...) placés en différents points de l'espace. En plus de l'information traditionnellement fournie par les variations temporelles d'un signal, on dispose ainsi de la richesse apportée par la diversité spatiale des signaux prélevés. Les méthodes de traitement tirant parti de ces deux aspects constituent donc le domaine souvent appelé *Traitement Spatiotemporel du Signal*, ou encore *Traitement Multi-voie* (ou *Multi-canal*) *du Signal*, par référence aux différents flux de données respectivement associés aux divers capteurs qui fournissent les signaux à traiter. L'émergence du domaine du Traitement Spatiotemporel du Signal a résulté de la conjonction entre le développement d'approches mathématiques plus avancées, l'apparition de systèmes physiques plus complexes (moyens de calcul et systèmes multi-capteurs) et le besoin d'analyser des signaux de manière toujours plus fine dans des domaines d'application variés.

Deux types d'exemples nous permettront ici de définir des fonctionnalités classiques qui peuvent être obtenues à l'aide de ces méthodes de Traitement Spatiotemporel du Signal :

1. diverses applications reposent sur la mesure d'un champ électromagnétique ou acoustique. Dans les configurations les plus simples, ce champ correspond à la propagation d'une onde plane. L'enregistrement simultané de ce champ à l'aide d'un ensemble de capteurs alignés dans l'espace fournit alors des signaux qui sont tous des versions temporellement décalées d'un même signal. Les valeurs de ces décalages temporels dépendent de la direction de propagation de l'onde. La détermination de ces décalages permet donc de savoir dans quelle direction, par rapport au réseau de capteurs considéré, se situe la source ayant émis l'onde reçue. La fonctionnalité de *localisation de sources* ainsi obtenue peut donner lieu à des applications très variées, en particulier dans les domaines du radar et du sonar, dans des contextes civils autant que militaires : pensons par exemple au contrôle de trafic aérien, à partir des signaux émis par des avions et reçus par le réseau de capteurs d'un système de suivi de trafic. Ce réseau de capteurs est qualifié *d'antenne réseau* et les méthodes de traitement des signaux qu'il fournit sont dites *méthodes de traitement d'antenne*.
2. De même, divers systèmes contiennent un ensemble de capteurs qui conduisent à des signaux égaux, à tout instant, à des combinaisons linéaires des valeurs à cet instant d'un autre ensemble de signaux, dits *signaux sources*. Les coefficients intervenant dans ces combinaisons correspondent souvent aux atténuations subies par les signaux sources, depuis leur émission jusqu'à leur réception par les capteurs. Ils dépendent des positions relatives des sources et des capteurs et sont donc inconnus dans bon nombre de situations pratiques. De même, les signaux sources sont généralement inconnus. Brièvement, les méthodes de Traitement Spatiotemporel du Signal développées depuis quelques années permettent alors d'estimer ces coefficients et de restaurer ces signaux sources à partir seulement de leurs « *mélanges* » fournis par les capteurs. La fonctionnalité de *séparation aveugle de sources* ainsi obtenue trouve son application dans des situations très variées. Par exemple, elle concerne l'extraction de chacun des signaux formant un vecteur de signaux sources de télécommunications transmis simultanément, cette extraction étant réalisée à partir des combinaisons de ces signaux mesurées par des antennes radio-fréquences (et transposées en fréquence).

Des extensions de ces méthodes permettent de traiter des formes plus complexes de mélanges. Elles ouvrent de nouveaux champs d'application, en particulier en Acoustique : elles peuvent par exemple séparer des signaux sources de parole simultanément actifs, à partir de leurs

mélanges fournis par un ensemble de microphones.

Même si les idées de base introduites dans les deux types d'exemples présentés ci-dessus semblent simples à énoncer, les méthodes de traitement correspondantes donnent lieu à des développements théoriques conséquents. Ces deux exemples correspondent ainsi à deux domaines à part entière, à l'intérieur du secteur général du Traitement Spatiotemporel du Signal. Ces domaines sont respectivement appelés *Traitement d'Antenne* et *Séparation Aveugle de Sources*, comme suggéré ci-dessus.

Par rapport aux différents aspects du Traitement des Signaux définis ci-dessus, cet ouvrage a le double objectif d'amener au final le lecteur jusqu'au Traitement Spatiotemporel du Signal, après lui avoir présenté en détail les concepts et outils de traitement classiques mono-signal et bi-signal, qui constituent les fondements sur lesquels s'appuient les extensions multi-signal utilisées en Traitement Spatiotemporel du Signal. Ainsi, cet ouvrage demande au lecteur très peu de connaissances préalables en Traitement du Signal : il ne fait appel qu'à quelques notions relatives à la transformation de Fourier et au filtrage, qui sont de toute façon rappelées en début de Partie I. Le reste de cette Partie I est consacré à la construction explicite des outils classiques de représentation et caractérisation d'un ou de deux signaux, qui sont initialement définis dans le domaine temporel mais aussi étudiés via leur représentation fréquentielle. On considère dans un premier temps les signaux déterministes, puis les signaux aléatoires, qui demandent d'abord d'introduire diverses notions relatives aux probabilités et variables aléatoires. Muni de ces fondements, le lecteur pourra aborder sereinement les parties suivantes de l'ouvrage, qui définissent les principaux concepts et méthodes de traitement relatifs aux deux aspects du Traitement Spatiotemporel du Signal introduits ci-dessus : le Traitement d'Antenne (Partie II de l'ouvrage) et la Séparation Aveugle de Sources (Partie III). Notons que certaines notions utiles en Traitement du Signal sont présentées en Partie III, non pas en Partie I bien qu'elles soient générales, car elles concernent des outils plus avancés que ceux considérés en Partie I et qui ne sont chacun employés que dans un chapitre de Partie III. Ces notions sont donc directement introduites au début de ces chapitres. Elles portent sur les cumulants et la Théorie de l'Information.

Au total, cet ouvrage couvre principalement les niveaux Licence 3 à Master 2 d'un cursus universitaire ou, de manière équivalente, les trois années d'une filière de type Ecole d'Ingénieurs. En effet, la Partie I correspond grossièrement aux niveaux Licence 3 et Master 1, tandis que les Parties II et III concernent l'extension de ces notions à deux domaines avancés du Traitement du Signal et correspondent donc à un niveau Master 2. Outre les différentes catégories d'étudiants mentionnées ci-dessus, cet ouvrage peut intéresser des chercheurs et ingénieurs en activité, aussi bien dans le monde universitaire qu'industriel. En effet, il concerne notamment le domaine du Traitement Spatiotemporel du Signal, qui connaît actuellement un développement majeur, dû en particulier à la diversité des retombées applicatives de ces méthodes.

Certaines portions des chapitres qui suivent ont été rédigées spécifiquement pour cet ouvrage, tandis que d'autres sont issues des supports des cours que je donne à l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Diverses parties de ces supports de cours ont elles-mêmes été initialement bâties à l'aide d'ouvrages de la littérature, qui sont cités en fin de ce livre. C'est donc pour moi l'occasion de remercier collectivement les auteurs de ces ouvrages, par rapport auxquels ce livre-ci pourra conserver une certaine filiation par endroits. Par ailleurs, je voudrais ici surtout remercier les personnes qui m'ont fait la gentillesse de relire avec grand soin tout ou partie de mon ouvrage : P. Danès, A. Deville, D. Deville, S. Hosseini. Merci aussi aux collègues avec qui j'ai eu d'utiles discussions sur certains aspects spécifiques de ce livre : S. Argentieri, H. Carfantan, V. Gibiat, A. Legrand. Enfin, je tiens à adresser mes remerciements aux Editions Ellipses, en particulier à C. Chêze, qui ont accepté d'inclure cet ouvrage dans la collection TECHNOSUP.

#### ■ ——— Deux niveaux de lecture de l'ouvrage

Ce livre comporte deux niveaux de lecture. Le lecteur trouvera tout d'abord, dans le texte standard, les notions principales du domaine étudié. De plus, cet ouvrage contient des « encadrés » tels que celui-ci, délimités par les repères « ■ ——— » et « ■ ». Ces encadrés sont consacrés à des approfondissements de diverses natures : démonstration des résultats fournis, explications complémentaires, exercices... ■