

Analyse et estimation adaptative de signaux non stationnaires

Par Odile MACCHI (*)

Les 14 et 15 janvier 1988 ont eu lieu deux journées de bilan scientifique marquant l'achèvement des 4 années de travail d'un Groupe de Recherches Coordonnées (GRECO) créée en 1984 par le CNRS à l'initiative de I. Landau et intitulé « Systèmes Adaptatifs en Robotique, Traitement du Signal et Automatique » (SARTA).

Le présent numéro de la Revue *Traitement du Signal* est le reflet de la majeure partie des Conférences de ces deux journées dans le domaine du Traitement du Signal. Plusieurs autres communications en Signal de ces journées ne sont pas incluses ici car elles ont déjà été publiées ailleurs, en particulier dans les *Actes du 11^e Colloque GRETSI* de 1987 auxquels je me réfère plus loin. L'aspect Automatique de ces deux journées paraîtra dans un prochain numéro de la revue *RAIRO* dont M. Najim est l'éditeur invité.

Les articles du présent numéro sont pour la plupart des articles de synthèse qui cherchent à comparer et intégrer plusieurs visions, au besoin sur des exemples. Le sujet général est l'analyse des signaux non stationnaires ou l'étude des algorithmes adaptatifs dont le but est précisément l'estimation et le suivi des paramètres de processus non stationnaires. Le dialogue au fil des mois au sein du GRECO nous a collectivement amenés à la classification suivante des approches sur le non stationnaire.

Une première façon de procéder est de partir du cas stationnaire, avec l'analyse spectrale et les algorithmes d'estimation qui y sont associés, et de considérer qu'une situation non stationnaire correspond à la concaténation de situations quasi stationnaires. Nous avons qualifiée une telle approche d'*adaptative*, l'idée de base étant de suivre les évolutions par une *réursion temporelle*, en ne modifiant que très peu les outils conçus pour des situations stabilisées. Ainsi le champ d'application de l'adaptatif correspond aux évolutions lentes, pour garder un sens à l'interprétation quasi stationnaire et à la possibilité d'estimation locale. Ceci est traduit dans les trois articles de G. Demoment, de O. Macchi, M. Jaïdane, et de C. Uhl, O. Macchi, N. M'Sirdi.

Lorsque les hypothèses de quasi stationnarité ne sont pas justifiées, on doit accepter que le signal non stationnaire ait une évolution quelconque. C'est ce que nous avons appelé l'*approche évolutive*, qui accepte les évolutions rapides, spécialement décrite dans l'article de P. Flandrin.

Finalement, certaines non stationnarités sont trop particulières pour être traitées par l'une ou l'autre des approches précédentes. Ce sont les changements brusques ou *ruptures* décrits par l'article de M. Basseville.

(*) École Supérieure d'Électricité, plateau du Moulon, 91192 Gif-sur-Yvette, France

Ces trois approches sont évidemment complémentaires et un même signal non stationnaire peut nécessiter les trois à la fois. C'est le cas avec le très bel exemple que constitue le signal de parole, à qui plusieurs auteurs se réfèrent.

Le signal contient des plages quasi stationnaires, ce sont les voyelles; des plages à évolution rapide, ce sont les transitoires brefs associés à une plosive; et des ruptures, ce sont les successions de phonèmes. La frontière entre les deux dernières catégories n'est évidemment pas nette.

Le premier article de ce numéro est aussi le seul qui offre une vision strictement traitement du Signal. Les quatre autres ont emprunté à l'automatique une part plus ou moins grande de leur inspiration.

Ce premier article, de P. Flandrin, intitulé « Représentations temps-fréquence des signaux non stationnaires », est un panorama sur l'analyse spectrale des signaux non stationnaires. L'auteur se place d'emblée dans l'optique évolutive adaptée aux non stationnarités rapides. Son approche dite « non paramétrique » ne nécessite aucun modèle spécifique pour le signal si ce n'est qu'il est probabiliste, le cas déterministe n'étant pas particularisé. Le but est d'aboutir à une généralisation de la notion de densité spectrale de puissance définie en stationnaire. Dans ce cadre général le lecteur est d'abord averti qu'il lui faudra, selon la bienséance, demeurer sur un léger appétit à l'issue de sa lecture. En effet il n'existe pas de représentation idéale en temps et en fréquence qui satisfasse à tous ses souhaits : positivité et répartition de la puissance instantanée sur l'axe des fréquences, compatibilité avec le filtrage linéaire ou le décalage en fréquence, etc. Cela dit, P. Flandrin développe deux perspectives, le spectre de Priestley utilisant une base de fonctions orthogonales au niveau temporelles mais sans être des exponentielles complexes, et le spectre de Wigner-Ville basé sur les exponentielles mais avec des poids variables dans le temps. Finalement la complémentarité de plusieurs outils d'analyse tous imparfaits et illustrée sur le signal de parole.

Tout d'abord le spectre de Priestley, qui assure une double orthogonalité. Pour cela le signal non stationnaire est développé sur une base de « fréquences », fonctions temporellement orthogonales. C'est leur seul point commun avec la base usuelle des exponentielles complexes. La seconde orthogonalité est la non-corrélation statistique des composantes « fréquentielles » du signal. La deuxième perspective, que préfère l'auteur, est le spectre de Wigner-Ville où le signal non stationnaire est représenté avec les fonctions « fréquences » usuelles, mais avec des poids variables dans le temps. Finalement l'exemple d'un signal de parole illustre « l'intérêt qu'il peut y avoir pour l'interprétation de disposer de plusieurs outils chacun imparfait, mais tous complémentaires ».

Viennent ensuite deux articles de synthèse (G. Demoment, puis O. Macchi, M. Jaïdane) que l'on peut classer dans l'approche adaptative car ils développent des méthodes d'estimation récursives dans le temps, s'appliquant préférentiellement à des non stationnarités lentes.

L'article de G. Demoment intitulé « Équations de Chandrasekhar et algorithmes rapides pour le traitement du signal et des images » présente l'algorithme rapide de Chandrasekhar dont l'objet est d'estimer avec moins de calculs qu'un filtre de Kalman, l'évolution temporelle de l'état interne d'un système dynamique. Il nous montre que cet algorithme, conçu dans un contexte d'Automatique, et aussi utilisable mais trop peu souvent utilisé, dans une approche Traitement du Signal, sans variable d'état. En fait, cet algorithme ne diffère que peu des algorithmes adaptatifs connus sous le nom de « rapides », eux aussi destinés à réduire la complexité calculatoire des équations du filtrage. Les algorithmes de Chandrasekhar constituent donc une alternative intéressante, dont l'idée de base est d'exploiter les propriétés d'invariance (décalage) des signaux traités, mais sans nécessiter qu'ils soient stationnaires. Leur application à l'estimation

des coefficients d'une régression est aussi présentée dans l'article, ainsi qu'à la déconvolution d'un signal ou d'une image (problème d'inversion).

Puis, dans l'article « Similarités entre les aspects non-linéaires du filtrage adaptatif en Traitement du Signal et en Automatique », O. Macchi et M. Jaïdane considèrent les non-linéarités rencontrées dans l'étude des algorithmes adaptatifs. Ces dernières proviennent pour une part des stationnarités induites par l'adaptation du filtre, et pour une autre part du caractère éventuellement récursif du filtre. De tels filtres se sont introduits dès l'origine en Automatique (par l'aspect commande) et plus récemment en Traitement du Signal, l'adaptation peut alors engendrer une alternance de phases lentes et de phases rapides, même si elle demeure qualifiée de « lente ». La fin de l'article est une ouverture sur l'approche évolutive où l'adaptation doit être rapide. Ce sont alors les techniques de l'analyse des systèmes récurrents qui s'imposent en Signal comme en Automatique, systèmes qui ne sont ni stationnaires ni linéaires.

Dans l'analyse des phénomènes non stationnaires, la place de l'étude des non stationnarités brusques vient naturellement après celle des non stationnarités lentes. C'est un complément indispensable à la poursuite des variations douces qu'effectuent les algorithmes adaptatifs. D'où la synthèse de M. Basseville intitulée « Ruptures de modèles en Traitement du Signal ». En dépit de son titre, c'est un point de vue mixte Signal/Automatique que me semble refléter cet article. L'auteur adopte une démarche pédagogique qui part de 3 exemples concrets avant de présenter la démarche méthodologique fondamentale qui leur a été communément appliquée, démarche fondée sur la vraisemblance relative de deux modèles du signal *respectivement estimés avec une mémoire courte ou longue*.

Le développement des travaux au sein du GRECO avait fait espérer que cet article serait complété par une comparaison de l'approche évolutive (non stationnarité rapide) et de l'approche rupture de modèle, comparaison effectuée en vue de la Reconnaissance des Formes. Ce travail demeure un objectif, peut-être pour un prochain numéro spécial !

Le dernier article de ce numéro, de C. Uhl, O. Macchi, N. M'Sirdi, est intitulé « Stabilité des prédicteurs ARMA adaptatifs avec des entrées non stationnaires ». Ce n'est pas une synthèse mais un article de recherche sur le comportement des filtres adaptatifs dans un contexte non stationnaire. L'on connaît bien à l'heure actuelle les propriétés des filtres adaptatifs transverses dans un contexte stationnaire. L'on commence à connaître assez bien leur capacité de poursuite dans un contexte non stationnaire. En revanche le comportement des filtres adaptatifs récursifs n'est pas encore « élucidé » de manière satisfaisante, même dans le cas stationnaire. Il ne l'est pas du tout dans le cas d'entrées non stationnaires. L'article considère le premier niveau de questions, celui de la stabilité du système au sens de la bornitude de la sortie pour une entrée bornée. Il montre, en particulier à l'aide du signal de parole, que le critère des pôles intérieurs au cercle unité valable pour un filtre fixe, n'a pas d'équivalent non stationnaire à l'aide des pôles instantanés. Ce premier résultat est parcellaire et devrait appeler des travaux ultérieurs non seulement sur le type de non stationnarités qui assure la stabilité de l'algorithme adaptatif, mais aussi sur la qualité de poursuite de ce dernier.

En tant qu'animateur du GRECO commun Signal/Automatique qui s'est achevé en janvier 1988 et en tant que rédacteur en chef de ce numéro spécial, je suis heureuse d'adresser mes remerciements à tous ceux qui ont œuvré au sein de ce GRECO. Je sais que c'est parfois un travail ingrat parce qu'il demande beaucoup d'efforts. En revanche je suis persuadée que c'est une vraie tâche scientifique et parmi les plus fécondes à cause de l'enrichissement mutuel des modes de pensées. Je crois l'avoir montré dans cet éditorial en insistant en

particulier sur les efforts d'une vision un peu automatique aux problèmes de Traitement de Signal évoqués ici.

A l'issue de ce GRECO passé, Automaticiens d'une part, Traiteurs de Signaux de l'autre ont rejoint leur propre GRECO. Peut-on maintenant éviter que les échanges se tarissent, ou même que les chemins divergent ?

A l'intérieur même du Traitement du Signal, je crois aussi que ces 4 années de rencontres et d'interaction ont apporté aux trois familles d'esprit « adaptatif », « évolutif », « ruptures » une plus grande ouverture que chacun a appréciée, ainsi que des résultats tangibles. Je pense par exemple aux articles rédigés en commun par plusieurs équipes et tout particulièrement aux cinq articles de

la Session spéciale « Modélisation, Processus non stationnaires » du 11^e Colloque GRETSI (1987). Je ne saurais trop recommander au lecteur intéressé par le non stationnaire de compléter la lecture du présent numéro spécial de *Traitement du Signal* par celle du volume II, GRESI-87, pages 741-764. Il s'agit là aussi d'une sorte de bilan de 4 années de travail commun sur le non stationnaire, avec une vision assez large pour permettre la comparaison d'algorithmes et de méthodes variés.

Avec le présent volume, ces pages témoignent que pendant la période du GRECO SARTA des progrès substantiels ont été accomplis dans la compréhension des phénomènes non stationnaires aussi bien au niveau méthodologique, par la complexité croissante des questions abordées et le degré de généralité des solutions obtenues, que par les applications très variées qui ont été envisagées. Tous ces résultats ont été rapidement diffusés dans le GRECO, une diffusion plus large dans la communauté française du Signal étant assurée par le présent numéro. Même s'il reste encore beaucoup à faire on peut donc se flatter d'un acquis français décisif dans les années 1984 à 1988 sur le thème non stationnaire.

Au sein du nouveau GRECO « Traitement du Signal et Image » (TDSI), je formule le souhait que ce thème soit encore approfondi et surtout qu'il ne manque pas de s'élargir aux questions touchant le *non linéaire* qui leur sont intimement liées, comme je l'ai montré. Le non linéaire est un domaine encore trop peu exploré dans la discipline Signal et c'est dommage car elle y a une contribution originale à apporter. On connaît par exemple l'accroissement actuel considérable des travaux sur les réseaux de neurones formels qui sont des systèmes susceptibles d'apprentissage et essentiellement non linéaires. Il est clair que l'approche adaptative issue du Traitement de Signal peut avoir une interaction féconde avec ces recherches, pourvu que les Traiteurs de Signaux investissent plus sur les problèmes de non linéarité.

Mon dernier mot sera donc pour encourager les chercheurs du nouveau GRECO TDSI à poursuivre leurs efforts de connaissance mutuelle et de travail en commun, en dépit des nécessaires différenciations entre groupes de travail, afin que TDSI soit scientifiquement aussi fécond que l'a été le SARTA.