INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

Projet FRACTALES

Approche Fractale pour l'Analyse et la Modélisation des Signaux

Rocquencourt

THÈME 4A

Rapport d'Activité

2000

Table des matières

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Jacques Lévy Véhel [DR, Inria, en détachement CNRS depuis 01/10/98]

Responsable permanent

Evelyne Lutton [CR, Inria]

Assistante de projet

Nathalie Gaudechoux [en commun avec A3]

Collaborateurs extérieurs à l'IrCcyn

Michel Guglielmi [Ingénieur de Recherche, CNRS]

Ina Taralova [Maître de Conférence, IrCcyn]

Collaborateurs extérieurs

Antoine Ayache [Université de Dauphine, Ceremade]

Lotfi Belkacem [Institut Supérieur de Gestion, Tunisie]

Pierre Collet [Ecole Polytechnique]

Xavier Godivier [IrCcyn]

Jean Louchet [ENSTA]

Claude Tricot [Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand]

Christian Walter [Coopers & Lybrand]

Chercheurs invités

Christian Houdré [du 01/09/2000 au 31/12/2000]

Kiran Kolwankar [du 15/01/2000 au 15/09/2000]

Doctorants

Erick Herbin [Dassault Aviation, Université Paris 5]

Yann Landrin-Schweitzer [boursier INRIA, Université Paris 11]

Benoît Leblanc [boursier CIFRE IFP, Université Paris 11]

Anne Manoury [boursière de la région des pays de Loire, IrCcyn]

Moustapha Ndoye [boursier INRIA, Université Paris 9]

Frédéric Raynal [boursier DRET/CNRS, Université Paris 11]

Stéphane Seuret [Corps X-Telecom]

Ingénieur associé

Olivier Meunier [du 01/10/2000 au 31/10/2001]

Stagiaires

Alexandre Abbès [du 01/01/00 au 31/08/00]

Guillaume Bouchard [du 01/06/2000 au 31/10/2000, en commun avec I3d]

Pierrick Legrand [du 01/03/00 au 31/10/00]

Biplab Sikdar [12/05/00 au 15/08/00]

2 Présentation et objectifs généraux

Mots clés : algorithme génétique, analyse 2–microlocale, analyse financière, analyse d'image, analyse multifractale, analyse temps-fréquence, analyse de texture, compression fractale, compression d'image, détection de changements, fonction höldérienne, fractale, grande déviation, IFS, loi stable, mouvement Brownien fractionnaire, ondelette, optimisation, problème inverse, signaux musicaux, système de fonction itérée, trafic sur les réseaux d'ordinateurs, traitement du signal, watermarking.

La géométrie fractale a connu un essor important ces dernières années tant au plan théorique (mise au point de l'analyse multifractale, approfondissement de la théorie des systèmes de fonctions itérées, étude des liens avec les ondelettes, ...) que pratique (on dénombre aujourd'hui environ mille "systèmes fractals" identifiés dans les domaines de la croissance non linéaire, de la percolation, des milieux poreux, de la géophysique, des sciences économiques, de la médecine, et du traitement du signal).

Le projet *FRACTALES* a pour objectif la mise au point d'outils théoriques appartenant au domaine de l'analyse fractale pour effectuer le traitement et la modélisation de signaux complexes.

Une des activités principales de *FRACTALES* est le développement d'une "boîte à outils", FRACLAB, de programmes de traitements fractals du signal comparable à ce qui existe dans le domaine de l'analyse de Fourier ou en ondelettes.

Au plan théorique, le projet *FRACTALES* se concentre sur les domaines suivants :

- **Analyse multifractale** : définition de nouveaux spectres, estimation, étude des corrélations multifractales, caractérisations de capacités à travers leurs propriétés multifractales, spectres conditionnels [5].
- **Analyse de la régularité ponctuelle de fonctions** : théorie des IFS, fonctions faiblement auto-affines, étude de fonctions à régularité prescrite, optimisation de fonctions irrégulières par algorithmes génétiques, analyse 2–microlocale [1, 3].
- **Processus stables et fractionnaires** : simulation et capacité à modéliser certains types de signaux, mouvement Brownien fractionnaire et ses généralisations [10].
- **Analyse temps fréquence** : définition et utilisation de nouvelles transformations adaptées à l'analyse fractale des signaux.

Les résultats de ces études théoriques sont validés sur des applications en traitement du signal qui en sont des prolongements naturels. Ces dernières induisent à leur tour de nouveaux développements en fonction des problèmes rencontrés dans la pratique. Les applications peuvent être classées en deux catégories :

- Traitement de signaux 1D : modélisation du trafic sur les réseaux d'ordinateurs, synthèse de la parole, analyse de signaux musicaux et modélisation de cours financiers [6].
- Traitement de signaux 2D : analyse, segmentation, débruitage, compression et watermarking d'images [7].

Le projet a des relations fortes avec l'IrCcyn à Nantes. Il a des collaborations avec l'Université de Saint-Andrews, l'Université de Waterloo et celle de Yale. Il est impliqué dans le réseau européen EVONET.

D'autre part FRACTALES a des contrats avec Dassault Aviation, Novartis Pharma, l'IFP et la DRET.

3 Fondements scientifiques

3.1 Régularité ponctuelle

Participants : Kiran Kolwankar, Jacques Lévy Véhel, Stéphane Seuret.

Mots clés : analyse 2–microlocale, exposant de Hölder, régularité ponctuelle.

En collaboration avec Stéphane Jaffard (Université Paris XII).

Résumé : *Dans certaines situations, des informations essentielles sont contenues dans la régularité ponctuelle d'une fonction et dans la manière dont celle-ci varie. Cette notion peut être formalisée de diverses façons : nous étudions plus particulièrement les exposants de Hölder et les exposants 2–microlocaux. La régularité deux microlocale étend la notion de régularité Hölderienne et est plus robuste vis à vis de certaines opérations.*

Il existe de multiples façons de réaliser une analyse fractale d'un signal. Notre équipe s'intéresse à deux d'entre elles, le calcul de la régularité ponctuelle et l'analyse multifractale.

Dans le premier cas, on associe à un signal $f(t)$ un autre signal $\alpha(t)$, la fonction de Hölder de f, qui mesure la régularité de f en chaque point t. Cette dernière peut être évaluée de diverses manières. L'exposant de Hölder ponctuel α de f en x_0, par exemple, est défini par :

$$\alpha(x_0) = \lim_{\rho \to 0} \sup \{\alpha \ : \exists c > 0, |f(x) - f(x_0)| \leq c|x - x_0|^{\alpha}, | x - x_0| < \rho\}$$

(cette définition est valable pour α non entier et si f est non dérivable, sinon il faut retrancher un polynôme au lieu de $f(x_0)$).

On peut aussi définir un exposant local $\alpha_l(x_0)$ par :

$$\alpha_l(x_0) = \lim_{\rho \to 0} \sup \{\alpha \ : \exists c > 0, |f(x) - f(y)| \leq c|x - y|^{\alpha}, |x - x_0| < \rho, |y - x_0| < \rho\}$$

α et α_l ne coïncident pas en général (si $f(x) = |x|^{\alpha} \sin \frac{1}{|x|^{\beta}}$, $\alpha(0) = \alpha$ et $\alpha_l(0) = \frac{\alpha}{1+\beta}$) et ont des propriétés très différentes. Par exemple, α_l est stable par différentiation ($\alpha_l(f', x_0) = \alpha_l(f, x_0) - 1$) alors que α ne l'est pas.

En général, plus $\alpha(t)$ est petit, plus la fonction f est irrégulière en t. Un exposant négatif est le signe d'une discontinuité, alors que si $\alpha(t)$ est strictement supérieur à 1, f est au moins une fois dérivable en t. La caractérisation des signaux par leur régularité Höldérienne a été considérée par de nombreux auteurs d'un point de vue théorique (par exemple en relation avec la décomposition en ondelettes) et dans les applications en traitement du signal (analyse de la turbulence, segmentation d'image). Une telle approche est intéressante dès que l'information pertinente réside dans les irrégularités du signal plus que, par exemple, dans son amplitude ou dans sa transformée de Fourier. C'est en particulier le cas quand on cherche à détecter des contours dans une image ou à caractériser les parties non voisées d'un signal de parole. Les questions qui se posent naturellement dans ce contexte et que nous avons en partie résolues sont la caractérisation des fonctions de Hölder ponctuelles ou locales, la comparaison des différentes mesures d'irrégularité, et leur estimation sur des signaux réels.

La définition de l'exposant de Hölder, facile à appréhender, reproduit de façon assez fidèle la notion intuitive de régularité. Toutefois, trop attaché aux valeurs ponctuelles de la fonction, l'exposant de Hölder ne se comporte pas correctement sous l'action de nombreux opérateurs (pseudo-)différentiels. On introduit alors les espaces 2-microlocaux $C_{x_0}^{s,s'}$ qui, par l'adjonction d'un deuxième indice permettent de prendre en compte un comportement *au voisinage du point*. Bénéficiant d'une caractérisation simple au travers de conditions de décroissance des coefficients d'ondelettes du signal, les espaces 2-microlocaux jouissent en particulier de la propriété suivante :

$$f \in C_{x_0}^{s,s'} \Longrightarrow f' \in C_{x_0}^{s-1,s'}$$

Une nouvelle caractérisation temporelle des espaces 2-microlocaux a été proposée. Ceci permet en particulier la mise au point de procédure d'estimation efficaces.

3.2 Analyse multifractale

Participants : Jacques Lévy Véhel, Claude Tricot.

Mots clés : analyse multifractale, spectre de grandes déviations, spectre de Hausdorff.

Résumé : *L'analyse multifractale fournit une description à la fois locale et globale des singularités d'un signal : la première est obtenue via l'exposant de Hölder, et la seconde grâce aux spectres multifractals. Ceux-ci caractérisent de façon géométrique et statistique la répartition des singularités sur le support du signal.*

Il arrive que la fonction de Hölder soit très simple alors que le signal est irrégulier. C'est le cas par exemple pour la fonction de Weierstrass, ou pour le mouvement Brownien fractionnaire, qui sont nulle part dérivables, mais dont la fonction de Hölder est constante. Il existe cependant des signaux, d'apparence très irrégulière, pour lesquels la fonction de Hölder est encore plus irrégulière, par exemple des signaux continus f tels que α_f est partout discontinue. L'exemple canonique est le graphe d'un IFS. Dans ces situations, entre autres, il est plus intéressant d'avoir recours à une autre description du signal, le spectre multifractal : au lieu de donner pour chaque t, la valeur de l'exposant de Hölder, on regroupe tous les points de même exposant α dans un sous-ensemble E_α, et on caractérise l'irrégularité de façon *globale* en calculant, pour chaque valeur de α, la dimension de Hausdorff $f_h(\alpha)$ de l'ensemble E_α. On évalue ainsi, de façon géométrique, la "taille" des parties du domaine de f où une singularité donnée apparaît. Une autre possibilité est de donner une caractérisation statistique de la répartition des singularités : plus précisément, le spectre de grande déviation $f_g(\alpha)$ estime la vitesse exponentielle de décroissance de la probabilité de rencontrer une singularité à peu près égale à α à la résolution n quand n tend vers l'infini.

Ce type d'analyse, d'abord apparu dans le contexte de la turbulence, s'est ensuite beaucoup développé à la fois au plan théorique (analyse de mesures ou fonctions auto-similaires dans un cadre déterministe et aléatoire, extensions aux capacités, spectres d'ordres supérieurs) et dans les applications (étude des séquences DLA, analyse de la distribution des tremblements de terre, traitement du signal, segmentation et débruitage d'images, analyse du trafic routier et internet).

Nos travaux en analyse multifractale s'attachent aux calculs théoriques des spectres, à leur comparaison (formalisme multifractal), et à l'obtention d'estimateurs robustes, dans les cas déterministes et aléatoires.

3.3 Processus fractals

Participants : Antoine Ayache, Lotfi Belkacem, Michel Guglielmi, Jacques Lévy Véhel, Moustapha N'Doye.

En collaboration avec Serge Cohen (Université de Versailles-St-Quentin en Yvelines).

Mots clés : mouvement Brownien fractionnaire, processus alpha–stable.

Résumé : *Les processus à mémoire longue (c'est-à-dire dont la fonction d'autocorrélation décroît "lentement") et ceux dont la variance marginale est infinie possèdent des propriétés intéressantes, parfois contre intuitives. Nous étudions certains de ces processus, comme le mouvement Brownien fractionnaire ou les processus α–stables, qui présentent des caractéristiques fractales.*

Nous étudions des processus tels que le mouvement Brownien fractionnaire (mBf) ou les processus α–stables, qui ont des caractéristiques fractales comme l'auto–affinité ($x(at) \overset{d}{=} a^H x(t)$, où $\overset{d}{=}$ signifie l'égalité en distribution), l'irrégularité des trajectoires, ou la mémoire à long terme (décroissance lente de la fonction d'autocorrélation $E(x(t)x(t+\tau)) \sim |\tau|^\beta$ quand $\tau \to \infty$, $-1 < \beta < 0$). Ces processus s'éloignent des modèles "classiques" de deux façons :

- les processus α–stables ont, pour $\alpha < 2$, une variance infinie. Les lois marginales sont caractérisées par quatre paramètres : $\alpha \in (0, 2]$ décrit l'épaisseur des queues de distribution ($E(|X|^\beta) = +\infty$ dès que $\beta \geq \alpha$ si $\alpha \neq 2$), μ est un paramètre de localisation (égal à la moyenne quand $\alpha > 1$), $\gamma > 0$ est le paramètre d'échelle, et $\beta \in [-1, 1]$ rend compte de l'asymétrie de la distribution. La variance infinie induit des discontinuités dans les trajectoires et influe sur leur dimension de Hausdorff.
- Les processus à mémoire longue présentent une divergence de la densité spectrale à l'origine, qui se traduit par la présence de "pseudo–cycles" de toutes tailles sur les trajectoires.

Dans ces deux cas, la plupart des outils classiques (théorème central limite, convergence d'estimateurs) ne s'appliquent plus sous leur forme usuelle, et il faut leur substituer des généralisations. Nos recherches s'attachent à décrire certaines propriétés fractales et multifractales de ces processus et à en chercher des extensions qui les rendent plus adaptées à certaines applications. A titre d'exemple, le mBf possède une régularité ponctuelle presque sûre identique en chaque point. Cette caractéristique en restreint l'utilisation pratique et nous avons défini une généralisation, appelée mouvement Brownien multifractionnaire, qui permet un contrôle en chaque point de l'exposant de Hölder.

D'autre part, les processus et plus généralement tous les signaux fractals ne sont jamais à bande limitée. On ne peut donc pas en principe les échantillonner sans les filtrer au préalable. Ce filtrage induit parfois des pertes d'informations essentielles. Un sujet d'étude fondamental est d'essayer de contourner ces difficultés en définissant de nouvelles procédures d'échantillonnage.

3.4 Algorithmes génétiques

Participants : Jacques Lévy Véhel, Evelyne Lutton, Yann Landrin-Schweitzer.

Mots clés : algorithme évolutif, algorithme génétique, analyse de déceptivité, optimisation stochastique, problème inverse, théorie des schémas.

Résumé : *Dans le cadre de l'analyse de signaux fondés sur des méthodes issues de la géométrie fractale, on est souvent amené à optimiser des fonctions (ou énergies) qui dépendent d'un grand nombre de paramètres, et qui sont extrêmement irrégulières. Les algorithmes génétiques se sont révélés être des outils efficaces, permettant d'obtenir des solutions robustes, difficiles à obtenir à l'aide d'autres techniques. Une partie des travaux effectués dans le projet a réciproquement pour but de montrer l'intérêt d'employer des outils "fractals" pour affiner et compléter certaines analyses théoriques sur les algorithmes génétiques.*

Les Algorithmes Génétiques (AG) et plus généralement les Algorithmes Evolutifs (AE) sont principalement connus comme des méthodes d'optimisation stochastiques efficaces pour des problèmes très complexes et sont employées dans des domaines d'application extrêmement variés. Toutes ces techniques s'inspirent des comportements biologiques des populations naturelles, et sont fondées sur l'évolution d'une "population" de solutions au problème traité, l'évolution étant guidée par une fonction de "fitness" qui est maximisée au cours du processus.

Les analyses théoriques dans le domaine des AG et des AE sont principalement orientées vers l'analyse de la convergence, l'influence des paramètres et l'analyse de la "facilité" ou de la "difficulté" pour une classe de fonction, à être traitée par un AE (déceptivité). Pour les AG, plus particulièrement, on peut distinguer plusieurs approches : la modélisation de populations successives de solutions sous forme d'une chaîne de Markov [DP91,Cer95], l'analyse de déceptivité fondée sur la théorie des Schémas [Gol89], enfin, très récemment, la modélisation sous forme de système dynamique, où on a pu montrer le comportement de type "fractal" de certains AG (et générer les ensembles de type Julia correspondants) [JV94].

D'un point de vue théorique, certains outils qui ont été développés dans le cadre de la géométrie fractale peuvent être employés pour affiner une analyse de déceptivité des AG. En effet, l'analyse de la façon dont un AG optimise certaines fonctions "fractales" (ou plus précisément des fonctions Höldériennes) permet de comprendre l'influence de certains des paramètres de l'AG. Cette analyse peut être ensuite étendue à des fonctions plus générales et donne des indications sur la façon de modifier les paramètres afin d'améliorer les performances de l'AG. Une analyse plus poussée sur la même base théorique fournit aussi une méthode relativement robuste d'évaluation de l'efficacité d'un codage des solutions dans un AG [9].

3.5 Analyse temps fréquence/temps échelle

Participants : Alexandre Abbes, Michel Guglielmi, Jacques Lévy Véhel, Olivier

[DP91] T. E. Davis, J. C. Principe, « A Simulated Annealing Like Convergence Theory for the Simple Genetic Algorithm », *in : Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithm*, p. 174–182, 1991. 13-16 July.

[Cer95] R. Cerf, *Artificial Evolution, European Conference, AE 95, Brest, France, September 1995, Selected papers*, *Lecture Notes in Computer Science 1063*, Springer Verlag, 1995, ch. Asymptotic convergence of genetic algorithms, p. 37–54.

[Gol89] D. E. Goldberg, « Genetic Algorithms and Walsh functions: I. A gentle introduction, II. Deception and its analysis », *Complex Systems 3*, 2, April 1989, p. 129–171.

[JV94] J. Juliany, M. D. Vose, « The Genetic Algorithm Fractal », *Evolutionary Computation 2*, 2, 1994, p. 165–180.

Meunier.

Mots clés : Gabor, temps-échelle, temps-fréquence, ondelette.

Résumé : *Les représentations temps-fréquence et temps-échelle sont une extension de l'analyse de Fourier classique aux signaux non stationnaires. On parle alors d'analyse spectrale dépendante du temps, dont un paradigme simple est le concept de partition musicale.*

L'analyse temps-fréquence repose sur la combinaison des deux variables temps et fréquence dans une même représentation, fournissant ainsi une signature de l'évolution temporelle du contenu spectral. Différentes approches existent : la plus intuitive consiste à limiter temporellement et fréquentiellement les éléments de la famille d'analyse, puis à déplacer en tous points du plan temps-fréquence[1] les atomes d'analyse ainsi définis, avant d'évaluer le produit scalaire avec le signal analysé :

$$\Gamma_x(t, f \; ; \; g) \; = \; \langle x, g_{t,f} \rangle \quad \text{avec} \quad g_{t,f}(u) \; = \; \mathcal{A}_t \mathcal{B}_f \; g_0(u).$$

$\mathcal{A}$ et $\mathcal{B}$ sont des opérateurs de déplacement en temps et en fréquence respectivement et g_0 est la fonction d'analyse "mère" offrant de bonnes propriétés de localisation conjointe en temps et en fréquence.
Ainsi, *la transformée de Fourier à court terme* (ou décomposition atomique de Gabor) correspond aux opérateurs de translation en temps et de translation en fréquence. Pour leur part, *les décompositions en ondelettes* reposent sur le choix des opérateurs de translation en temps et de changement d'échelle (compression/dilatation).
Les densités d'énergie obtenues en considérant le module carré des coefficients $\Gamma_x(t, f \; ; g)$ appartiennent à une classe de représentations temps-fréquence plus riche, celle des *distributions bilinéaires d'énergie*. Ces distributions sont définies par un opérateur intégral agissant sur une forme quadratique du signal selon :

$$\rho_x(t, f \; ; \; K) \; = \; \int\!\!\int x(u) \; x^*(v) \; K(u, v \; ; t, f) \; du \; dv.$$

On peut imposer des propriétés de covariance sur les distributions ρ relativement aux opérateurs de déplacement temps-fréquence $\mathcal{A}_t$ et $\mathcal{B}_f$. En particulier, les deux choix d'opérateurs retenus pour les décompositions linéaires de Gabor et en ondelettes conduisent respectivement aux classes de Cohen et affines.

La distribution de Wigner-Ville : $W_x(t, f) \; = \; \int x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \; x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \; e^{-i2\pi f\tau} \; d\tau$, est un cas particulier à partir duquel classe de Cohen et classe affine peuvent être définies paramétriquement via l'introduction de noyaux arbitraires. Les propriétés que l'on souhaite imposer aux distributions peuvent alors se traduire sous forme de contraintes structurelles sur les noyaux de paramétrisation correspondants.

Nous appliquons en particulier ces outils au problème suivant, dit "audio2midi" : comment, à partir d'un enregistrement musical, retrouver les partitions jouées par les divers instruments.

1. On peut également définir des décompositions atomiques discrètes reposant sur un maillage discret du plan temps-fréquence.

4 Domaines d'applications

4.1 Trafic sur Internet

Participants : Jacques Lévy Véhel, Biplab Sikdar.

En collaboration avec D. Koffman (ENST) et P. Nain (INRIA Sophia).

Mots clés : analyse multifractale, mouvement Brownien multifractionnaire, trafic de données.

Résumé : *Les trafics sur les réseaux d'ordinateurs présentent des spécificités dont l'étude nécessite de nouveaux outils ; en particulier, leur forte sporadicité, qui ressemble à celle de processus tel le mBf, a des conséquences importantes par exemple sur les temps de transfert.*

Les modèles conventionnels de trafic supposent généralement que les processus d'arrivée (caractérisés par le nombre d'octets échangés) sont, soit sans mémoire, soit à mémoire “courte”. Ces hypothèses se sont révélées inadéquates pour décrire la structure des trafics observés sur des réseaux de type LAN. En particulier, elles ne permettent pas de rendre compte de la forte sporadicité observée sur plusieurs échelles de temps, qui semble être principalement liée au fait que les processus d'arrivée sont à mémoire longue. Des modèles récents prennent en compte cette caractéristique en considérant le processus à mémoire longue le plus simple, le mouvement Brownien fractionnaire. Le succès du mBf comme modèle du trafic repose sur le fait que le degré de dépendance à long terme est contrôlé par un seul paramètre, H. La dépendance à long terme étant grossièrement une qualité statistique de l'ordre 2, il est naturel de se demander si le mBf est aussi un bon modèle pour les statistiques d'ordre supérieur des trafics réels.

L'analyse multifractale permet d'apporter des réponses via le spectre multifractal qui caractérise les irrégularités locales du processus. Pour un mBf, ce spectre est trivial : la régularité locale est partout la même (égale à H). Dans ce sens, le mBf est un processus monofractal. Des études numériques intensives ont montré que les trafics LAN enregistrés à Berkeley et au CNET exhibent au contraire un comportement multifractal sur 3 à 4 ordres de grandeur.

Les spectres observés mettent aussi en évidence les différences entre les trafics sortant et entrant, dans toutes les traces analysées. D'autre part, la forme particulière du spectre du trafic sortant à Berkeley fournit des informations sur la stationnarité du processus, une question importante en pratique. Plus généralement, l'intérêt de ce type d'étude est que les propriétés fractales et multifractales du trafic, comme la mémoire longue et l'irrégularité ponctuelle, ont des répercussions par exemple sur le comportement des files d'attente ou sur les temps de transfert des données.

Pour mieux comprendre comment apparaissent ces caractéristiques fractales, nous réalisons des expériences sur un réseau dédié au sein de l'ARC Epsilon. Celles-ci ont mis en évidence plusieurs causes possibles de multifractalité.

4.2 Problèmes inverses

Participant : Evelyne Lutton.

Mots clés : algorithme génétique, optimisation stochastique, problème inverse, programmation génétique.

Résumé : *Certains problèmes inverses liés à l'analyse fractale de signaux peuvent être traités avec succès à l'aide d'algorithmes génétiques : problème inverse pour les IFS avec application à la modélisation de signaux de parole, problème inverse pour les automates finis. Il importe cependant de bien exploiter les potentialités des AG pour obtenir des algorithmes efficaces : l'expérience prouve qu'un paramétrage soigneux et un codage des solutions ingénieux peuvent améliorer de façon importante l'efficacité et les performances des algorithmes.*

Un problème inverse standard peut se formuler de la façon suivante : à partir d'un certain jeu de données, on sait calculer la sortie d'un système, mais, ayant une sortie donnée (la "cible"), on ne sait pas remonter au jeu de données d'entrée du système.

La stratégie classique, de type "boîte noire", consiste à transformer le problème inverse en un problème d'optimisation : optimiser le jeu de données d'entrée de façon à ce que la sortie du système ressemble à la cible. En règle générale, les AE sont assez bien adaptés à la résolution de problèmes inverses difficiles pour lesquels on a peu d'information a priori (on ne connaît pas en général explicitement la fonction à optimiser, et encore moins ses dérivées par exemple). Dans le domaine de l'analyse fractale de données, un certain nombre de problèmes inverses difficiles ont été traités avec succès, par exemple :

- le problème inverse pour les IFS [Vrs90,Vrs91,NG94,MS89]. Des études ont été menées dans le projet pour les IFS affines à l'aide d'AG, et dans le cas plus complexe des IFS mixtes à l'aide d'une méthode de programmation génétique. Une application directe à la modélisation de signaux de parole a en outre été proposée,
- le problème inverse pour les automates finis.

L'établissement de méthodes de résolution de ces problèmes inverses "académiques" a tout naturellement conduit a des applications des AG :

- en compression d'images [VR94,Goe94],

[Vrs90] E. R. Vrscay, « Moment and collage methods for the inverse problem of fractal construction with iterated function systems », *in : Fractal 90 Conference*, 1990. Lisbonne, June 6-8.

[Vrs91] E. R. Vrscay, *Fractal Geometry and Analysis*, J. Bélair and S. Dubuc, 1991, ch. Iterated function Systems: theory, applications and the inverse problem, p. 405–468, *Kluwer Academic Publishers.*

[NG94] D. J. Nettleton, R. Garigliano, « Evolutionary algorithms and a fractal inverse problem », *Biosystems 33*, 1994, p. 221–231, Technical note.

[MS89] G. Mantica, A. Sloan, « Chaotic optimization and the construction of fractals : solution of an inverse problem », *Complex Systems 3*, 1989, p. 37–62.

[VR94] L. Vences, I. Rudomin, « Fractal compression of single images and image sequences using genetic algorithms », 1994, The Eurographics Association.

[Goe94] B. Goertzel, « Fractal image compression with the genetic algorithm », *Complexity International 1*,

– pour l'optimisation d'antennes fractales [Coh97].

La difficulté de telles applications réside essentiellement dans le fait de trouver un codage du problème adéquat d'une part (il faut exploiter efficacement un certain nombre de connaissances a priori que l'on a sur le système), et d'autre part de traiter de façon convenable les contraintes (qui peuvent permettre de faire des "économies" importantes de calcul, comme nous l'avons montré dans le cas du problème inverse pour les IFS).

4.3 Traitement d'images

Participants : Xavier Godivier, Pierrick Legrand, Jacques Lévy Véhel, Evelyne Lutton.

Mots clés : analyse multifractale, débruitage, détection de changements, segmentation.

Résumé : *L'analyse multifractale des images consiste à définir des mesures à partir des niveaux de gris, à en calculer les spectres, et à traiter les points sur la base des informations à la fois locales et globales qui en résultent. Contrairement à d'autres approches, aucun filtrage n'est effectué. On peut ainsi effectuer des segmentations, du débruitage, ou de la détection de changements.*

L'analyse d'image est une composante fondamentale dans la résolution des problèmes de vision par ordinateur, qui ont de nombreuses applications en robotique, imagerie médicale, imagerie satellitaire, etc ... Une étape importante est la segmentation, qui consiste à obtenir une description de l'image en termes de contours et de régions.

Les approches classiques dans ce domaine supposent généralement qu'une image est la trace discrète d'un processus sous-jacent C^1 par morceaux. En effectuant un filtrage, on peut alors par exemple extraire le gradient du signal, dont les extrema de la norme correspondent à peu près aux contours. On peut raffiner les résultats en appliquant des méthodes multirésolutions, fondées en particulier sur une transformée en ondelettes.

Les inconvénients d'une telle conception sont que le lissage préalable entraîne une perte en localisation, et que l'hypothèse d'un processus C^1 par morceaux sous-jacent n'est pas toujours réaliste : en présence de textures, par exemple, ces détecteurs échouent. En particulier, dans l'application aux images radar qui nous intéresse en premier lieu, il faut pouvoir prendre en considération un fort bruit corrélé et la présence de textures jouant un rôle important.

Une alternative est de considérer que l'image induit une mesure connue jusqu'à une résolution fixée et aussi irrégulière que l'on veut, et de quantifier alors ses singularités. L'approche multifractale s'inscrit dans ce cadre. Le principe général est le suivant : à partir des niveaux de gris de l'image, on définit diverses mesures et capacités. On peut alors effectuer une analyse multifractale de ces capacités, et en déduire des informations sur la structure de l'image. Une spécificité de cette approche est qu'elle tient compte à la fois des comportements locaux (via α) et globaux (via $f(\alpha)$). D'autre part, aucune hypothèse n'est faite quant à la régularité du signal étudié.

1994.

[Coh97] N. Cohen, «Antennas in Chaos : Fractal-Element Antennas», *in : Fractals in Engineering 97*, INRIA, 1997. Hot Topic Session, Arcachon, France, June 25-27.

Cette modélisation induit la procédure intuitive de segmentation suivante :

- grouper les points de même singularité pour obtenir les ensembles iso-α E_α,
- calculer $f(\alpha)$,
- si $f(\alpha) \simeq 2$, on classe le point comme appartenant à une région homogène,
- si $f(\alpha) \simeq 1$, on classe le point comme appartenant à un contour régulier,
- si $f(\alpha)$ est entre 1 et 2, on classe le point comme appartenant à un contour irrégulier,
- etc ...

On peut effectuer de même, sur la base des informations fournies par le spectre multifractal, du débruitage et de la détection de changement dans des séquences d'images. D'autre part, nous utilisons des techniques à base d'ondelettes et d'IFS pour le watermarking des images.

4.4 Cours financiers

Participants : Lotfi Belkacem, Jacques Lévy Véhel, Moustapha N'Doye.

En collaboration avec Christian Walter (Coopers & Lybrand).
Mots clés : analyse financière, gestion de portefeuille, mBm, processus alpha–stable.

Résumé : *L'analyse de cours financiers révèle que ceux-ci présentent des caractéristiques fractales comme la mémoire longue ou la variance infinie. Nous en étudions les conséquences par exemple sur la gestion de portefeuilles.*

Les buts que se fixe notre étude sont les suivants :

1. Modéliser les cours d'actifs financiers.
2. Modéliser les cours d'options.
3. Effectuer la gestion de portefeuilles.

La théorie financière classique s'appuie sur un cadre statistique bien défini, dans lequel trois hypothèses sont faites sur les variations successives des prix des actifs :

H1 - Stationnarité des accroissements du processus aléatoire régissant l'évolution temporelle des rendements.

H2 - Indépendance des accroissements du processus considéré.

H3 - Existence du moment d'ordre 2 des lois marginales du processus.

Le modèle induit par ces hypothèses est celui du mouvement Brownien. Ce qui motive l'introduction d'une approche fractale est que l'observation de la réalité des marchés financiers montre que les hypothèses H2 et H3 ne sont pas vérifiées en général, ce qui conduit naturellement à utiliser des généralisations du mouvement Brownien. On peut envisager deux extensions dans le cadre fractal :

- une corrélation des accroissements : on utilise cette fois des mouvements Browniens fractionnaires,
- une variance infinie des accroissements (sauts de discontinuité) : on considère alors des processus α-stables.

En particulier, la plupart des tests d'ajustement à la loi normale que nous avons effectués sont rejetés, principalement à cause du phénomène de leptokurticité, qui se traduit par l'existence de grandes variations des rentabilités. Au contraire, les tests d'adéquation à des lois α-stables semblent indiquer que ces dernières fournissent dans certains cas une modélisation acceptable. Cela a des conséquences importantes en pratique : en particulier, si la variance est infinie, la notion de risque, utilisée par exemple en gestion de portefeuilles, doit être redéfinie.

4.5 Audio2midi

Participants : Jacques Lévy Véhel, Olivier Meunier.

Nous appliquons des outils de l'analyse temps-fréquence au problème de la transformation d'un flux audio en fichier MIDI.

5 Logiciels

5.1 FRACLAB

Participants : Lotfi Belkacem, Pierrick Legrand, Jacques Lévy Véhel, Frédéric Raynal, Jon Weil.

Fraclab est une boîte à outils d'analyse fractale orientée vers le traitement des signaux 1–D et 2–D. Fraclab offre un large éventail de techniques fondées sur des développements récents en analyse fractale et multifractale, théorie des IFS, théorie des processus aléatoires fractals et analyse en ondelettes.
Fraclab offre deux voies pour l'analyse d'un signal : soit l'on est spécifiquement intéressé par ses propriétés fractales, et il est alors possible de déterminer diverses dimensions, régularités locales ou spectres multifractals. Soit on désire plutôt effectuer une tâche classique en traitement du signal : débruitage, modélisation, segmentation ou estimation, et ces traitements sont applicables avec les techniques fractales disponibles dans Fraclab.
Les routines Fraclab sont essentiellement développées en langage C et interfacées avec les logiciels de programmation scientifique Matlab (version 5.0) et Scilab (développé et diffusé gratuitement par le projet METALAU à l'Inria). Fraclab est développé sur les environnements Unix, Linux et Windows. Une interface graphique en rend l'utilisation aisée.
Fraclab peut être téléchargé gratuitement (codes sources et exécutables) à l'adresse ftp suivante : `ftp.inria.fr`. Une page internet dédiée à Fraclab se trouve à l'adresse
`http://www-rocq.inria.fr/fractales/Software/FRACLAB/`

Environ deux cents laboratoires dans le monde se sont déclarés intéressés par cette boîte à outils, et quelques dizaines l'utilisent régulièrement.

5.2 EASEA : langage de specification d'algorithmes évolutionnaires

Participants : Pierre Collet, Jean Louchet, Evelyne Lutton.

En collaboration avec Marc Schoenauer (CMAPX), dans le cadre de l'ARC EVO-Lab.
Mots clés : algorithme évolutionnaire, optimisation stochastique.

Un des buts de l'action coopérative EVO-Lab au sein du projet européen EVO-NET est de faciliter l'accès aux algorithmes évolutionnaires en essayant d'offrir aux utilisateurs dont l'informatique n'est pas la spécialité les moyens de concevoir et réaliser des programmes basés sur des algorithmes évolutionnaires.

EVO-Lab propose d'offrir à l'utilisateur novice :

– une interface graphique simple pour lui permettre de spécifier les caractéristiques de algorithme évolutionnaire qu'il souhaite implémenter,

– la possibilité d'écrire sa propre fonction d'évaluation dans le langage de son choix.

Pour passer de la représentation graphique au programme exécutable correspondant, l'application EVO-Lab produit un code source intermédiaire dans un nouveau langage spécialisé dans l'écriture d'algorithmes évolutionnaires appelé EASEA (pour EAsy Specification of Evolutionary Algortithms)

Le type de langage auquel EASEA s'apparente le plus est un langage dit de $4^{\text{ème}}$ génération : son but est de simplifier la vie de l'utilisateur en fournissant (à l'opposé de C, par exemple) un certain nombre de primitives très complexes. L'utilisation d'un tel langage permet alors de résumer en quelques dizaines de lignes un programme qui en aurait nécessité plusieurs centaines dans un langage non spécialisé.

Concrètement, le source écrit par l'utilisateur (ou par une interface graphique) est traduit par EASEA en un programme source C++ utilisant les primitives d'une boîte à outils évolutionnaire. Ce programme source est ensuite compilé avec un compilateur C++ et les librairies de la boîte à outils. Le résultat est un exécutable implémentant l'algorithme évolutionnaire spécifié par l'utilisateur.

Un prototype du langage EASEA est actuellement disponible sur le site WEB de l'ARC.

5.3 Arthur/Excalibur

Arthur est un logiciel de segmentation d'images fondé sur l'analyse texturelle. Il est adapté au traitement d'images satellitaires, radar, échographique, c'est-à-dire à chaque fois qu'une information importante réside dans les textures présentes dans la scène. Arthur offre la possibilité de calculer un grand nombre d'attributs texturels (plus de 1 000), fondés, entre autres, sur des critères statistiques, des analyses en ondelettes et fractales. Il extrait ensuite, via diverses méthodes d'analyse de données et en fonction des textures d'apprentissage, un petit nombre de paramètres discriminants ainsi que des règles de segmentation, qui seront utilisées par Excalibur. Excalibur incorpore de plus divers outils permettant de raffiner les segmentations obtenues.

Ces deux logiciels fonctionnent sur stations UNIX et possèdent une interface graphique élaborée. Plusieurs sociétés industrielles les utilisent ou les ont utilisées (Matra, Dassault, Alcatel), ainsi que des laboratoires de recherches en France.

5.4 XAlpha

XAlpha est un logiciel de segmentation d'images en contours fondé sur une analyse multifractale. Il offre plusieurs choix de mesures d'analyse permettant de s'intéresser à différentes caractéristiques dans une image et incorpore une interface graphique. Il fonctionne sur station UNIX.

5.5 ALGON : boîte à outils d'optimisation par algorithmes génétiques

Participants : Benoît Leblanc, Evelyne Lutton, Frédéric Raynal.

Mots clés : algorithme génétique, optimisation stochastique.

ALGON est une boîte à outils d'"Algorithmes Génétiques" : un ensemble de fonctions et de procédures écrites en langage C destinées à être utilisées pour résoudre des problèmes d'optimisation par algorithme génétique.

Ses caractéristiques essentielles sont :

- un alphabet de codage de taille quelconque,
- une représentation des solutions par des chaînes de caractères (chromosomes) de taille variable,
- un nombre quelconque de chromosomes par individu,
- différents choix pour la méthode de sélection, le croisement, la mutation, le sharing, la politique de survie,
- une interface graphique interactive sous Tixwish permettant des choix interactifs de paramètres et de méthodes ainsi qu'un suivi graphique de la progression de l'algorithme.

Bien sûr, des fonctions relatives au problème restent à programmer pour chaque application. Principalement, il reste à définir :

- un codage pour représenter une solution potentielle.
- une fonction de "fitness" à maximiser.

A partir de ces indications, un exécutable peut être construit. Il fournit des informations, via un fichier spécifique, exploitables par le script d'interface graphique Tixwish associé.

Ce logiciel est distribué en libre accès à partir de la page WEB du projet.

5.6 Site WEB

Le site WEB du projet (

6 Résultats nouveaux

6.1 Analyse 2-microlocale

Participants : Kiran Kolwankar, Jacques Lévy Véhel, Stéphane Seuret.

Mots clés : exposant de Hölder, exposants 2-microlocaux, régularité ponctuelle.

Le point de départ de notre recherche est la théorie des espaces 2-microlocaux $C_{x_0}^{s,s'}$, développée dans un autre cadre par J.-M. Bony. Nous avons démontré une équivalence entre l'appartenance à certains espaces 2-microlocaux $C_{x_0}^{s,s'}$ et la propriété suivante :

$$\forall x, y, |x-x_0| < \delta, |y-x_0| < \delta, |f(x)-f(y)| \leq C|x-y|^{s+s'}(|x-y|+|x-x_0|)^{-\frac{s'}{2}}(|x-y|+|y-x_0|)^{-\frac{s'}{2}}$$

Cette nouvelle caractérisation a l'avantage d'être purement temporelle. En particulier, elle nous a permis de proposer des algorithmes pour l'estimation des frontières 2-microlocales et des exposants de Hölder. Des tests numériques montrent qu'une précision raisonnable est atteinte.

Une des principales applications sera l'étude du trafic de données dans les réseaux. En effet, les courbes de trafic, étant très irrégulières, sont délicates à étudier. Notre algorithme permettra de comparer les diverses courbes, le but étant l'estimation de l'état du réseau et la détection et la reconnaissance d'éventuels problèmes de trafic.

6.2 Etude du Mouvement Brownien Multifractionnaire Généralisé

Mots clés : mouvement brownien multifractionnaire, processus localement autosimilaire.

Participants : Antoine Ayache, Jacques Lévy Véhel.

En collaboration avec Serge Cohen (Université de Versailles-St-Quentin en Yvelines).

Résumé : *Le Mouvement Brownien Multifractionnaire (MBM) est un processus gaussien continu qui généralise le Mouvement Brownien Fractionnaire de Mandelbrot et Van Ness. La régularité du MBM peut être prescrite mais elle doit varier continûment : lorque $H(t)$ est une fonction Hölderienne à valeurs dans $[a, b] \subset]0, 1[$, on peut construire un MBM dont l'exposant de régularité ponctuel en tout point t_0 est égal à $H(t_0)$ (p.s.). Le MBM Généralisé (MBMG) est un processus gaussien continu, qui étend le MBM, dont la régularité peut être prescrite de façon à varier brusquement.*

Le Mouvement Brownien Multifractionnaire Généralisé (MBMG) est le processus gaussien centré et continu défini par

$$X(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \int_{D_n} \frac{e^{it\xi} - 1}{|\xi|^{H_n(t)+1/2}} dW(\xi), \tag{1}$$

où

- $D_0 = \{\xi, \quad |\xi| < 1\}$ et $D_n = \{\xi, \quad \lambda^{n-1} < |\xi| < \lambda^n\}$ pour $n \geq 1$ (le réel $\lambda > 1$ étant fixé).

- $(H_n(t))$ est une suite de fonctions Hölderiennes à valeurs dans $[a,b] \subset]0,1[$ vérifiant certaines conditions techniques.

En tout point t_0 l'exposant de régularité ponctuel du MBMG est $\liminf_{n \longrightarrow \infty} H_n(t_0)$, et peut donc varier de manière très irrégulière : on peut ainsi atteindre toute la classe des fonctions de Hölder admissibles, i.e. toutes les limites inférieurs de fonctions continues.

Nous nous intéressons maintenant à l'estimation de $H(t)$ dans le cas où elle est irrégulière.

6.3 Intégration-stochastique

Processus Fractals, Intégration stochastique, Équations différentielles stochastiques et instruments Financiers

Mots clés : mouvement brownien multifractionnaire, intégrale stochastique, marché financier, volatilité.

Participants : Jacques Lévy Véhel, Moustapha Ndoye.

En collaboration avec Agnès Sulem (INRIA Rocquencourt).

Résumé : *L'étude théorique du mouvement brownien multifractionnaire est motivée par les problèmes en mathématiques financières : données financières non stationnaires, structure fractale du marché. Des informations essentielles sont contenues dans la manière dont les instruments financiers évoluent. Cette notion peut être formalisée par les équations différentielles stochastiques relatives au mouvement brownien multifractionnaire.*

Après avoir introduit l'intégrale stochastique par rapport au mouvement brownien multifractionnaire, nous avons établi le théorème de Fubini et étudié les équations différentielles stochastiques relatives au mbm de la forme

$$dX(s) = b(s, X(s))ds + \sigma(s)d\mathcal{B}_s^{\mathcal{H}(s)} \tag{2}$$

où $\left(\mathcal{B}_s^{\mathcal{H}(s)}\right)_{s \geq 0}$ est un mouvement brownien multifractionnaire avec une fonction $\mathcal{H}$ à valeurs dans $]\frac{1}{2}, 1[$.

L'existence et l'unicité de (2) sont ainsi obtenues et un schéma numérique établi. Nous avons étudié la stabilité des équations différentielles stochastiques multifractionnaires. Ainsi, si X_1 et X_2 sont deux diffusions browniennes multifractionnaires engendrées par le même mouvement brownien directeur, associées respectivement aux fonctions $\mathcal{H}_1$ et $\mathcal{H}_2$,

$$X_1(t) = X_1(0) + \int_0^t b(s, X_1(s))ds + \int_0^t \sigma(s)d\mathcal{B}^{\mathcal{H}_1(s)}(s) \tag{3}$$

$$X_2(t) = X_2(0) + \int_0^t b(s, X_2(s))ds + \int_0^t \sigma(s)d\mathcal{B}^{\mathcal{H}_2(s)}(s) \tag{4}$$

Alors,

$$\sup_{t\in[0,T]} E\left(|X_1(t)-X_2(t)|^2\right) \leq k\left(E[(X_1(0)-X_2(0))^2] + \|\sigma\|_\infty \sup_{t\in[0,T]} |\mathcal{H}_1(t)-\mathcal{H}_2(t)|^2\right) e^{2T^2K^2}$$

Le but que se fixe maintenant notre étude est de modéliser certains cours financiers, d'évaluer les prix des options (pricing d'option) et de faire la gestion de portefeuille.

6.4 Signaux autosimilaires à mémoire longue : approche système

Participant : Michel Guglielmi.

Nous nous sommes intéressés à des modèles dynamiques de signaux ayant des caractéristiques de mémoire longue et/ou d'autosimilarité. Ces modèles dynamiques restent linéaires mais leur coefficients sont non stationnaires et en $1/t$. Les travaux menés ont essentiellement porté sur l'analyse, la synthèse et l'estimation paramétrique. L'approche choisie consiste en une modélisation par équation d'état à coefficients en $1/t$, la dimension de l'équation rendant compte de la complexité du signal généré. L'algèbre des systèmes linéaires non stationnaires permet d'obtenir l'équation d'entrée-sortie. Les propriétés du système (autosimilarité, longue mémoire) [16] sont mises en évidence. En ce qui concerne la synthèse, le problème de l'échantillonnage d'un tel système a été abordé. En effet, la forte non stationnarité des coefficients rend inadapté les schémas classiques de discrétisation. Un échantillonnage optimal est nécessairement "irrégulier" mais, eu égard aux problèmes qu'il peut poser, un échantillonnage régulier peut être satisfaisant. Enfin, nous avons développé un algorithme d'estimation paramétrique fondé sur la méthode du maximum de vraisemblance, tant dans sa version globale que récurrente. Tous les résultats ont été validés en simulation. Sur le plan des applications, nous sommes impliqués dans le projet isolation vibratoire du GDR-PRC automatique (co-responsable Alain Oustaloup) dans lequel nous nous sommes plus particulièrement consacrés à l'analyse et la modélisation fractale du revêtement de la route. Nous prévoyons de continuer à utiliser certains des modèles ci-dessus pour l'analyse de signaux tels que la rugosité de surface usinée ou celle de l'uni routier, pour lesquels des comportements de type "fractal" ont été mis évidence (en collaboration avec le LCPC).

6.5 Modélisation fine du trafic Internet

Participants : Jacques Lévy Véhel, Biplab Sikdar.

En collaboration avec D. Koffman (ENST) et P. Nain (INRIA Sophia).

Dans le cadre de l'ARC Epsilon, un réseau de 8 PC a éte mis en place, sur lequel on dispose d'un contrôle complet. Grâce au logiciel WAGON, développé dans le projet MISTRAL, on peut générer un trafic prescrit dans le réseau. Nous avons défini une série d'expériences qui nous ont permis de comprendre quelles sont les conditions qui donnent naissance à la fractalité du trafic, aussi bien en terme de longue dépendance que de multifractalité. Nous avons ainsi mis en évidence deux mécanismes principaux. Le premier est dû à la topologie du réseau : nous avons vérifié que, plus le nombre de niveaux hiérarchiques dans le réseau est grand, plus le caractère multifractal est prononcé. Sur cette base, nous avons proposé un modèle multifractal de trafic fondé sur une cascade multiplicative. Le deuxième mécanisme est plus inattendu, puisque nous avons trouvé que, contrairement à une opinion couramment répandue, la mulfractalité peut apparaître en l'absence de tout mécanisme de cascade : ceci semble dû, dans certaines configurations, directement au mécanisme de contrôle de TCP. Nous étudions à l'heure actuelle cette voie pour en déduire de nouveaux modèles de trafic.

6.6 Débruitage multifractal de signaux

Participants : Pierrick Legrand, Jacques Lévy Véhel, Evelyne Lutton.

L'année dernière, nous avions résolu le problème suivant : à partir d'un signal échantillonné $X = X_1, \ \ldots \ X_n$, dont la régularité estimée par régression des coefficients d'ondelettes est $\alpha = \alpha_1, \ \ldots \ \alpha_n$, trouver le signal Y "débruité" dans le sens suivant : Y est le signal (discret) dont la régularité estimée est prescrite et égale à $\beta = \alpha + \delta$, où δ est connu, et qui est le plus proche de X au sens de L^2.

La solution consiste à manipuler de façon globale les coefficients d'ondelettes de X. Nous avons implémenté la méthode en 1D et 2D. Sur certaines images radar, cet algorithme semble surpasser la plupart des techniques classiques.

Cette année, nous avons étudié les aspects théoriques de notre méthode. Nous avons en particulier montré que, sous l'hypothèse d'un bruit additif Gaussien, notre estimateur est asymptotiquement minimax.

D'autre part, nous avons pu proposer une solution plus générale au problème de l'augmentation de la régularité locale en renonçant à chercher une forme analytique et en recourant à une technique d'optimisation par algorithme évolutionnaire. Cette approche améliore sensiblement les résultats numériques (figure 1).

6.7 MarkBench

Mots clés : watermarking, spectres multifractals.

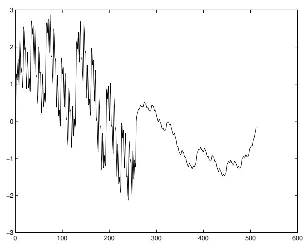
Participants : Evelyne Lutton, Frédéric Raynal.

En collaboration avec Pascale Charpin, Daniel Augot et Matthieu Brunet (projet Codes), Jana Dittmann et Martin Steinbach (Université de Darmstadt), Caroline Fontaine (Université de Lille) et Fabien Petitcolas (Microsoft).

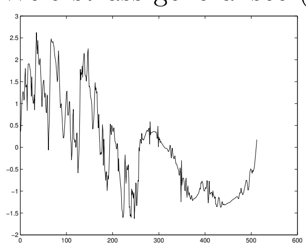
Glossaire :

Watermarking technique de marquage de données électroniques ayant pour but la protection des droits de propriété de ces données

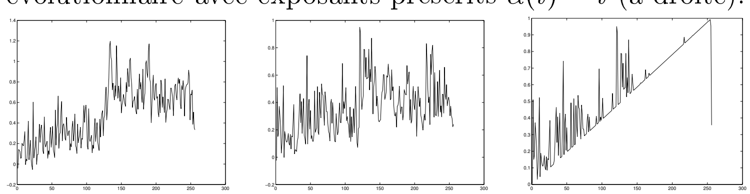
Nous étudions la mise en place d'un protocole expérimental pour les méthodes de marquages. En effet, les résultats présentés dans la littérature traitant du tatouage ne permettent que rarement une appréciation exacte des méthodes : les techniques proposées ne sont usuellement testées que sur des sous-ensembles très réduit d'images et d'attaques. Aucune standardisation des tests n'a actuellement émergé, rendant ainsi impossible tout comparaison entre méthodes de marquage.



Fonction de Weierstrass généralisée (à gauche) et version bruitée (à droite).



Débruitage à base de seuillage sur les ondelettes (à gauche) et à l'aide de la méthode évolutionnaire avec exposants prescrits $\alpha(t) = t$ (à droite).



Coefficients de Hölder estimés de la fonction initiale (à gauche), de la fonction bruitée (au milieu) et de la fonction reconstruite (à droite).

FIG. 1 – *Résultats sur une fonction de Weierstrass généralisée d'exposant* $\alpha(t) = t$.

L'ambition du groupe de travail `MarkBench` est de proposer à la communauté scientifique un logiciel de test, fondé sur `StirMark`, afin :

- d'automatiser la procédure d'évaluation (adaptée en fonction du type de marquage) ;
- d'évaluer des performances relativement à la force des attaques ;
- d'évaluer des taux de faux positifs et de faux négatifs.

Ce logiciel, est développé sous licence *opensource* pour garantir son intégrité. La partie permettant les attaques/modifications est achevée, celle concernant l'évaluation est en cours de développement. La mise en place de ce système nécessite encore quelques études, notamment pour quantifier la dégradation visuelle d'une image.

6.8 Watermarking à base d'ondelettes

Participants : Jacques Lévy Véhel, Anne Manoury.

Mots clés : watermarking, paquet d'ondelettes.

Nous avons mis au point une nouvelle technique de watermarking fondée sur une perturbation de la décomposition en paquets d'ondelettes de l'image. Le principe de la méthode est d'implanter la marque de copyright de façon virtuelle dans une sous base de l'image hôte, cette sous base dépendant d'une clé privée. La détection du watermark par son propriétaire est immédiate et ne nécessite pas la présence de l'image originale. Cette année, nous avons optimisée les paramètres de la méthode de façon à assurer la meilleure robustesse aux attaques de type "Stirmark". Nous nous sommes aussi penchés sur le problème de la non-invariance par translation inhérente à l'utilisation de paquets d'ondelettes.

6.9 Optimisation topologique de formes par algorithme évolutionnaire : étude d'une représentation par IFS

Mots clés : programmation génétique, IFS, problème inverse.

Participants : Hatem Hamda, Evelyne Lutton.

En collaboration avec Marc Schoenauer (CMAPX).

Nous étudions l'emploi d'algorithmes évolutionnaires pour l'optimisation topologique de formes : il s'agit de trouver la forme optimale d'une structure de telle façon que son comportement mécanique réponde à certaines contraintes (dans le cas présent un déplacement maximal pour une charge donnée). Le critère d'optimalité usuel est le poids de la structure. Des résultats obtenus il y a quelques années montraient la faisabilité de l'approche évolutionnaire, mais étaient limités par le fait que la complexité de l'espace de recherche était liée à celle du maillage utilisé lors de la simulation numérique. Des approches ont ensuite été développées avec succès au CMAPX à l'aide de représentations compactes et non structurées dont la complexité n'est pas fixe mais est ajustée par l'algorithme lui-même. Dans ce cadre, nous avons étudié l'emploi de représentations fractales de formes, à base d'IFS mixtes. L'algorithme évolutionnaire cherche donc à optimiser un ensemble de fonctions dont l'attracteur doit avoir des propriétés mécaniques données [17]. Les premiers tests ont été effectués sur un problème-test classique, la plaque en porte-à-faux : une plaque, fixée sur son côté gauche, subit une force verticale au milieu son arête droite. On doit en optimiser la structure topologique de la plaque de façon à ce qu'elle se déforme le moins possible.

6.10 Théorie markovienne de la convergence des Algorithmes Evolutionnaires

Mots clés : analyse markovienne, algorithme évolutionnaire, temps de convergence.

Participants : Yann Landrin-Schweitzer, Evelyne Lutton.

Nous avions obtenu en 1999 des résultats théoriques ouvrant la voie à une estimation plus précise des comportements de convergences pour des algorithmes évolutionnaires vérifiant certaines classes de propriétés. Nous avions prouvé en particulier que sous condition d'existence d'un coefficicient de normalisation des moments exponentiels associés aux distributions d'un modèle d'algorithme évolutionnaire, il est possible de fournir une borne sur les temps de séjour de cet algorithme.

Afin de tester la validité expérimentale de ces résultats théoriques, nous avons développé un algorithme évolutionnaire simplifié reprenant les caractéristiques du modèle, et appliqué les caractérisations mathématiques obtenues.

Comme le laissait présager la complexité des résultats fournis par l'analyse mathématique, il s'est avéré difficile d'interpréter les résultats expérimentaux sans étude théorique complémentaire. En revanche, d'intéressantes caractérisations de la convergence, prenant appui sur les valeurs numériques essentielles du modèle théorique (les moments exponentiels), sont apparues lors de l'analyse de ces résultats, ouvrant la perspective à une détection de la convergence (ou non) dès les premières générations.

6.11 AE interactifs appliqués au text-mining

Mots clés : text mining, algorithmes évolutionnaires..

Participants : Yann Landrin-Schweitzer, Evelyne Lutton.

En collaboration avec Thérèse Vachon de Novartis Pharma et Pierre Parizot d'IBM.

La recherche par mots-clés dans des bases documentaires souffre souvent de l'impossibilité de gérer la pertinence des mots-clés détectés vis-à-vis du contexte. On tente souvent de résoudre ce problème par l'utilisation de thesaurii, ou dictionnaire de synonymes, permettant d'identifier des "sens" par la détection de mots de signification connexe. Cependant, cette méthode dépend de la pertinence de ces thésaurii, et offre peu de souplesse à l'utilisateur. Nous tentons de personnaliser et d'affiner l'utilisation de ces thesaurii via des "profils de recherche" évolutifs, individuels ou génériques.

Pour cela, nous démarrons une étude fondée sur l'emploi d'algorithmes évolutionnaires interactifs se contentant d'un flux d'infomations pauvre.

6.12 Simulations de Monte Carlo parallèles compétitives

Mots clés : simulation moléculaire, simulation de Monte Carlo, évolution artificielle.

Participants : Benoît Leblanc, Evelyne Lutton.

En collaboration avec l'IFP, Groupe IA/Statistique (Bertrand Braunschweig) et Groupe Modélisation Moléculaire (Hervé Toulhoat), dans le cadre d'une convention CIFRE.

Glossaire :

Simulation moléculaire simulation du comportement d'un ensemble de particules en interaction représentant un système physico-chimique.

Simulation de Monte Carlo Echantillonnage aléatoire de l'espace des configurations d'un système thermodynamique fondé sur la contruction d'une chaine de Markov ayant pour distribution limite la distribution appropriée pour le système considéré.

Résumé : *Nous avons développé une approche de la simulation moléculaire fondée sur un algorithme évolutionnaire. L'application visée est la simulation de polymères amorphes et le but recherché est d'améliorer le temps de mélange du système simulé, c'est-à-dire d'obtenir plus rapidement des résultats valides de l'espace d'état.*

Notre approche est de considérer des simulations parallèles, c'est-à-dire plusieurs simulations du même système. En conséquence, si l'on cherche à obtenir un échantillon de l'espace des phases associé, tous les états parcourus par les différentes simulations contribuent à l'élaboration de l'échantillon. Ceci permet, outre de pouvoir utiliser des architectures parallèles, de comparer différents modèles distribués. Plus spécifiquement notre but est d'évaluer l'efficacité des algorithmes d'EA pour le réglage des paramètres de Monte Carlo, habituellement réglés empiriquement. Par exemple, dans le cas où plusieurs mouvements de Monte Carlo sont possibles, leurs proportions relatives sont des paramètres de la simulation (et non du système lui-même, car ils n'affectent pas la distribution limite), et ont un effet sur l'efficacité de la simulation. Il est alors nécessaire de définir un critère effectif, qui ne pourra être tenu pour universel, d'autres pouvant lui être préférés. Dans notre cas nous utilisons des critères d'autocorrélation et de déplacement moyen des molécules.

Afin de pouvoir effectuer une comparaison de performances, nous avons besoin d'un algorithme de référence. Nous considérons comme référence n instances d'une simulation classique partant de n états initiaux différents et utilisant les mêmes paramètres de Monte Carlo réglés a priori comme on le ferait pour une simulation unique, c'est-à-dire sans donner de préférence arbitraire à tel ou tel mouvement. Les résultats obtenus montrent une amélioration significative dans nombre de configurations, l'algorithme d'EA permettant de trouver rapidement des paramètres efficaces pour la simulation.

6.13 Audio2midi

Participants : Alexandre Abbes, Jacques Lévy Véhel, Olivier Meunier.

Nous nous posons le problème suivant : comment, à partir d'un fichier numérique contenant l'enregistrement d'un morceau de musique remonter aux partitions des divers instruments ?

Plus précisément, nous désirons obtenir le code MIDI correspondant, qui décrit, en plus de la position temporelle et fréquentielle de chaque note jouée, l'instrument concerné et sa "vélocité" (c'est-à-dire essentiellement l'intensité de l'attaque). Ce problème est trop difficile pour être résolu en toute généralité, et nous faisons certaines restrictions sur le type d'instruments et de musique jouée. Nous avons implémenté diverses méthodes qui partent d'une analyse temps-fréquence du signal original (transformée de Fourier à court terme ou de Wigner-Ville) et qui appliquent ensuite des techniques classiques de reconnaissance des formes que nous avons adaptées à notre cadre. Cette année, notre effort a porté sur l'écriture d'un code rapide et qui offre une interface conviviale. Nous avons aussi identifié les paramètres clés que l'utilisateur doit régler.

6.14 Détection de contours par fourmi artificielle à base de programmation génétique

Participants : Pierre Collet, Jean Louchet, Evelyne Lutton.

Le problème de la navigation d'une fourmi artificielle dans un environnement binaire, usuellement employé en vie artificielle en tant que problème-test, peut être reformulé pour devenir "utile" en traitement d'images. Le problème de base de la fourmi artificielle consiste à faire se déplacer un animat (artificial animal) afin de collecter en un temps minimal de la "nourriture" distribuée le long d'un chemin bidimensionnel irrégulier représenté sous forme d'une image binaire.

Nous proposons une extension de cette méthodologie à la programmation de tâches de traitement d'images de bas niveau [21]. En "plaçant" la fourmi sur une image en niveaux de gris, en lui donnant des capteurs qui lui permettent de percevoir des niveaux de gris dans son environnement immédiat, et en lui permettant de se déplacer d'un pixel à chaque pas, il est possible de faire évoluer le "génome" gérant son comportement (modélisé comme un "arbre" contenant des instructions et des informations provenant de ses capteurs et actuateurs).

Selon que la fonction objectif intègre ou non une notion de "rendement" (nombre de pixels de contours détectés rapportés à la longueur de parcours), les animats développent, soit un comportement de balayage systématique, soit une stratégie de poursuite de contours, parfois moins exhaustive mais toujours plus efficace. Cette méthode a été implémentée à l'aide du language EASEA (version 0.6) de spécification d'agorithmes évolutionnaires.

6.15 Analyse d'images microscopiques

Participants : Xavier Godivier, Jacques Lévy Véhel.

Dans le cadre d'un contrat AQS, nous avons étudié des images microscopiques de matières grasses du lait utilisées dans la fabrication de beurre. Le but était de corréler des paramètres issus d'une analyse d'image avec des quantités physiques liées à la rhéologie. Nous avons pu mettre en évidence l'existence de telles corrélations dans le cas de paramètres tels que les matrices de co-occurrence, la dimension de régularisation ou la lacunarité. Nous démarrons actuellement une étude du même genre sur des images de céréales avec l'INRA de Nantes.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

L'équipe a des contrats avec :

- l'IFP : un contrat CIFRE avec l'IFP est en cours et finance la thèse de Benoît Leblanc, dont le sujet concerne l'emploi d'algorithmes génétiques en simulation moléculaire.
- le MENRT : étude de l'influence des facteurs thermiques et mécaniques sur l'organisation macroscopique des cristaux de matières grasses du lait recombinés.
- NOVARTIS PHARMA sur le text mining par algorithmes évolutionnaires interactifs, financement de la thèse de Yann Landrin-Schweitzer.
- DASSAULT AVIATION sur la modélisation de terrain à base de mBm (thèse de Erick Herbin).

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions nationales

Le projet a des collaborations avec :

- l'IrCcyn, Institut de Recherche en Cybernétique et communications de Nantes, (J. Lévy Véhel est détaché dans ce laboratoire) depuis 1996 sur l'étude des bruits en $1/f$, et depuis 1998 sur l'étude du Watermarking.
- l'université Paris XII-Val de Marne (S. Jaffard) sur les ondelettes et la 2–microlocalisation,
- l'Université d'Orléans (M. Pontier) sur l'extension bidimensionnelle du mBm.
- l'IFP Groupe IA/Statistique (Bertrand Braunschweig) et Groupe Modélisation Moléculaire (Hervé Toulhoat), sur l'emploi d'algorithmes évolutionnaires en simulation moléculaire.
- le projet CODES (Pascale Charpin, Daniel Augot et Matthieu Brunet), sur l'étude du watermarking.
- l'Université de Versailles Saint-Quentin (S. Cohen), l'Université de Clermont Ferrand (A. Benassi) et l'Université Paul Sabatier de Toulouse (A. Ayache) sur le mBm.
- l'Université de Clermont Ferrand (C. Tricot) sur l'analyse multifractale.
- l'équipe Evolution Artificielle et Apprentissage du CMAPX, sur l'étude du problème inverse pour les IFS polaires par programmation génétique et son application en optimisation de formes en mécanique.

Au sein de l'INRIA, le projet participe à plusieurs actions de recherche coopératives :

- sur 1999-2000 en ce qui concerne les applications des algorithmes évolutionnaires (EVO-Lab), et impliquant le projet SINUS de Sophia Antipolis, l'équipe EEAAX du CMAPX et l'équime AMI de l'ENSTA.

– sur 1999-2000 en modélisation fine du trafic Internet (ARC Epsilon dont le promoteur est P. Nain).

8.2 Actions européennes

Le projet est membre de EvoNet, le réseau d'excellence Européen consacré aux Méthodes d'Evolution Artificielle. L'ARC EVO-Lab est largement impliquée dans le développement du logiciel d'algorithmes évolutionnaires européen EO parrainé par EvoNet, et est chargée de l'aspect langage de spécification et interface graphique.

Evelyne Lutton, en tant que collaborateur extérieur de l'équipe EEAAX du CMAPX, participe au Projet européen DREAM (Distributed Resources Evolutionary Algorithm Machine).

9 Diffusion de résultats

9.1 Comités d'organisation

Jacques Lévy Véhel et Evelyne Lutton organisent la conférence "Fractals in Engineering" qui aura lieu fin 2001 a Rome en Italie.

Pierre Collet et Evelyne Lutton sont membre du comité d'organisation du congrès "Evolution Artificielle '2001", qui aura lieu à Montceau en novembre 2001.

Evelyne Lutton est secrétaire de l'Association pour l'Evolution Artificielle, depuis Décembre 1994. Elle a organisé, en tant que "local chair" la conférence PPSN 2000 qui a eu lieu du 16 au 20 Septembre 2000 à Paris.

9.2 Comités de programme

Jacques Lévy Véhel est éditeur associé du journal "FRACTALS". Il a été relecteur pour les revues suivantes : ACHA, Fractals, TS.

Evelyne Lutton a été relectrice pour les conférences ACIVS'00, et pour les revue IEEE Transactions on Evolutionary Computation, IEEE Signal Processing Letters, Genetic Programming and Evolvable Machine, et IEEE Computer Graphics and Applications. Elle a été membre du comité scientifique du workshop la conférence FEA2000, du comité de programme des conférences GECCO'99, CEC'99. Elle a été membre du comité de programme des conférences EUROGP 2000, GECCO 2000, ICES 2000, et du workshop EvoNet, EVO-IASP 2000. Elle participe aux comités de programme suivants : EUROGP 2001, GECCO 2001, CEC2001, EVO-IASP2001.

Evelyne Lutton est membre du Comité de rédaction de la revue Technique et Science Informatiques (TSI). Jacques Lévy Véhel et Evelyne Lutton sont coordonateurs du numéro spécial consacré aux fractales de cette revue qui paraîtra au printemps 2001.

9.3 Groupes de travail

Evelyne Lutton est membre du comité de pilotage des Journées Evolutionnaires Trimestrielles.

9.4 Séminaires

Le projet organise des conférences en commun avec les projets HIPERCOM, METALAU et MEVAL (un exposé par semaine, le jeudi).

9.5 Enseignement universitaire

Jacques Lévy Véhel : module “Géométrie Fractale” du DEA Algorithme de Paris VI (10 h) ; module “Ondelettes et Fractales” du DEA AIA de l'Ecole Centrale de Nantes (10 h).

Frédéric Raynal : chargé de TD en 2ème année de DEUG MASS à Paris IX - Dauphine en informatique (60h).

9.6 Autres enseignements

Jacques Lévy Véhel :

- Chargé de cours sur les Fractales à l'Ecole Centrale de Paris (6 h).
- Chargé de cours sur les fractales et les ondelettes à l'ENSTA (9 h).
- Chargé de cours sur les Fractales et l'analyse Temps Echelle à l'Ecole Centrale de Nantes (15 h).
- Chargé de cours sur les Fractales à l'ESIEA (15 h).
- Responsable d'un module sur l'analyse fractale à l'INT (6 h).

Evelyne Lutton :

- Responsable du module évolution artificielle à l'ENSTA (21 h).
- Chargée de cours sur les fractales et les ondelettes à l'ENSTA (9 h).
- Chargée de cours sur les fractales à l'Ecole Centrale de Paris (18 h).
- Assistante du cours sur les Fractales à l'ESIEA (3 h).

9.7 Jurys de thèse

Jacques Lévy Véhel a été rapporteur des thèses de P. Bas (Univ. de Grenoble), G. Robert (Univ. de Grenoble), J. Li (Univ. de Montréal) et S. Léger (Univ. d'Orléans).

9.8 Conférences invitées

Jacques Lévy Véhel a été conférencier invité au congrès de la société canadienne de mathématiques appliquées et à celui de la société argentine de mathématiques. Il a fait des conférences à Nortel (Cambridge), Microsoft Research (Cambridge), à l'université de Lille et à l'ENSAE.

9.9 Divers

Jacques Lévy Véhel est membre du bureau du groupe MAS de la SMAI et membre des commissions de spécialistes de Nantes et de Caen.

Jacques Lévy Véhel et Evelyne Lutton ont participé à une émission sur la compression fractale sur "la 5".

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

[1] K. Daoudi, J. Lévy Véhel, Y. Meyer, «Construction of continuous functions with prescribed local regularity», *Journal of Constructive Approximation 014*, 03, 1998, p. 349–385.

[2] M. Dekking, J. Lévy Véhel, E. Lutton, C. E. Tricot, *Fractals: Theory and Applications in Engineering*, Springer Verlag, 1999, ISBN 1-85233-163-1.

[3] B. Guiheneuf, S. Jaffard, J. Lévy Véhel, «Two results concerning chirps and 2-microlocal exponents prescription», *Applied and Computational Harmonic Analysis 5*, 1998, p. 487–492.

[4] J. Lévy Véhel, E. Lutton, C. Tricot, *Fractals in Engineering: From Theory to Industrial Applications*, Springer Verlag, 1997, J. Lévy Véhel, E. Lutton and C. Tricot (Eds), ISBN 3-540-76182-9.

[5] J. Lévy Véhel, R. Vojak, «Multifractal Analysis of Choquet Capacities : Preliminary Results», *Advances in Applied Mathematics 20*, January 1998, p. 1–43.

[6] J. Lévy Véhel, «Fractal Approaches in Signal Processing», *in : Fractal Geometry and Analysis*, H. P. C.J.G. Evertsz et R. Voss (éditeurs), World Scientific, 1996.

[7] J. Lévy Véhel, « Introduction to the multifractal analysis of images », *in : Fractal Image Encoding and Analysis*, Y. Fisher (éditeur), Springer Verlag, 1997.

[8] E. Lutton, J. Lévy Véhel, «Hölder functions and Deception of Genetic Algorithms», *IEEE Transactions on Evolutionary computing 2*, 2, July 1998.

[9] E. Lutton, *Genetic Algorithms and Fractals - Algorithmes Génétiques et Fractales*, Habilitation à diriger des recherches, Université Paris XI Orsay, 11 Février 1999, Spécialité Informatique.

[10] R. Peltier, J. Lévy Véhel, «Multifractional Brownian Motion», *rapport de recherche n° 2645*, INRIA, 1995, `http://www.inria.fr/rrrt/rr-2645.html`.

[11] C. Tricot, *Courbes et Dimension Fractale*, Springer Verlag, 1997.

Livres et monographies

[12] M. Schoenauer, K. Deb, G. Rudolph, X. Yao, E. Lutton, J. J. Merelo, H.-P. E. Schwefel, *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VI 6th International Conference, Proceedings*, Lecture Notes in Computer Science 1917, Springer Verlag, Paris, France, September 16-20 2000.

Articles et chapitres de livre

[13] L. Belkacem, J. Lévy Véhel, C. Walter, «CAPM, Risk and Portfolio Selection in "-Stable Markets"», *FRACTALS 8*, 1, March 2000, p. 99–116.

[14] P. Collet, E. Lutton, F. Raynal, M. Schoenauer, «Polar IFS + Parisian Genetic Programming = Efficient IFS Inverse Problem Solving», *Genetic Programming and Evolvable Machines Journal 1*, Issue 4, October 2000, p. 339–361.

[15] J. Falconer, J. Lévy Véhel, «Horizons of fractional Brownian Surfaces», *Proc. Royal Math. Soc. A, 456*, 2000, p. 2153–2178.

[16] M. Guglielmi, E. Noret, «Une classe des systèmes auto-similaires et à mémoire longue», *Technique et Sciences Informatiques*, 2000, à paraître.

[17] H. Hamda, F. Jouve, E. Lutton, M. Schoenauer, M. Sebag, «Unstructured Representations in Evolutionary Topological Optimum Design», *Accepted to IJAI, The International Journal of Artificial Intelligence, Neural Networks, and Complex Problem-Solving Technologies, Special Issue on Creative Evolutionary Systems, Guest editors: Peter J. Bentley and Dave W. Corne*, 2000.

[18] J. Lévy Véhel, «Analyse Fractale : une nouvelle génération d'outils pour le Traitement du Signal», *TSI*, janvier 2000.

Communications à des congrès, colloques, etc.

[19] A. Ayache, S. Cohen, J. Lévy Véhel, «The covariance structure of multifractional Brownian motion, with application to long range dependence», *in : ICASSP*, June 2000.

[20] A. Ayache, J. Lévy Véhel, «The Generalized Multifractional Brownian Motion», *in : Statistical Inference for Stochastic Processes*, *3(1/2)*, p. 7–18, 2000.

[21] E. Bolis, C. Zerbi, P. Collet, J. Louchet, E. Lutton, «A GP Artificial Ant for image processing: preliminary experiments with EASEA», *in : EUROGP 2001*, accepted for publication.

[22] P. Collet, E. Lutton, M. Schoenauer, J. Louchet, «Take it EASEA», *in : PPSN VI*, S. Verlag (éditeur), *LNCS 1917*, Paris, France, September 16-20 2000.

[23] H. Hamda, F. Jouve, E. Lutton, M. Schoenauer, M. Sebag, «Représentations non structurées en optimisation topologique de formes par algorithmes évolutionnaires», *in : ESAIM, 32ème congrès d'analyse numérique, CANUM2000*, 2000.

[24] Y. Landrin-Schweitzer, E. Lutton, «Perturbation theory for EAs: towards an estimation of convergence speed», *in : PPSN VI*, S. Verlag (éditeur), *LNCS 1917*, Paris, France, September 16-20 2000.

[25] B. Leblanc, E. Lutton, B. Braunschweig, H. Toulhoat, «Improving molecular simulation: a meta optimisation of Monte Carlo parameters», *in : CEC 2001*, accepted for publication.

[26] J. Lévy Véhel, B. Guiheneuf, «Texture-based Video Indexing», *in : IASTED, International Conference Signal and Image Processing, Las Vegas, November*, 2000.

[27] J. Lévy Véhel, E. Lutton, «Evolutionary signal enhancement based on Hölder regularity analysis», *in : EVO-IASP 2001 Workshop*, accepted for publication.

[28] J. Lévy Véhel, A. Manoury, « Wavelet packet based digital watermarking », *in: ICPR*, September 2000.