

Projet FRACTALES

*Approches Fractales pour l'Analyse et la Modélisation des
Signaux*

Rocquencourt

THÈME 4A



*R*apport
*d'**A*ctivité

2001

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	5
3.1	Régularité ponctuelle	5
3.2	Analyse multifractale	6
3.3	Processus fractals	7
3.4	Algorithmes génétiques, algorithmes évolutionnaires	8
3.5	Analyse temps fréquence/temps échelle	9
4	Domaines d'applications	10
4.1	Trafic sur Internet	10
4.2	Problèmes inverses	11
4.3	Traitement d'images	12
4.4	Cours financiers	13
4.5	Audio2midi	14
5	Logiciels	14
5.1	FRACLAB	14
5.2	EASEA : langage de spécification d'algorithmes évolutionnaires	15
5.3	Arthur/Excalibur	16
5.4	XAlpha	16
5.5	ALGON : boîte à outils d'optimisation par algorithmes génétiques	16
5.6	Site WEB	16
6	Résultats nouveaux	17
6.1	Analyse 2-microlocale	17
6.2	Etude du Mouvement Brownien Multifractionnaire Généralisé	17
6.3	Mouvement Brownien Multifractionnaire composé	18
6.4	Intégration-stochastique	19
6.5	Processus à plusieurs paramètres	20
6.6	Modélisation stochastique de terrain	20
6.7	Signaux autosimilaires à mémoire longue : approche système	21
6.8	Débruitage multifractal de signaux	21
6.9	StirMark Benchmark	22
6.10	Liens entre cryptographie et dissimulation d'information	22
6.11	Watermarking à base d'ondelettes	23
6.12	AE interactifs appliqués au text-mining	23
6.13	Simulations de Monte Carlo parallèles compétitives	24
6.14	Surcompression d'images par algorithmes évolutionnaires	25
6.15	Vision stéréo par approche parisienne : algorithme des mouches	25
6.16	ArtiE-Fract	26

6.17	Résolution automatique d'un problème de planification de trajet en zone urbaine à l'aide d'EASEA	27
6.18	Comparaisons de deux bibliothèques évolutionnaires à l'aide de EASEA	29
6.19	Audio2midi	30
6.20	Analyse de l'uni routier	30
6.21	Fractales et Chaos	31
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	31
8	Actions régionales, nationales et internationales	31
8.1	Actions nationales	31
8.2	Actions européennes	32
9	Diffusion de résultats	32
9.1	Comités d'organisation	32
9.2	Comités de programme	32
9.3	Groupes de travail	33
9.4	Séminaires	33
9.5	Enseignement universitaire	33
9.6	Autres enseignements	34
9.7	Jurys de thèse	34
9.8	Conférences invitées	34
9.9	Divers	35
10	Bibliographie	35

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Jacques Lévy Véhel [DR, Inria, en détachement CNRS jusqu'au 30/9/2001]

Responsable permanent

Evelyne Lutton [CR, Inria]

Assistante de projet

Nathalie Gaudechoux [en commun avec A3]

Personnel INRIA

Julien Barral [CR, depuis 01/09/2001]

Marc Schoenauer [DR, depuis 01/09/2001]

Ingénieurs Associés

Olivier Meunier [du 01/01/2001 au 31/12/2001]

Jonathan Chapuis [du 15/09/2001 au 31/12/2001]

Collaborateurs extérieurs

Antoine Ayache [UFR MIG, Lab. de Statistiques et de Probabilités, Toulouse]

Lotfi Belkacem [Institut Supérieur de Gestion, Tunisie]

Christophe Canus [Alcatel]

Pierre Collet [CMAP, Ecole Polytechnique]

Xavier Godivier [IrCyn, Nantes]

Michel Guglielmi [IrCyn-CNRS, Nantes]

Jean Louchet [ENSTA]

Ina Taralova [IrCyn, Nantes]

Claude Tricot [Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand]

Christian Walter [Coopers & Lybrand]

Doctorants

Amine Boumaza [boursier Egide/DGA, Université Paris 5]

Erick Herbin [Dassault Aviation, Université Paris 11]

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

Stéphane Lafon [Corps X-Telecom depuis Septembre 2001]

Benoît Leblanc [boursier CIFRE IFP, Université Paris 11]

Pierrick Legrand [boursier LCPC, IRCYN]

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

Moustapha Ndoye [boursier du gouvernement sénégalais, Université Paris 9]

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

Stéphane Seuret [Corps X-Telecom]

Stagiaires

Eric Berardo [du 05/03/01 au 31/08/01]

Jonathan Chapuis [du 01/02/01 au 31/06/01]

Samar Nehme [du 01/03/01 au 30/06/01]

Pierre Wydoodt [du 01/09/2001 au 31/10/2001, en commun avec le projet Eiffel]

2 Présentation et objectifs généraux

Mots clés : algorithme évolutionnaire, 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.

Une autre activité importante du projet concerne les algorithmes évolutionnaires, et leurs aspects « fractals » (optimisation de fonctions complexes, analyse de l'influence de l'irrégularité des fonctions optimisées, résolution de problèmes inverses, nouveaux algorithmes), et le développement du langage de spécification d'algorithmes évolutionnaires EASEA.

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 évolutionnaires, 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 le CMAP de l'école Polytechnique, l'Université de Toulouse, 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 DGA.

3 Fondements scientifiques

3.1 Régularité ponctuelle

Participants : 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 :

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

(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 :

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

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 Hölderienne 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 :

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

Une nouvelle caractérisation temporelle des espaces 2-microlocaux a été proposée. Ceci permet en particulier la mise au point de procédures d'estimation efficaces. Nous avons aussi développé un *formalisme 2-microlocal* par analogie au formalisme multifractal. Celui-ci permet de définir des *opérateurs 2-microlocaux* qui agissent de façon fine sur la régularité ponctuelle des fonctions.

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 Toulouse).

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 ($x(at) \stackrel{d}{=} a^H x(t)$, où $\stackrel{d}{=}$ 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 $\tau \rightarrow \infty$, $-1 < \beta < 0$). 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, algorithmes évolutionnaires

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

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 évolutionnaires (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 ces algorithmes.*

Les Algorithmes Génétiques (AG) et plus généralement les Algorithmes Evolutionnaires (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 (évolution Darwinienne), 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

[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 Algorithms*, 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.

système dynamique, où on a pu mettre en évidence un comportement de type « fractal » (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 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 : Michel Guglielmi, Jacques Lévy Véhel, Olivier 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-fréquence¹ les atomes d'analyse ainsi définis, avant d'évaluer le produit scalaire avec le signal analysé :

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

\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*

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

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

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 : $W_x(t, f) = \int x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-i2\pi f\tau} d\tau$, 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.

4 Domaines d'applications

4.1 Trafic sur Internet

Participants : Jacques Lévy Véhel, Stéphane Seuret.

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.

Nos recherches actuelles portent sur les causes possibles de multifractalité.

4.2 Problèmes inverses

Participants : Evelyne Lutton, Marc Schoenauer.

Mots clés : algorithme génétique, algorithme évolutionnaire, 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 pour 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 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

-
- [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.

le projet pour les IFS affines à l'aide d'AG, et dans le cas plus complexe des IFS mixtes et polaires 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 à des applications des AG :

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

[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, 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.

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.

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 : Pierrick Legrand, Jacques Lévy Véhel, Ina Taralova.

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 exécutable) 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/>

Nous avons mis en ligne la version 1.0. en Juin 2001. Depuis cette date, Fraclab a été téléchargé plus de 1500 fois. Quelques dizaines de laboratoires semblent l'utiliser régulièrement.

5.2 EASEA : langage de spécification d'algorithmes évolutionnaires

Participants : Pierre Collet, Jean Louchet, Evelyne Lutton, Marc Schoenauer.

Mots clés : algorithme évolutionnaire, optimisation stochastique.

EASEA (Easy Specification of Evolutionary Algorithms) est issu de l'action coopérative EVO-Lab, et a pour le but de simplifier l'écriture d'algorithmes évolutionnaires, notamment pour les scientifiques dont l'informatique n'est pas la spécialité. EASEA est un langage de spécification, qui permet de décrire un algorithme évolutionnaire de façon simple dans un fichier d'extension « .ez », qui est ensuite transformé par le compilateur EASEA en un autre fichier source utilisant une librairie évolutionnaire sous-jacente.

Toute l'algorithmique complexe qu'il est nécessaire de mettre en œuvre pour obtenir un algorithme évolutionnaire est insérée de façon transparente par le compilateur. L'utilisateur peut donc consacrer l'essentiel de son temps à la résolution de son problème, plutôt qu'à l'implémentation de l'algorithme.

La description d'un algorithme évolutionnaire devient alors très succincte (car réduite à l'essentiel) et l'indirection ajoutée par le compilateur fait qu'un source EASEA est recompilable sur n'importe quelle plateforme. La version actuelle du compilateur (sur UNIX et Windows) permet de créer :

- un source en C++ pour les bibliothèques GALib (bibliothèque assez ancienne, mais très largement utilisée) et EO (bibliothèque beaucoup plus moderne du projet Européen EVO-Net)
- plusieurs fichiers sources en JAVA pour la DREAM (Distributed Resource Evolutionary Algorithm Machine), projet européen d'algorithme évolutionnaire sur Internet.

Toujours dans l'idée de faciliter la communication entre utilisateurs, une version XML d'EASEA (EAsy Xml Evolutionary Algorithms) est actuellement en développement.

EASEA est maintenant un outil répandu, et sert actuellement

- de support d'enseignement (ENSTA, école Polytechnique, Université du Littoral, Université de Dijon, école Centrale, école des Ponts, CESTI Toulon, University of Massachusetts Dartmouth),
- en recherche et dans l'industrie, dans plusieurs laboratoires européens (projet SINUS, ENSTA, Laboratoire d'Informatique du Littoral, General Electric (France), Université d'Alger, University of Exeter (UK), Napier University (Ecosse), South-Bank University (Londres), Vrije University of Amsterdam, University of Dortmund, Granada University),
- de langage de programmation du projet européen DREAM.

Une interface graphique (qui est aussi l'interface graphique de DREAM) est en cours de développement de façon à simplifier encore la création de programmes évolutionnaires.

EASEAv0.6c est disponible sur <http://www-rocq.inria.fr/EASEA/>

5.3 Arthur/Excalibur

Arthur est un logiciel de segmentation d'images fondé sur l'analyse texturale. 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 texturaux (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 permettant de programmer des méthodes évolutionnaires d'optimisation simples, (alphabet de codage de taille quelconque, chromosomes de taille variable et sous forme vectorielle, différents choix d'opérateurs et de stratégies). Une interface graphique sous Tixwish permet des choix interactifs de paramètres et de méthodes ainsi qu'un suivi de la progression de l'algorithme. Les fonctions relatives au problème restent à programmer pour chaque application (principalement codage et fonction de « fitness » à maximiser).

Ce logiciel est distribué librement sur la page WEB du projet.

5.6 Site WEB

Le site WEB du projet <http://www-syntim.inria.fr/fractales/fractales-eng.html>, qui propose démonstrations, publications et logiciels, enregistre quotidiennement une grande quantité de connexions et est source de nombreux contacts avec des instituts étrangers.

Depuis sa mise en service, le nombre moyen de connexions (pages consultées) hebdomadaires est passé de 2 000 à 10 000. Le site FRACTALES pointe aussi sur les sites des ARC auxquelles a participé le projet :

- EVO-Lab

- EPSILON
- MATHFI

6 Résultats nouveaux

6.1 Analyse 2-microlocale

Participants : Jacques Lévy Véhel, Stéphane Seuret.

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

L'analyse de régularité locale consiste à calculer théoriquement ou à estimer la continuité d'un signal, d'une image, ou plus généralement d'une fonction f en chaque point x . Le principal outil utilisé pour mesurer cette régularité est l'exposant ponctuel d'Hölder, mais il est connu que ce dernier ne caractérise pas entièrement le comportement local d'une fonction autour d'un point. Nous développons donc d'autres outils, théoriques et algorithmiques, capables d'aider à une caractérisation plus fine de la régularité.

L'exposant local d'Hölder permet de compléter la description du comportement apportée par le simple exposant ponctuel. Nous avons étudié complètement la structure de ce deuxième exposant, et montré les relations d'inter-dépendance qui existent entre les exposants ponctuels et locaux.

L'analyse 2-microlocale, développée par J.M. Bony dans le début des années 1980, donne un nouveau cadre théorique pour notre étude, car elle généralise la notion d'exposants de régularité. Nous avons démontré qu'il existe une caractérisation temporelle des espaces 2-microlocaux $C_x^{s,s'}$. Cette nouvelle caractérisation a notamment permis de créer de nouveaux algorithmes d'estimation de régularité, plus précis et stables que les anciens.

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 Toulouse) et Albert Bénassi (Université de Clermont-Ferrand).

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 : lorsque $H(t)$ 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

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

où

- $D_0 = \{\xi, |\xi| < 1\}$ et $D_n = \{\xi, \lambda^{n-1} < |\xi| < \lambda^n\}$ 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 $\liminf_{n \rightarrow \infty} H_n(t_0)$, 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 inférieures de fonctions continues.

Nous avons résolu le problème de l'identification de la fonction $H(t)$ dans le cas où elle est une limite de fonction continue [14].

6.3 Mouvement Brownien Multifractionnaire composé

Processus, modèle financier, et évaluation d'options

Mots clés : mouvement brownien multifractionnaire composé, marché financier, volatilité, arbitrage, options..

Participant : Moustapha Ndoye.

En collaboration avec Fatima Ly Baro (CEREG, Université Paris Dauphine)

Résumé : *Nous étudions les propriétés d'un processus appelé mouvement brownien multifractionnaire composé qui est la combinaison linéaire d'un mouvement brownien et d'un mouvement brownien multifractionnaire indépendants. Nous en déduisons les opportunités d'arbitrage et l'évaluation du prix d'options d'achat dans un marché où les actifs sont engendrés par le mouvement brownien multifractionnaire composé.*

Nous étudions une combinaison linéaire simple de deux mouvements browniens indépendants dont l'un est multifractionnaire et l'autre standard (usuel). Cette combinaison est appelée mouvement brownien multifractionnaire composé, noté MmBm. Nous avons montré que le MmBm n'est pas une semimartingale pour $\mathcal{H}(t) \in]0, \frac{3}{4}]$. Pour $\mathcal{H}(t) \in]\frac{3}{4}, 1[$, le mouvement brownien multifractionnaire est équivalent en loi à un processus de Wiener. Nous avons ensuite étudié le marché financier dont les actifs risqués suivent la dynamique :

$$\frac{dS(t)}{S(t)} = \mu dt + \sigma dM(t)$$

avec μ, σ et $M(t)$ un mouvement brownien multifractionnaire composé.

Le prix d'un call dans ce marché est évalué pour $\mathcal{H}(t) \in]\frac{3}{4}, 1[$. Nous obtenons la formule explicite

suivante pour le prix de l'option européenne multifractionnaire :

$$z = e^{-rT} \int_{\mathbf{R}} \frac{1}{\eta (T + \alpha^2 T^2 \mathcal{H}(T))^{1/2} \sqrt{2\pi}} \left(S(0) \exp \left[y + rT - \frac{1}{2} \eta^2 T^2 \right] - C \right)^+ \times \exp \left[-\frac{y^2}{2\eta^2 (T + \alpha^2 T^2 \mathcal{H}(T))} \right] dy$$

où r est le taux sans risque et α le coefficient de combinaison.

Le but de notre étude est maintenant de faire de la gestion de portefeuille et de faire une comparaison avec le modèle standard.

6.4 Intégration-stochastique

Analyse multifractionnaire, mémoire des processus, indices boursiers, et modèle financier

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

Participants : Jacques Lévy Véhel, Moustapha Ndoye.

En collaboration avec Fatima Ly Baro (CEREG, Université Paris Dauphine)

Résumé : *Nous présentons les caractéristiques statistiques des indices boursiers servant de base aux options et futures sur indice traités dans les pays du G7. Nous utilisons l'analyse multifractionnaire qui opère à la manière d'un « zoom » susceptible d'offrir une description locale de l'exposant de Hölder à tout instant. Le modèle sous-jacent est le mouvement Brownien multifractionnaire caractérisé par une fonction \mathcal{H} dont la valeur est l'exposant local de Hölder à tout instant de la série considérée. La fonction \mathcal{H} permet de classer les séries temporelles en fonction de leur structure de dépendance et de donner une meilleure couverture suivant les indices boursiers.*

Après avoir testé la non stationnarité des indices boursiers des pays du G7 et deux pays émergents, nous avons présenté et étudié le modèle financier multifractionnaire des indices boursiers suivant :

$$X^{\mathcal{H}(t)}(t) = \ln P(t) - \ln P(0),$$

avec $X^{\mathcal{H}(t)}(t)$ un mouvement Brownien multifractionnaire et $P(t)$ prix de l'indice.

Nous avons estimé la fonction \mathcal{H} de tous les indices. Nous avons étudié la dépendance des séries en fonction de \mathcal{H} et le choix de couverture entre un indice restreint (CAC 40, Dow Jones) et un indice large (SBF 250, SP 500) mesuré par le coefficient de corrélation. En particulier, si deux indices boursiers suivent les dynamiques respectives $X^{\mathcal{H}_1(t)}(t)$ et $Y^{\mathcal{H}_2(t)}(t)$, alors :

$$\begin{aligned} \text{Corr} \left(X^{\mathcal{H}_1(t)}(t), Y^{\mathcal{H}_2(t)}(t) \right) &= \frac{2 [\mathcal{H}_1(t) \mathcal{H}_2(t) \Gamma(2\mathcal{H}_1(t)) \Gamma(2\mathcal{H}_2(t))]^{\frac{1}{2}}}{(\mathcal{H}_1(t) + \mathcal{H}_2(t)) \Gamma(\mathcal{H}_1(t) + \mathcal{H}_2(t))} \\ &\times \frac{[\sin \pi \mathcal{H}_1(t) \sin \pi \mathcal{H}_2(t)]^{1/2}}{\sin \pi \left(\frac{\mathcal{H}_1(t) + \mathcal{H}_2(t)}{2} \right)} \end{aligned}$$

6.5 Processus à plusieurs paramètres

Participants : Erick Herbin, Jacques Lévy Véhel.

Mots clés : drap brownien, mouvement brownien multifractionnaire, processus à plusieurs paramètres, loi du maximum..

L'absence d'ordre total dans \mathbf{R}^n a rendu vaine les tentatives de construire une théorie générale des processus calquée sur celle des processus indexés par \mathbf{R}_+ . Cependant, on peut quand même généraliser un certain nombre de notions comme les filtrations, les martingales, les processus de Markov ou l'intégrale stochastique. Le drap brownien joue, pour \mathbf{R}^n , le rôle que joue le mouvement brownien pour \mathbf{R}_+ . Mais bien que ce processus ait été beaucoup étudié, on ne dispose pas des résultats bien connus dans le cas du mouvement brownien standard comme le principe de réflexion, la loi du maximum, ou les temps locaux.

C'est dans ce cadre que l'on souhaite généraliser le mouvement brownien multifractionnaire. De plus, on espère obtenir des résultats asymptotiques sur la distribution du maximum de ce processus. G. M. Molchan a récemment établi le résultat suivant pour le mouvement brownien fractionnaire :

Théorème : Pour tout intervalle ouvert I contenant 0 et pour tout x fixé, on a pour $\lambda \rightarrow \infty$

$$\log P \left\{ \sup_{t \in \lambda I} B_H(t) < x \right\} = -\log \lambda \left(1 + O \left(\frac{1}{\sqrt{\log \lambda}} \right) \right)$$

On peut ainsi accéder à un comportement asymptotique de $P \{ \sup_{t \in I} B_H(t) < x \}$ lorsque $x \rightarrow 0$. On cherche à étendre ce résultat au mouvement brownien multifractionnaire. De plus, son extension à \mathbf{R}^n doit être faite de telle sorte qu'on puisse conserver un résultat similaire.

6.6 Modélisation stochastique de terrain

Participants : Erick Herbin, Jacques Lévy Véhel.

En collaboration avec Dassault Aviation.

Mots clés : processus stochastiques à plusieurs paramètres, mouvement brownien multifractionnaire, fusion de données..

Dans certaines applications embarquées, l'environnement dans lequel évolue le véhicule est souvent perçu par plusieurs capteurs. Cette perception est donc constituée de plusieurs représentations déformées d'une même réalité. Il est alors intéressant de construire un modèle probabiliste de cette réalité à partir de ces représentations. Autrement dit, il s'agit de quantifier le caractère approximatif de la connaissance que l'on a à travers plusieurs capteurs.

Par exemple, au cours de sa mission, un avion militaire dispose de deux représentations du terrain qu'il survole :

- un fichier numérique de terrain,
- une carte radar synthétisée à intervalles réguliers.

Le but de notre étude est d'utiliser une généralisation à 2 paramètres du mouvement brownien multifractionnaire pour réaliser un modèle aléatoire du terrain. En effet, les propriétés fractales de la nature ont déjà été mises en évidence et des modélisations de terrain ont déjà été faites sur la base de mouvements browniens fractionnaires. Cependant, le fait que la régularité des trajectoires du mBf soient constantes, constitue une limitation dans ce type de modélisation. C'est pourquoi, il nous paraît opportun d'étendre le mouvement brownien multifractionnaire à un ensemble d'indices contenu dans \mathbf{R}^2 (ou \mathbf{R}^n). Il s'agira ensuite d'utiliser les deux représentations dont on dispose pour estimer la fonction de régularité H paramétrant le modèle.

6.7 Signaux autosimilaires à mémoire longue : approche système

Participant : Michel Guglielmi.

On s'intéresse à la modélisation de transmittance ayant un gain fréquentiel en $\frac{1}{f^\gamma}$ à partir d'un réseau de cellules passives du 1er ordre. L'obtention d'une densité parfaite nécessite une infinité de cellules RC identiques. Même si on restreint le comportement fréquentiel théorique sur une bande de fréquences finie, en pratique, la limitation à un nombre fini de cellules conduit à une synthèse imparfaite. On propose ici une solution où il est possible de contrôler la précision du résultat par rapport au comportement théorique fixé.

A partir de la précision et la bande de fréquences choisies, la solution retenue consiste à utiliser l'approximation asymptotique du gain fréquentiel des cellules : ce qui garantit l'objectif compte-tenu des positions relatives du gain réel par rapport au gain asymptotique. Cette approche permet de résoudre simplement le calcul du nombre et des paramètres des cellules. Bien évidemment, le résultat dépend de γ (qui doit être inférieur à 1) et l'on montre que le cas le plus défavorable est $\gamma = 0.453 \dots$. Les paramètres des cellules obéissent à une loi de récursivité.

Dans une deuxième étape, il est calculé la précision maximale obtenue lorsqu'on choisit le nombre de cellules. Une analyse de l'écart réel (et non plus de l'écart asymptotique) est faite.

On applique cette technique à la synthèse de signaux dont la densité spectrale est en $\frac{1}{f^{2\gamma}}$. La discrétisation du réseau permet d'aboutir à une synthèse temporelle de signaux ayant cette caractéristique.

6.8 Débruitage multifractal de signaux

Participants : Eric Berardo, Jacques Lévy Véhel, Evelyne Lutton.

Nous étudions le problème suivant : à partir d'un signal échantillonné $X = X_1, \dots, X_n$, dont la régularité estimée par régression des coefficients d'ondelettes est $\alpha = \alpha_1, \dots, \alpha_n$, 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.

Après avoir étudié les aspects théoriques de notre méthode, puis proposé 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, nous nous sommes intéressés à une approche directe, c'est-à-dire sans passer par une décomposition en ondelettes, pour le calcul et l'optimisation des exposants de Hölder (calcul par oscillations), toujours à l'aide d'algorithmes évolutionnaires. Ce travail a fait l'objet du stage d'ingénieur ENSTA de Eric Berardo.

6.9 StirMark Benchmark

Mots clés : watermarking, spectres multifractals.

Participants : Evelyne Lutton, Frédéric Raynal.

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

Glossaire :

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

L'ambition du groupe de travail **MarkBench** est de proposer à la communauté scientifique un logiciel de test pour les méthodes de marquage d'images (Watermarking). 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 toute comparaison entre méthodes de marquage. Le développement de cet outil d'évaluation s'est poursuivi cette année. Nous avons ainsi étudié de nouveaux tests :

- vérification de l'espace des clés : s'assurer que seule la clé valide fonctionne ;
- marquage multiple : comportement du schéma proposé lorsque le médium est marqué plusieurs fois ;
- fingerprinting : construction de différentes collusions pour éprouver les solutions de fingerprinting ;

M. Steinbach et J. Dittmann ont utilisé les structures générales que nous avons élaborées pour adapter **StirMark Benchmark** aux fichiers sons. Le site² devant permettre la soumission des schémas est encore en cours d'élaboration, la plupart de nos efforts ont porté sur le logiciel de d'évaluation en lui-même.

6.10 Liens entre cryptographie et dissimulation d'information

Participant : Frédéric Raynal.

En collaboration avec Caroline Fontaine (Université de Lille).

²<http://ms-smb.darmstadt.gmd.de/stirmark>

Tout le monde s'accorde à dire que des liens existent entre la cryptographie et la dissimulation d'information. Néanmoins, si quelques études s'appuient sur des concepts cryptographiques, aucune n'analyse la pertinence des relations entre ces deux disciplines.

Chaque concept cryptographique a été étudié dans l'idée d'être appliqué en dissimulation d'information, que ce soit directement dans l'algorithme (preuve à divulgation nulle de connaissance ou partage de secret) ou bien dans un cadre plus général lié au protocole et à sa mise en œuvre autour d'un schéma quelconque (aspect asymétrique ou signature numérique).

Cette étude ne conduit pas à des solutions directement applicables, mais indique des directions dans lesquelles prospecter afin d'adapter les solutions efficaces fournies par la cryptographie à la problématique de la dissimulation d'information.

6.11 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. Après avoir optimiser les paramètres de la méthode de façon à assurer la meilleure robustesse aux attaques de type « Stirmark », nous avons étudié des critères psychovisuels pour augmenter l'invisibilité de la marque ([12]).

6.12 AE interactifs appliqués au text-mining

Mots clés : text mining, algorithmes évolutionnaires..

Participants : Yann Landrin-Schweitzer, Evelyne Lutton.

En collaboration avec Thérèse Vachon (Novartis Pharma) et Pierre Parizot (IBM).

Résumé : *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 thesaurii, 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.*

L'approche que nous avons adoptée est fondée sur la mise en œuvre à la fois d'outils de text-mining, d'analyse lexicale, et de programmation évolutionnaire, dans un cadre compatible avec une utilisation intensive. Un prototype expérimental fédérant ces outils est fonctionnel depuis juin 2001. Il a permis de valider les techniques employées, sur le plan des contraintes

de ressources et de la robustesse. Les premiers tests, effectués de manière automatique sur des bases documentaires provenant des TREC (un étalon international de la performance des moteurs de recherche), pointent les évolutions nécessaires.

La première est liée à la caractéristique principale de la tâche d'apprentissage réalisée sur les profils : la pauvreté des informations récoltées auprès des utilisateurs. Les tests ont montré qu'il fallait exploiter plus efficacement les entrées des utilisateurs au sein de l'algorithme évolutionnaire. Nous explorons l'extraction d'informations au moyen d'outils sémantiques.

Une autre difficulté est la taille potentiellement très importante de l'espace de recherche constitué par les profils, et donc la difficulté d'obtenir rapidement un profil stable et pérenne. Les solutions à ce type de problème, dans le cadre des algorithmes évolutionnaires, sont connues. Mais elles doivent être mises en oeuvre individuellement en fonction du contexte : adaptation de l'espace des génotypes (essentiellement déterminé par les éléments atomiques des profils, au moyen d'un ensemble d'instructions adapté, et de génération de données contrôlée par les thesaurii), réglage fin des opérateurs évolutionnaires et des paramètres de l'algorithme.

6.13 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 construction d'une chaîne 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 travail consiste à tirer partie de la souplesse des algorithmes d'évolution artificielle pour améliorer l'efficacité d'un autre algorithme, dans le contexte bien particulier de la simulation moléculaire de systèmes de polymères amorphes en état dense. Dans ce but nous avons utilisé des critères d'efficacité empruntés à la littérature comme critère d'optimisation, nous avons en outre récemment expérimenté un critère « fractal » (lacunarité), qui donne des résultats intéressants. Des simulations ont pu montrer qu'il est possible d'obtenir une amélioration avec un algorithme évolutionnaire simple, mais d'autres en ont révélé les limites. Nous travaillons donc à étendre cette approche de plusieurs manières.

La technique dite du « parallel tempering » est de plus en plus utilisée en simulation moléculaire de Monte Carlo. Succinctement, il s'agit de simuler simultanément plusieurs systèmes

dans le même ensemble mais chacun à des températures différentes. L'introduction d'un mouvement de Monte Carlo qui échange les températures de deux systèmes différents permet alors d'effectuer un échantillonnage plus efficace de l'ensemble à la température la plus basse, car l'échange de configurations avec des systèmes à température plus élevée, qui bénéficient d'une dynamique plus rapide, permet de franchir plus aisément des barrières de potentiels. Si cette technique peut apporter une amélioration sensible de la qualité de l'échantillonnage, il reste certains paramètres de sa mise en oeuvre qui sont cruciaux pour son efficacité et qui se règlent encore souvent de manière empirique et ouvre donc une possibilité d'amélioration par algorithme évolutionnaire.

6.14 Surcompression d'images par algorithmes évolutionnaires

Mots clés : évolution artificielle, compression d'images..

Participants : Amine Boumaza, Jacques Lévy Véhel, Evelyne Lutton.

Le but de cette étude est de savoir s'il est possible d'exploiter un flou géométrique pour augmenter le taux de compression des techniques classiques de compression d'images. Ce problème peut être formulé comme un problème d'optimisation, certes très complexe, mais accessible via une méthode fondée sur un algorithme évolutionnaire. L'expérience a consisté à créer une population initiale d'images très légèrement distordues géométriquement (par exemple grâce au logiciel StirMark), l'algorithme évolutionnaire (décrit en langage EASEA) optimise les codes comprimés de ces images de façon à minimiser la taille du code comprimé (plus exactement, on introduit des redondances dans le code compressé pour pouvoir réduire ensuite sa taille via un codage de type Huffman par exemple) tout en s'éloignant le moins possible de l'image initiale (au sens d'une distance inter-image prédéfinie).

Les premières expérimentations nous ont permis de conclure que les taux de « surcompression » accessibles restent actuellement très faibles en comparaison avec le coût en temps de calcul de cette méthode.

6.15 Vision stéréo par approche parisienne : algorithme des mouches

Mots clés : évolution artificielle, vision stéréo..

Participants : Amine Boumaza, Jean Louchet.

Dans l'approche classique de l'évolution artificielle, la solution du problème à optimiser est en général l'individu le plus performant. L'approche parisienne, récemment introduite, consiste à représenter la solution par l'ensemble de la population ou une partie importante de celle-ci. De ce fait la solution du problème est subdivisée en primitives plus simples, propriété particulièrement intéressante pour les applications en traitement d'images.

L'algorithme des mouches est un algorithme de reconstruction 3D fondé sur l'approche individuelle. L'idée est de faire évoluer une population de points de l'espace (les « mouches ») à l'aide d'une fonction de fitness telle que les mouches se concentrent progressivement sur les surfaces visibles des objets de la scène. Les données d'images servent de paramètres à la fonction

de fitness. La structure de la fonction de fitness reflète la propriété physique idéalement vérifiée par la position d'une mouche.

Dans le cas de la stéréovision, la « mouche idéale » - celle qui se trouve sur la surface visible d'un objet de la scène - se reconnaît au fait que ses projections (géométriquement calculées) dans les images sont fortement corrélées. Le critère de ressemblance entre les voisinages des deux projections de la mouche est donc l'ingrédient principal de la fonction de fitness.

Nous avons développé des opérateurs de mutation, de croisement et de sharing appropriés et testé l'algorithme avec succès sur des couples d'images stéréo naturelles et synthétiques.

Deux applications sont développées, dans le cadre d'une coopération avec l'ENSTA.

La première application est la vision en temps réel pour un robot mobile. Nous avons montré d'une part que cet algorithme se prête particulièrement bien aux applications en temps réel - ce qui n'est pas le point fort traditionnel des méthodes évolutionnaires! - par son caractère asynchrone et l'exploitation optimale des possibilités des imageurs CMOS modernes; d'autre part les résultats de l'algorithme (un nuage de mouches entretenu au fil des images) peuvent facilement être utilisés comme données d'entrée d'un algorithme de planification spécifique mais inspiré des méthodes classiques. Nous avons construit à cet effet un simulateur simple de la boucle robotique incluant l'algorithme des mouches.

La deuxième application débute en coopération avec l'ENSTA et l'université Paris 13 (J.M. Rocchisani) : il s'agit de reconstruire la forme d'un organe à partir de ses projections en imagerie médicale (scintigraphie). Pour cela un modèle simplifié de diffusion Compton est pris en compte dans la fonction de fitness.

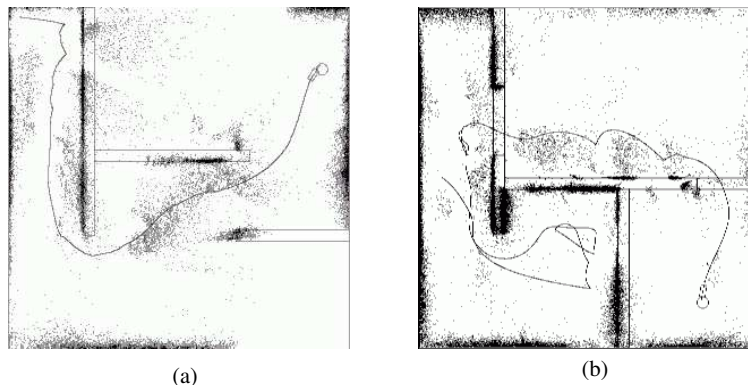


FIG. 1 – Navigation d'un robot simulé, en vue de dessus. Les nuages de points représentent les obstacles détectés par l'algorithme des mouches au cours de la navigation. Sur (b) on note que le robot a pu trouver les ouverture (portes) pour atteindre son but.

6.16 ArtiE-Fract

Participants : Jonathan Chapuis, Evelyne Lutton.

ArtiE-Fract est un logiciel interactif permettant de générer les images d'attracteur d'IFS, puis de les faire évoluer à l'aide d'un algorithme évolutionnaire paramétrable. ArtiE-Fract fait

suite à un logiciel fondé sur PROGON (moteur de programmation génétique maison) sur une interface java. Il en reprend et étend le concept (évolution d'image d'attracteur d'IFS avec un algorithme évolutionnaire) en un seul logiciel contenant l'interface utilisateur. Ce nouveau programme est réalisé en C++ avec la librairie gtk+ pour l'interface. Il en résulte une meilleure interaction entre l'utilisateur et l'évolution des IFS ainsi qu'un gain en rapidité très important (5-10 fois.)

L'interface est constituée d'une fenêtre principale qui permet de visionner les images de toute la population à chaque instant et non plus de quelques individus seulement. L'utilisateur peut ainsi participer de manière interactive à la fitness en attribuant une note esthétique à chaque attracteur. En outre, il peut maintenant modifier lui-même l'image d'un attracteur à l'aide de divers outils : transformations géométriques (zoom, translation, étirement, centrage), modifications de la palette de couleurs, actions sur les fonctions (suppression, changement des probabilités, déplacement des points fixes, etc.)

Les IFS sont composés de trois types de fonction : affine, mixte et polaire. Plus complexes que les fonctions affines, les fonctions mixtes et polaires sont définies sous forme d'arbres. ArtiE-Fract permet maintenant de mélanger des fonctions de types différents dans un seul et même individu. Par ailleurs, ArtiE-Fract contient un générateur d'IFS qui offre à l'utilisateur la possibilité de paramétrer le nombre de fonctions de chaque type, de contrôler la contractance ainsi que de répartir les probabilités pour les choix des opérateurs lors de la création des arbres.

Concernant l'algorithme évolutionnaire lui-même, la fitness est calculée à partir d'objectifs a priori (densité de l'attracteur, dimension fractale, lacunarité,...) et par une note donnée par l'utilisateur. Les opérateurs d'évolution sont nombreux et paramétrables à tout moment. Ils portent sur les individus (ajout - suppression de fonction, transformations géométriques, échanges de fonctions entre individus, palette de couleurs), et sur leur fonctions (mutation - croisement sur les arbres, déplacement des points fixes).

6.17 Résolution automatique d'un problème de planification de trajet en zone urbaine à l'aide d'EASEA

Participants : Evelyne Lutton, Pierre Wydoodt.

En collaboration avec Willemien Wisser et Françoise Detienne du projet Eiffel.

Mots clés : algorithme évolutionnaire, optimisation stochastique, planification de trajet, analyse cognitive..

Cette étude vise à comparer deux approches de la planification :

- par une analyse cognitive : analyse des plans conçus et des activités mises en oeuvre effectivement par des personnes dans leur élaboration de ces plans,
- par une analyse de la résolution automatique des mêmes problèmes au moyen d'algorithmes évolutionnaires.

Nous commençons par programmer un algorithme évolutionnaire en langage EASEA de façon à résoudre automatiquement le problème de planification qui a fait l'objet de l'analyse cognitive (faite au cours de la thèse de Sébastien Chalmé au projet Eiffel). Ce problème est une planification d'itinéraires en voiture à travers une ville (St Quentin-en-Yvelines), soumise à des contraintes (rendez-vous à une heure précise, ordre de certaines tâches imposées, etc ...).

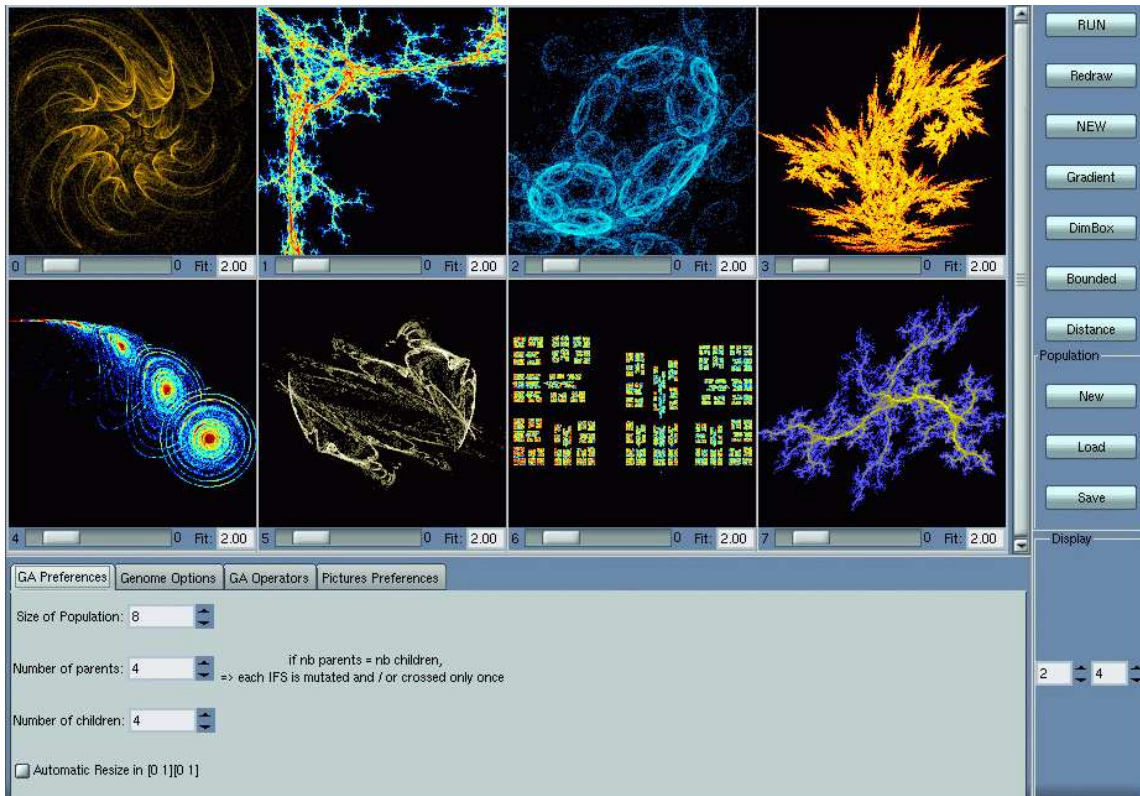


FIG. 2 – Interface du logiciel ArtiE-Fract de génération interactive d'images fractales

L'analyse cognitive a consisté à examiner comment des problèmes de planification sont résolus par deux types de personnes : des personnes ayant une connaissance a priori sur la ville que l'itinéraire traverse et des personnes n'en ayant pas. L'analyse cognitive a porté sur, d'une part, les itinéraires finaux auxquels les personnes aboutissent, et d'autre part, le processus de planification, c'est-à-dire la façon dont les personnes construisent leur itinéraire. Les deux ne sont pas toujours « optimaux » : les itinéraires ne sont pas toujours les plus courts en distance parcourue ou en durée du parcours, et la planification passe souvent par différentes versions d'itinéraires qui sont, par ex., modifiées et/ou abandonnées, reprises ou non.

L'algorithme évolutionnaires actuellement développé permet de simuler la connaissance a priori qu'un utilisateur peut avoir du lieu, grâce à une représentation spécifique des trajet urbains ainsi qu'à une paramétrisation des opérateurs génétiques et de la fonction de fitness.

La phase d'analyse et de comparaison des résultats automatique vis à vis des résultats humaine expérimentaux (modes de résolution de problème et solutions élaborées) devrait ensuite nous donner un éclairage intéressant sur les processus cognitifs mis en jeu au cours de cette tâche de planification.

6.18 Comparaisons de deux bibliothèques évolutionnaires à l'aide de EASEA

Participants : Pierre Collet, Jean Louchet, Evelyne Lutton.

Mots clés : algorithme évolutionnaire, optimisation stochastique.

Le but de cette étude était d'évaluer la qualité des codes C++ générés par le langage EASEA lorsqu'il fait appel aux bibliothèques EO et GA-Lib. EO et GALib étant des bibliothèques très différentes, avec des caractéristiques bien particulières, nous nous sommes intéressés aux traits communs à ces deux bibliothèques évolutionnaires : nous n'avons absolument pas cherché à exploiter les stratégies spécifiques de chacune de ces librairies. Nous nous sommes ainsi intéressés aux temps d'exécution et à la précision des résultats obtenus sur un jeu de fonctions-test, à partir d'un même programme spécifié en langage EASEA et compilé en faisant appel soit à EO soit à GA-Lib.

Les fonctions testées étaient

- des fonctions à régularité contrôlée (fonctions de Weierstrass-Mandelbrot),
- des fonctions-test classiques du domaine des algorithmes évolutionnaires (jeu de test de De Jong),

à variables réelles, et définies dans des espaces de recherche de dimension 3 à 500.

L'analyse de ces nombreux tests nous amène à conclure tout d'abord — ce qui est tout à fait rassurant sur la qualité du code généré automatiquement par EASEA — que les deux librairies donnent des résultats comparables, avec un léger avantage en rapidité pour GA-Lib, au détriment d'une perte de précision comparativement à EO, cette différence n'est vraiment notable que pour des problèmes de grande taille.

Ces tests montrent ensuite que le l'idée reçue selon laquelle un AE emploie presque toujours au moins 90% de son temps de calcul en calcul fitness doit être relativisée, notamment lorsque les stratégies évolutionnaires deviennent complexes, et pour des espaces de recherche de forte dimensionnalité.

6.19 Audio2midi

Participants : 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 joués. En particulier, nous supposons que les instruments utilisés dans les enregistrements sont connus et disponibles pour une phase d'apprentissage. 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 de formes que nous avons adaptées à notre cadre. Cette année, nous avons optimisé et finalisé une première méthode très rapide de reconnaissance. Cependant, celle-ci ne fonctionne pas correctement sur tous les instruments ; nous avons donc développé une deuxième technique plus lente mais plus robuste vis-à-vis des signaux polyphoniques. Ces deux méthodes ont été intégrées dans un logiciel tournant sous Windows et Linux ; tout le code Matlab a été réécrit en C++ afin de garantir de meilleures performances, d'accroître la portabilité et de permettre l'intégration future sous forme de plugin dans d'autres logiciels (séquenceurs, éditeurs de partitions, ...).

6.20 Analyse de l'uni routier

Participants : Pierrick Legrand, Jacques Lévy Véhel.

En collaboration avec le LCPC (Nantes).

En collaboration avec le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de Nantes nous nous intéressons à l'influence de la microtexture des routes sur l'adhérence avec les pneumatiques. Dans une première phase, nous recherchons une éventuelle structure fractale des profils étudiés ainsi qu'une corrélation entre des mesures de frottement et les paramètres déterminés par des méthodes d'analyse fractale. Par la suite, nous essaierons de développer un calcul analytique du frottement à partir d'un modèle fractal.

Les profils sur lesquels nous fondons cette étude proviennent du LCPC et sont regroupés en échantillons représentant chacun un type de surface différent. Les techniques utilisées ont été implémentées dans la boîte à outils FRACLAB, et en particulier une nouvelle méthode d'estimation pour des régressions de type « limite inférieure ».

Les résultats préliminaires obtenus ont montré que les profils présentaient effectivement des caractéristiques fractales sur une large gamme d'échelles. De plus, nous avons pu déterminer que l'exposant de Hölder moyen permet de classer certains échantillons.

6.21 Fractales et Chaos

Participant : Ina Taralova.

Nous nous sommes intéressée à la modélisation du trafic Internet, et plus particulièrement, à l'évolution de la fenêtre de congestion gérée par un mécanisme de contrôle de type AIMD (Additive Increase, Multiplicative Decrease). En effet, l'évolution temporelle de la fenêtre de congestion présente des propriétés fractales comme l'auto-similarité, et ceci pour différents taux de service et différentes tailles du buffer. En même temps, le système est entièrement déterministe, car chaque événement est entièrement déterminé par le passé (envoi d'un paquet, time-out, ...); de plus, des fonctions nonlinéaires sont utilisées pour mesurer le RTT (round trip time) et un seuil non linéaire pour passer de la phase « lente » ou exponentielle à la phase « évitement de congestion ». Nous avons étudié les propriétés chaotiques d'une version simplifiée d'un tel modèle. Un article a été dédié à cette étude [32].

Un second axe de recherche a concerné l'étude de la dynamique d'un système (max, plus) sous forme de récurrence. Ce système - sous certaines conditions - peut être utilisé pour générer des signaux à longue dépendance statistique, i.e. dont la fonction d'autocorrélation décroît en loi de puissance en fonction de l'espacement dans le temps des échantillons du signal. La forte non-linéarité inhérente au système (max, plus) et l'auto-similarité du signal généré, qui est également caractéristique de certains signaux chaotiques [15], nous a amenés à nous intéresser à la recherche d'un lien entre ces deux phénomènes.

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).
- LCPC : Analyse fractale de l'uni routier (thèse de Pierrick Legrand).

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 était détaché dans ce laboratoire jusqu'en Septembre 2001) depuis 1996 sur l'étude des bruits en $1/f$, le Watermarking, et l'analyse de l'uni routier. Fraclab est d'autre part principalement développé à l'IRCCYN depuis un an.

- l'université Paris XII-Val de Marne (S. Jaffard) sur les ondelettes et la 2-microlocalisation,
- 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 Clermont Ferrand (A. Benassi) et l'Université Paul Sabatier de Toulouse (A. Ayache et S. Cohen) 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.

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

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

Evelyne Lutton est secrétaire de l'Association pour l'Evolution Artificielle, depuis Décembre 1994.

Marc Schoenauer est président fondateur de l'Association Évolution Artificielle, membre du bureau de l'AFIA – Association Française d'Intelligence Artificielle, et responsable de la réorganisation de son site ouèbe en « portail » de l'IA francophone. Il est correspondant principal (*Main node*) et **membre du Comité Exécutif** (« chairman » du Comité de Communications Électroniques) du réseau d'excellence européen **EVONet**, labellisé en octobre 95. Coordinateur : T. Fogarty, South Bank University, Londres, Angleterre, membre du **IEEE Technical Committee on Evolutionary Computation** de 97 à 99 ; membre actuel du **PPSN Steering Committee**, membre de l'**Executive Board de l'ISGEC** – International Society on Genetic and Evolutionary Computation.

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. Elle est « program chair » de la prochaine conférence européenne sur la programmation génétique, EUROGP 2002.

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 en Décembre 2001.

Marc Schoenauer est membre des comités de Programme de CEC 2002, EuroGP 2002, EvoCOP 2002, GECCO 2002, PPSN 2002 (tutorial chair), EMO'03. Il est éditeur associé des *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* (IEEE Press) depuis leur création en 1996, membre du « advisory board » de la série *Natural Computing Series* chez Springer Verlag depuis sa création en septembre 1999, éditeur associé du *Journal of Genetic Programming and Evolvable Machines* (Kluwer) depuis sa création en janvier 2000, et éditeur associé du *Journal of Soft Computing*, nouveau journal électronique chez Elsevier, depuis sa création en septembre 2000. Il est membre du Comité de Lecture de la collection *Mathématiques et Applications* de la SMAI (Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles) depuis janvier 2001.

9.3 Groupes de travail

Evelyne Lutton et Marc Schoenauer sont membres 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 « Ondelettes et Fractales » du DEA AIA de l'Ecole Centrale de Nantes (10 h).

Moustapha Ndoye :

- Chargé de Cours et TD en 2ème année de DEUG GEA à Paris IX - Dauphine en mathématiques (50h).

Yann Landrin-Schweitzer :

- Chargé de TD et TP en DEUG MASS « Mathématiques de la décision », 1ère année, Université Paris IX Dauphine (33h TD, 33h TP)

Ina Taralova :

- Ina Taralova a dispensé 192h d'enseignement dans les disciplines Traitement du signal, Electronique, Simulation des Signaux et des Systèmes et Asservissement et Régulation

pour les élèves en tronc commun première et deuxième années et les élèves en option Automatique à l'École Centrale de Nantes.

Marc Schoenauer :

- Depuis 1997, cours « Optimisation numérique évolutionnaire » au sein du DEA d'Analyse Numérique commun École Polytechnique / Université de Paris 6, en collaboration avec J. Periaux (Dassault Aviation).

9.6 Autres enseignements

Jacques Lévy Véhel :

- Chargé de cours sur les Fractales à l'École 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'École 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).
- Cours sur l'analyse fractale et les ondelettes à l'Université de Buenos Aires (50 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'École Centrale de Paris (18 h).
- Assistante du cours sur les Fractales à l'ESIEA (3 h).

Erick Herbin :

- Chargé de TD en Probabilité-Statistique à l'École Centrale Paris (22h).

Marc Schoenauer :

- Depuis Oct. 1997 : Maître de Conférences à temps partiel en Analyse Numérique à l'École Polytechnique.
- Depuis 98 : Responsable de l'option Contrôle et Optimisation du *Mastère Spécialisé Ingénierie Mathématique* commun à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne et à l'École Polytechnique.
- À partir de l'année scolaire 2001-2002, responsable du cours Optimisation à l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

9.7 Jurys de thèse

Evelyne Lutton a été rapporteur de la thèse de S. Ben Hamida (Ecole Polytechnique), O. de Joinville (ENST), A. Berro (Université de Toulouse). Elle a été membre du jury d'habilitation de C. Fonlupt (Université du Littoral, Calais).

9.8 Conférences invitées

Jacques Lévy Véhel a été conférencier invité au congrès franco-tunisien sur l'analyse multifractale.

Marc Schoenauer a été conférencier invité à la conférence EUROGEN'2001 à Athènes le 20 septembre 2001, et à la journées des thésards de l'École Nationale des Télécom Brest le 26 octobre 2001.

9.9 Divers

Jacques Lévy Véhel est membre du bureau du groupe MAS de la SMAI et membre de la commission de spécialistes de Nantes

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] K. DAUDI, 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.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [12] A. MANOURY, *Watermarking d'images à base de paquets d'ondelettes*, thèse de doctorat, Université de Nantes, 2001.

Articles et chapitres de livre

- [13] A. AYACHE, J. LÉVY VÉHEL, « Processus à régularité locale prescrite », *Comptes rendus de l'Académie des sciences - Série I - Mathématique* 333, 3, 2001, p. 233.

- [14] N. AYACHE, S. COHEN, J. LÉVY-VÉHEL, « Identification of Generalized Multigradational Gaussian Processes », *Soumis*, 2001.
- [15] D. FOURNIER-PRUNARET, O. FEELY, I. TARALOVA-ROUX, « Lowpass Sigma-Delta Modulation : An Analysis by Means of the Critical Lines Tool », *Nonlinear Analysis 47*, 2001, <http://www.elsevier.nl/locate/na>.
- [16] H. HAMDA, F. JOUVE, E. LUTTON, M. SCHOENAUER, M. SEBAG, « Compact Unstructured Representations in Evolutionary Topological Optimum Design », *Applied Intelligence 16*, 2002.
- [17] J. LEVY VEHEL, « Signal enhancement based on Hölder regularity analysis », *IMA Volumes in Mathematics and its Applications*, A paraître.
- [18] J. LOUCHET, M. GUYON, M.-J. LESOT, A. BOUMAZA, « Dynamic Flies : a new pattern recognition tool applied to stereo sequence processing », *Pattern Recognition Letters*, mars 2001, révision juin 2001, accepté pour publication, Elsevier Science B.V.
- [19] J. LOUCHET, M. GUYON, M.-J. LESOT, A. BOUMAZA, « L'algorithme des mouches : apprendre une forme par évolution artificielle. Application en vision robotique », *Extraction des connaissances et apprentissage*, octobre 2001, Hermès, éd.
- [20] J. LOUCHET, « Using an Individual Evolution Strategy for Stereovision », *Genetic Programming and Evolvable Machines 2*, 2, March 2001, p. 101–109, Kluwer Academic Publishers.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [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, European Conference on Genetic Programming*, p. 246–255, 2001.
- [22] A. BOUMAZA, J. LOUCHET, « Dynamic Flies : Using Real-time evolution in Robotics », in : *EVO-IASP 2001 Workshop, Artificial Evolution in Image Analysis and Signal Processing*, 2001.
- [23] J. CHAPUIS, E. LUTTON, « ArtiE-Fract : INteractive Evolution of Fractals », in : *4th International Conference on Generative Art*, Milano, Italy, December 12-14 2001.
- [24] C. FONTAINE, F. RAYNAL, « About the links between cryptography and data hiding », in : *à paraître dans Proceedings of the SPIE*, W. Wong, E. J. Delp (éditeurs), paper 4314-46, San Jose, CA, USA, janvier 2002.
- [25] B. LEBLANC, E. LUTTON, B. BRAUNSCHWEIG, H. TOULHOAT, « History and Immortality in Evolutionary Computation », in : *Proceedings of EA'01 : the 5th international conference on Artificial Evolution*, Le Creusot, France, October 29-31 2001. LLNCS, Spinger Verlag.
- [26] B. LEBLANC, E. LUTTON, B. BRAUNSCHWEIG, H. TOULHOAT, « Improving molecular simulation : a meta optimisation of Monte Carlo parameters », in : *CEC2001*, Seoul, South Korea, May 27-30 2001.
- [27] B. LEBLANC, E. LUTTON, B. BRAUNSCHWEIG, H. TOULHOAT, « Mixing Monte Carlo moves more efficiently with an evolutionary algorithm », in : *Accepted abstract to Division of Computers in Chemistry for the 223rd ACS National Meeting*, Orlando, Florida, April 7-11 2002.
- [28] E. LUTTON, P. COLLET, J. LOUCHET, « EASEA comparisons on test functions : GALib versus EO », in : *EA01 Conference on Artificial Evolution*, Le Creusot, octobre 2001.
- [29] J. LÉVY VÉHEL, E. LUTTON, « Evolutionary signal enhancement based on Hölder regularity analysis », in : *EVO-IASP 2001 Workshop, Artificial Evolution in Image Analysis and Signal Processing*, 2001.

- [30] F. PETICOLAS, M. STEINEBACH, F. RAYNAL, J. DITTMAN, C. FONTAINE, N. FATÈS, « A public automated web-based evaluation service for watermarking schemes : StirMark Benchmark », in : *Electronic imaging, security and watermarking of multimedia contents*, P. W. W. . E. J. Delp (éditeur), 4314, Society for Imaging Science and Technology (IS&T) and International Society for Optical Engineering (SPIE), San Jose, CA, U.S.A., janvier 2001. ISSN 0277-786X.
- [31] M. STEINEBACH, F. PETICOLAS, F. RAYNAL, J. DITTMAN, C. FONTAINE, C. SEIBEL, N. FATÈS, « StirMark Benchmark : audio watermarking attacks », in : *Multimedia Security*, IEEE International Conference on Information Technology : Coding and Computing (ITCC'2001), Las Vegas, Nevada, U.S.A., avril 2001.
- [32] I. TARALOVA, « Analysis of Some Deterministic Models for TCP Congestion Window Control », in : *5th World Multiconference on : Circuits, Systems, Communications & Computers (CSCC 2001)*, W. Press (éditeur), Rethymnon, Crete, Greece, 8-15 July 2002. dans "Advances in Scientific Computing, Computational Intelligence and Applications ", ISBN 960-8052-36-X, <http://www.worldses.org>.

Rapports de recherche et publications internes

- [33] P. COLLET, E. LUTTON, M. SCHOENAUER, « Affectation automatique des relecteurs de la conférence PPSN VI : un exemple d'utilisation du langage EASEA », *Rapport de Recherche n°4177*, INRIA Rocquencourt, Rocquencourt, Mai 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4177.html>.
- [34] P. COLLET, M. SCHOENAUER, E. LUTTON, J. LOUCHET, « EASEA : un langage de spécification pour les algorithmes évolutionnaires », *Rapport de Recherche n°4218*, INRIA, Rocquencourt, juin 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4218.html>.