

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

THÈME 4A



*R*apport  
*d'**A*ctivité

2002



# Table des matières

<b>1. Composition de l'équipe</b>	<b>1</b>
<b>2. Présentation et objectifs généraux</b>	<b>2</b>
<b>3. Fondements scientifiques</b>	<b>2</b>
3.1. Régularité ponctuelle	2
3.2. Analyse multifractale	3
3.3. Processus fractals	4
3.4. Algorithmes génétiques, algorithmes évolutionnaires	5
3.5. Nouveaux modèles évolutionnaires	5
3.6. Analyse temps fréquence/temps échelle	7
<b>4. Domaines d'application</b>	<b>7</b>
4.1. Trafic sur Internet	7
4.2. Problèmes inverses	8
4.3. Traitement d'images	9
4.4. Cours financiers	9
<b>5. Logiciels</b>	<b>10</b>
5.1. FRACLAB	10
5.2. EO : Evolving Objects, une librairie évolutionnaire C++	10
5.3. EASEA : langage de spécification d'algorithmes évolutionnaires	11
5.4. DREAM : Distributed Resource Evolutionary Algorithm Machine	12
<b>6. Résultats nouveaux</b>	<b>12</b>
6.1. Analyse de régularité locale	12
6.2. Processus multifractals à base de séries d'ondelettes	13
6.3. Mesures martingales multipériodiques et multifractales	13
6.4. Analyses multifractales : des « boîtes » au formalisme centré	14
6.5. Echantillonnage et warping fréquentiel	14
6.6. Analyse de données en grande dimension	15
6.7. Extension à plusieurs paramètres du mouvement brownien multifractionnaire	15
6.8. Étude théorique et heuristique des stratégies d'évolution	16
6.9. Analyse de l'efficacité d'un code évolutionnaire	16
6.10. Liens entre EDAs et EAs	17
6.11. Utilisation d'approximations par Machines à Vecteur Support et algorithmes évolutionnaires	17
6.12. Algorithmes évolutionnaires multi-objectifs	18
6.13. Modèles évolutionnaires à comportements sociaux et économiques	19
6.14. Etudes d'outils pour la dissimulation d'information : approches fractales, protocoles d'évaluation et protocoles cryptographiques	19
6.15. Analyse de profils routiers	20
6.16. Compression fractale par approche évolutionnaire parisienne	20
6.17. ArtiE-Fract	21
6.18. Simulations de Monte Carlo parallèles compétitives	21
6.19. Text-mining par algorithmes évolutionnaires : créativité, transversalité et personnalisation	22
6.20. Optimisation de parcours pédagogique par colonie de fourmis	23
6.21. Paramétrage interactif d'implant cochléaires par approche parisienne	23
6.22. Vision stéréo par approche parisienne : algorithme des mouches	24
6.23. Contrôleurs symboliques en robotique évolutionnaire	24
<b>7. Contrats industriels</b>	<b>26</b>
<b>8. Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>26</b>
8.1. Actions nationales	26

8.2. Actions européennes	27
<b>9. Diffusion des résultats</b>	<b>27</b>
9.1. Comités d'organisation	27
9.2. Comités de programme	28
9.3. Comités éditoriaux	28
9.4. Groupes de travail	28
9.5. Séminaires	28
9.6. Enseignement universitaire	29
9.7. Autres enseignements	29
9.8. Jury de thèses (en tant que rapporteur)	30
9.9. Conférences invitées	30
<b>10. Bibliographie</b>	<b>30</b>

# 1. Composition de l'équipe

## Responsable scientifique

Evelyne Lutton [CR, Inria]

## Responsable permanent

Jacques Lévy Véhel [DR, 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 31/08/2002]

Jonathan Chapuis [du 15/09/2001 au 14/09/2002]

## 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]

Michel Guglielmi [IrCcyN-CNRS, Nantes]

Jean Louchet [ENSTA]

Ina Taralova [IrCcyN, Nantes]

Claude Tricot [Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand]

Christian Walter [Coopers & Lybrand]

## Doctorants

Kamal Abboud [ATER, Université d'Evry]

Anne Auger [boursière MENRT, Université Paris 6]

Amine Boumaza [boursier Inria, Université Paris 5]

Erick Herbin [Dassault Aviation, Université Paris 11]

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

Stéphane Lafon [Corps X-Telecom]

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

Khaled Barbaria [du 01/05/02 au 30/06/02]

Jamila Bousklaf [du 21/05/02 au 31/08/02]

Sriyansa Dash [du 01/05/02 au 15/07/02]

Rémi Dewynter [du 01/04/02 au 30/09/02]

Xavier Dumonal [du 15/07/02 au 15/09/02]

Xavier Merlhiot [du 01/03/02 au 15/08/02]

Sébastien Mirabel [du 01/05/02 au 30/06/02]

Vivek Pandey [du 01/05/02 au 15/07/02]

Yann Semet [du 15/09/02 au 28/02/03]

## 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, système de fonctions itérées, trafic sur les réseaux d'ordinateurs, traitement du signal, watermarking.*

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, leurs aspects « fractals » (optimisation de fonctions complexes, analyse de l'influence de l'irrégularité des fonctions optimisées, résolution de problèmes inverses, nouveaux algorithmes), et les développements (langage de spécification d'algorithmes évolutionnaires *EASEA* et de la librairie *EO*, librairie *EO*).

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

- **Analyse multifractale** : définition de nouveaux spectres, estimation, étude des corrélations multifractales, calcul des spectres de fonctions, mesures et processus, liens avec l'analyse en ondelettes [6].
- **Analyse de la régularité ponctuelle de fonctions** : exposants de régularité, optimisation de fonctions irrégulières par algorithmes évolutionnaires, analyse 2-microlocale, liens avec l'analyse en ondelettes [1][3].
- **Processus stables et fractionnaires** : simulation et capacité à modéliser certains types de signaux, mouvement Brownien fractionnaire et ses généralisations [10].
- **Etude de nouveaux modèles évolutionnaires** : approche parisienne, algorithmes génétiques interactifs, évolution et apprentissage, algorithmes multi-objectifs.
- **Analyse temps fréquence** : définition et utilisation de nouvelles transformations adaptées à l'analyse fractale des signaux, analyse en ondelettes.

Les résultats de ces études 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, analyse de profils routiers et modélisation de cours financiers [4].
- Traitement de signaux 2D : analyse, segmentation, débruitage, compression et watermarking d'images [5].

Le projet a des relations fortes avec l'IrCcy à Nantes. Il a des collaborations avec le CMAP de l'école Polytechnique, le LRI, Université d'Orsay, l'ENSTA, l'Université de Toulouse, l'Université de Saint-Andrews, l'Université de Montréal 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 Paraschool.

## 3. Fondements scientifiques

### 3.1. Régularité ponctuelle

**Participants :** Julien Barral, Jacques Lévy Véhel, Stéphane Seuret.

*En collaboration avec Stéphane Jaffard (Université Paris XII).*

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

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  $\alpha$  de  $f$  en  $x_0$ , par exemple, est défini par :

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

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

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

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

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

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

Une généralisation de la régularité Hölderienne est fournie par l'analyse 2-microlocale. Les espaces 2-microlocaux  $C_{x_0}^{s,s'}$ , 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 :

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

Une nouvelle caractérisation temporelle des espaces 2-microlocaux a été proposée. Elle 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 :** Julien Barral, Christophe Canus, Jacques Lévy Véhel, Claude Tricot, Stéphane Seuret.

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

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  $\alpha_f$  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  $\alpha$  dans un sous-ensemble  $E_\alpha$ , et on caractérise l'irrégularité de façon *globale* en calculant, pour chaque valeur de  $\alpha$ , la dimension de Hausdorff  $f_h(\alpha)$  de l'ensemble  $E_\alpha$ . 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  $\alpha$  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, Julien Barral, Lotfi Belkacem, Michel Guglielmi, Jacques Lévy Véhel, Stéphane Seuret.

*En collaboration avec Serge Cohen (Université de Toulouse), Jacques Peyrière (Université d'Orsay).*

**Mots clés :** mouvement Brownien fractionnaire, processus alpha-stable, processus de Lévy.

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 de Lévy, qui présentent des caractéristiques fractales.

Nous étudions des processus tels que le mouvement Brownien fractionnaire (mBf) ou les processus  $\alpha$ -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  $\alpha$ -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  $\alpha \neq 2$ ),  $\mu$  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, Marc Schoenauer.

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

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 employés 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 [50][48], l'analyse de déceptivité fondée sur la théorie des Schémas [53], enfin, la modélisation sous forme de système dynamique, où on a pu mettre en évidence un comportement de type « fractal » (et générer les ensembles de type Julia correspondants) [54].

D'un point de vue théorique, certains outils qui ont été développés dans le cadre de la géométrie fractale peuvent être employés pour affiner une analyse de déceptivité des AG. En effet, l'analyse de la façon dont un AG optimise certaines fonctions « fractales » (ou plus précisément des fonctions Höldériennes) permet de comprendre l'influence de certains des paramètres de l'AG. Cette analyse peut être ensuite étendue à des fonctions plus générales et donne des indications sur la façon de modifier les paramètres afin d'améliorer les performances de l'AG. Une analyse plus poussée sur la même base théorique fournit aussi une méthode d'évaluation de l'efficacité d'un codage des solutions dans un AG [8].

### 3.5. Nouveaux modèles évolutionnaires

**Participants :** Pierre Collet, Evelyne Lutton, Marc Schoenauer.

**Mots clés :** *algorithme évolutionnaires interactifs, approche parisienne, optimisation multiobjectif, co-évolution.*

Si la souplesse des algorithmes évolutionnaires permet de s'attaquer à des problèmes d'optimisation faisant intervenir des espaces de recherche non standard (espaces de listes, de graphes, ...), très difficiles, irréguliers, inaccessibles à d'autres méthodes, il est aussi possible de faire « plus » que de l'optimisation grâce au Darwinisme artificiel. C'est un enjeu important de ce domaine de recherche. Nous nous intéressons ainsi à plusieurs techniques évolutionnaires fondées sur une formulation parfois différente des problèmes à résoudre : algorithmes évolutionnaires interactifs, apport de techniques d'apprentissage, approches co-évolutionnaires « parisiennes », optimisation multi-objectif.

Les principes d'évolution Darwinienne simulée peuvent être exploités de façons très variées, et les recherches récentes tendent à prouver le grand potentiel des nouveaux modèles évolutionnaires. Les travaux de l'équipe concernent plusieurs aspects :

- *l'approche évolutionnaire parisienne* : c'est une technique créée au projet FRACTALES, que l'on peut rapprocher des techniques de co-évolution, et qui consiste à formuler la résolution d'un problème, non plus comme la recherche d'un optimum par une population de points dans un espace de recherche, mais comme la recherche d'un état d'équilibre d'une population de « segments » de solution, qui collaborent globalement au sein d'une même population pour constituer la solution recherchée. Il n'est pas toujours possible de formuler tous les problèmes d'optimisation de façon compatible avec cette approche (il faut séparer le problème en sous-problèmes interdépendants), mais quand cela est possible, le gain en efficacité est important. Les applications « parisiennes » que nous avons développées concernent le problème inverse pour les IFS, la stéréovision (algorithme des « mouches ») pour la détection d'obstacles, la compression fractale, et le text-mining.
- *les algorithmes génétiques interactifs* : à partir du moment où l'on fait intervenir un utilisateur humain dans la boucle évolutionnaire (usuellement pour l'évaluation des fonctions de fitness), il faut remettre en question certains aspects importants de l'approche évolutionnaire. C'est un thème de recherche en pleine expansion dans la communauté. Par exemple, si l'on cherche à « optimiser la satisfaction » de l'utilisateur, ce qui est l'approche la plus classique, des considérations de « fatigabilité » interviennent, ce qui impose de développer des mécanismes d'interrogation efficaces (une approche « parisienne » ou une phase d'apprentissage, par exemple). Les travaux de l'équipe concernent l'analyse et le développement de divers modes d'interaction-utilisateur. Nos applications actuelles concernent le text-mining (Elise), le e-learning, et la création artistique (ArtiE-Fract).
- *l'évolution et l'apprentissage* : les domaines de l'apprentissage et de l'évolution artificielle sont complémentaires, et des avancées dans l'un ou l'autre domaine peuvent résulter de leur utilisation conjointe. D'une part l'apprentissage peut aider l'évolution (apprendre quels sont les opérateurs/paramètres performants, quelles sont les régions intéressantes de l'espace de recherche, voire apprendre un modèle de la fonction objectif ...). D'autre part, l'apprentissage lui-même peut être vu comme un problème d'optimisation - voire même d'optimisation multi-critère : la minimisation du risque structurel et de la variance en généralisation (choix de l'espace d'apprentissage) sont à la base de l'apprentissage statistique [57].
- *les algorithmes multi-objectif* : la plupart des problèmes réels mettent en jeu plusieurs objectifs, en général contradictoires (par exemple, minimiser un coût en maximisant une performance technique). Les méthodes les plus utilisées pour résoudre de tels problèmes consistent soit à agréger les objectifs en une fonction unique (e.g. par combinaison linéaire), soit à considérer tous les objectifs sauf un comme des contraintes.

Les algorithmes évolutionnaires offrent une alternative élégante et efficace : remplaçant durant l'étape de sélection la comparaison d'objectifs scalaires par la notion de dominance au sens de Pareto (un point domine un autre s'il est plus performant sur tous les objectifs), et sans (presque) rien changer au reste de l'algorithme, on arrive à échantillonner le *Front de Pareto* d'un

problème multi-objectif, c'est-à-dire à trouver un ensemble de compromis optimaux entre les divers objectifs, en un passage unique de l'algorithme.

Outre le nouveau point de vue apporté par cette approche sur de nombreuses applications, les études en cours concernent le choix entre plusieurs variantes de sélection de Pareto, l'étude de la dynamique de ces algorithmes, entièrement différente de celle des algorithmes évolutionnaires mono-objectifs, et enfin les adaptations des autres composantes de l'algorithmes susceptibles d'améliorer les performances.

### 3.6. Analyse temps fréquence/temps échelle

**Participants :** Michel Guglielmi, Pierrick Legrand, Jacques Lévy Véhel, Olivier Meunier.

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

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 le paradigme est le concept de partition musicale.

L'analyse temps-fréquence repose sur la combinaison des deux variables temps et fréquence dans une même représentation, fournissant ainsi une signature de l'évolution temporelle du contenu spectral. Différentes approches existent : la plus intuitive consiste à limiter temporellement et fréquentiellement les éléments de la famille d'analyse, puis à déplacer en tous points du plan temps-fréquence 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 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  $\rho$  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.

Nous appliquons ces outils à l'analyse de la régularité locale des fonctions.

## 4. Domaines d'application

### 4.1. Trafic sur Internet

**Participants :** Julien Barral, Jacques Lévy Véhel, Stéphane Seuret.

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

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 récentes ont porté sur les causes possibles de multifractalité. Nous avons en particulier montré que le mécanisme de TCP était lui-même responsable d'une certaine multifractalité

## 4.2. Problèmes inverses

**Participants :** Pierre Collet, Evelyne Lutton, Marc Schoenauer.

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

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 à un 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 [59][56][55]. Des études ont été menées dans le projet pour les IFS affines à l'aide d'AG, et dans le cas plus complexe des IFS mixtes 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 [58][52],
- pour l'optimisation d'antennes fractales [49].

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, Ina Taralova.

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

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

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

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

Les inconvénients d'une telle conception sont que le lissage préalable entraîne une perte en localisation, et que l'hypothèse d'un processus  $C^1$  par morceaux sous-jacent n'est pas toujours réaliste : en présence de textures, par exemple, ces détecteurs échouent. En particulier, dans l'application aux images radar, 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  $\alpha$ ) et globaux (via  $f(\alpha)$ ). D'autre part, aucune hypothèse n'est faite quant à la régularité du signal étudié.

On peut ainsi effectuer, sur la base des informations fournies par le spectre multifractal, de la segmentation, du débruitage et de la détection de changement dans des séquences d'images.

### 4.4. Cours financiers

**Participants :** Lotfi Belkacem, Xavier Dumonal, Jacques Lévy Véhel, Christian Walter.

**Mots clés :** *analyse financière, gestion de portefeuille, mBm, processus alpha-stable.*

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  $\alpha$ -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  $\alpha$ -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.

## 5. Logiciels

### 5.1. FRACLAB

**Participants :** Pierrick Legrand, Jacques Lévy Véhel, Christophe Canus.

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 et Scilab. Fraclab est développé sur les environnements Unix, Linux et Windows. Une interface graphique en rend l'utilisation aisée.

Fraclab peut être téléchargé gratuitement (codes sources et exécutables) à l'adresse ftp suivante : <ftp.inria.fr>. Une page internet dédiée à Fraclab se trouve à l'adresse <http://www-rocq.inria.fr/fractales/Software/FRACLAB/>

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. EO : Evolving Objects, une librairie évolutionnaire C++

**Participants :** Pierre Collet, Olga Roudenko, Marc Schoenauer.

**Mots clés :** *algorithmes évolutionnaires, composants logiciels.*

EO (Evolving Objects) est une librairie évolutionnaire en C++ développée en logiciel libre (et diffusée sur le serveur Source Forge). Initialement démarrée à l'Université de Grenade, EO est maintenant soutenue par le réseau d'excellence européen Evonet. Marc Schoenauer est l'un des développeurs principaux de la librairie.

Les deux originalités de EO par rapport à d'autres bibliothèques équivalentes sont d'une part l'indépendance par rapport à tout paradigme courant (tels les algorithmes génétiques, les stratégies d'évolution ou la programmation génétique), d'autre part la complète indépendance entre l'espace de recherche (les objets qui évoluent) et le *moteur d'évolution* [37].

En ce qui concerne l'espace de recherche (les génotypes), outre les types de bases (chaînes de bits, paramètres réels, arbres de la programmation génétique), EO permet d'utiliser n'importe quelle structure de données, offrant même par défaut des opérateurs de variation génériques.

En terme de moteur d'évolution (mécanismes de sélections), EO recouvre bien sûr les moteurs usuels, mais permet en outre des expérimentations sur des types originaux. A noter que le langage EASEA et son interface graphique GUIDE permettent de générer de manière intuitive tout moteur d'évolution. Une prochaine version de GUIDE devrait en outre permettre de créer graphiquement (« à la » Delphi) l'autre versant d'un algorithme évolutionnaire, le génotype et les opérateurs de variation, grâce à la généralité évoquée plus haut.

Plusieurs moteurs multi-objectifs ont par ailleurs été incorporés à EO dans le cadre de la thèse de O. Roudenko. Signalons enfin qu'un ensemble de primitives de parallélisation, comprenant entre autre la distribution des calculs de performances (modèle maître-esclave) et l'évolution de petites populations indépendantes s'échangeant des migrants à intervalles réguliers (modèle en îlots) ont été ajoutés à EO par S. Cahon dans le cadre d'une collaboration avec l'Université de Lille.

### 5.3. 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 recompileable sur n'importe quelle plateforme. La version actuelle du compilateur (sur UNIX et Windows) permet de créer :

- Un source en C++ pour la librairie GALib (librairie assez ancienne, mais largement utilisée)
- Plusieurs fichiers source en C++ pour EO, librairie beaucoup plus moderne (voir section 5.2).
- Plusieurs fichiers sources en JAVA, pour la librairie DREAM (voir section 5.4).

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).

Une interface graphique GUIDE est maintenant disponible de façon à simplifier encore la création de programmes évolutionnaires. Elle est originale car elle permet d'unifier les principaux paradigmes évolutionnaires (AG, ES, EP, ...) et bien d'autres non explorés grâce à une fenêtre regroupant tous les paramètres nécessaires à la spécification d'un algorithme évolutionnaire.

EASEAv0.7 est disponible sur <http://www-rocq.inria.fr/EASEA>

## 5.4. DREAM : Distributed Resource Evolutionary Algorithm Machine

**Participants :** Pierre Collet, Marc Schoenauer.

**Mots clés :** *algorithmes évolutionnaires, composants logiciels.*

DREAM est le nom du projet Européen IST-1999-12679 auquel participent Marc Schoenauer (responsable scientifique pour le Centre de Mathématiques Appliquées de l'Ecole Polytechnique) et Pierre Collet (chercheur à temps plein du projet). Démarré en avril 2000 pour 3 ans, DREAM va donc se terminer dans quelques mois.

Le but de DREAM [32] est de permettre la distribution massive d'algorithmes évolutionnaires sur un réseau étendu (WAN) afin de tester le comportement de ces algorithmes lorsque les tailles de population deviennent très grandes. Le terme d'algorithme évolutionnaire est à prendre ici au sens large, puisqu'il comprend aussi des expérimentations de type simulations de sociétés en économie artificielle et théorie des jeux par exemple.

DREAM se compose de trois couches : la couche basse, ou DRM (Distributed Resource Machine) implante un protocole P2P (Peer To Peer) de communication entre noeuds. Cette couche peut être utilisée directement par des applications diverses, ainsi bien sûr que par la librairie évolutionnaire JEO (Java Evolving Object), écrite en Java à partir des idées développées au cours du développement de la librairie EO (voir section 5.2). A noter que JEO peut éventuellement être utilisée sans le support de la DRM (et donc sans les possibilités de distribution à grande échelle). Enfin, la couche haute utilise le langage EASEA et son interface graphique GUIDE qui est capable de générer du code JEO (voir section 6.9).

Les applications pilotes de DREAM sont les problèmes d'ordonnancement, la fouille de données de grande taille, et la simulation sociétale. Les expériences des faisabilités sont en cours.

## 6. Résultats nouveaux

### 6.1. Analyse de régularité locale

**Participants :** Julien Barral, Jacques Lévy Véhel, Stéphane Seuret.

**Mots clés :** *analyse de régularité locale, espaces 2-microlocaux, algorithmes d'estimation de régularité.*

Nos études concernent la notion générale de régularité locale, pour des fonctions, mesures, processus stochastiques, signaux ou images.

L'analyse 2-microlocale permet de généraliser la notion d'exposant de régularité pour les fonctions en associant à chaque point non plus un seul exposant, mais une courbe appelée *frontière 2-microlocale*. Cela permet d'obtenir une caractérisation plus fine du comportement d'une fonction. En se fondant sur la théorie des ondelettes, nous avons établi un *formalisme 2-microlocal* liant les coefficients d'ondelettes aux frontières 2-microlocales par une transformée de Legendre. Plus précisément, pour toute distribution  $f$ , si on note  $s' \rightarrow \sigma(s')$  sa frontière 2-microlocale au point  $x$ , on a

$$\sigma(s') = \inf_{\rho \in [0,1]} (\rho s' - \chi(\rho)),$$

où la fonction  $\rho \rightarrow \chi(\rho)$  est calculée à partir des coefficients d'ondelettes de  $f$ . L'étude de cette fonction  $\chi$ , appelé *spectre 2-microlocal*, permet de mieux comprendre et d'affiner les notions de régularité locale.

Des développements théoriques et la création d'algorithmes d'estimation de régularité sont exposés dans plusieurs articles à paraître [46].

## 6.2. Processus multifractals à base de séries d'ondelettes

**Participants :** Julien Barral, Stéphane Seuret.

**Mots clés :** *analyse de régularité locale, formalisme multifractal, mesures aléatoires.*

Une activité complémentaire à l'analyse de régularité locale est la recherche de processus à régularité prescrite, au moins presque sûrement. Cela est utile pour la modélisation de phénomènes dont on sait qu'ils sont *multifractals*, i.e. dont la régularité est très fluctuante. Combinant la théorie des ondelettes et la théorie des mesures, nous proposons un nouveau type de processus dont la régularité est modulable et contrôlée. Ces processus sont définis de la manière suivante : si  $\mu$  est une mesure borélienne positive sur  $\mathbb{R}$ , on pose pour tous entiers  $j$  et  $k$ ,

$$d_{j,k} = 2^{-j(s_0 - \frac{1}{p_0})} (\mu([k2^{-j}, (k+1)2^{-j}]))^{\frac{1}{p_0}},$$

où  $s_0$  et  $p_0$  sont deux réels positifs avec  $s_0 - \frac{1}{p_0} > 0$ .

On montre que, si  $\mu$  satisfait un certain formalisme multifractal pour mesures, alors la fonction  $F_\mu$  définie par

$$F_\mu(x) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{j,k} \psi(2^j x - k)$$

hérite des propriétés multifractales de  $\mu$ , et satisfait le formalisme multifractal pour les fonctions [45].

## 6.3. Mesures martingales multipériodiques et multifractales

**Participants :** Julien Barral, Olivier Meunier.

*En collaboration avec Marc-Olivier Coppins et Benoît Mandelbrot.*

**Mots clés :** *mesures aléatoires, martingales, analyse multifractale, produits de Riesz, principe de variations bornées faible, formalisme thermodynamique pour des transformations aléatoires, théorie ergodique.*

Les multifractales se rencontrent naturellement dans de nombreux domaines (turbulence intermittente, DLA, catalyse chimique, TCP trafic, finance). Il est donc important de proposer des modèles dont la construction soit simple, et repose le moins possible sur des paramètres sans rapports avec l'expérience.

Dans ce travail, on construit des mesures multifractales qui sont limites de martingales obtenues par multiplications d'harmoniques d'une fonction  $W$  positive périodique. Ce faisant, on se libère de la structure artificielle d'arbre  $b$ -adique présente dans les modèles de cascades, bien qu'une trace de la base  $b$  persiste dans les harmoniques. Une condition nécessaire et suffisante pour que la mesure limite soit non triviale est établie. Il en résulte le phénomène atypique que la limite n'est qu'exceptionnellement non nulle (elle est nulle pour un ouvert dense de fonctions). Cependant, des simulations numériques montrent clairement qu'une normalisation naturelle rend la construction convergente et non triviale quand  $W$  est assez régulière. Cela est confirmé par la théorie des opérateurs de Perron-Frobenius aléatoires. Il est alors possible de calculer le spectre multifractal des limites non-dégénérées.

L'origine de ce travail est un article de Marc-Olivier Coppins et Benoît Mandelbrot qui propose une manière simple d'engendrer des processus multifractals :

On se donne  $W$  une fonction positive 1-périodique et un entier  $b \geq 2$ , et une suite de phases aléatoires indépendantes et uniformément distribuées dans  $[0, 1]$ ,  $(\phi_n)_{n \geq 0}$ . On considère alors la suite  $(\mu_n)_{n \geq 1}$  de mesures aléatoires dont les densités par rapport à la mesure de Lebesgue,  $\ell$ , sont données par

$$\frac{d\mu_n}{d\ell}(t) = \prod_{k=0}^{n-1} W(b^k(t + \phi_k)).$$

C'est une martingale, dont on espère que la limite  $\mu$  est non presque sûrement nulle, i.e., non dégénérée.

Dans [41], nous établissons une condition nécessaire et suffisante de non-dégénérescence tout à fait différente de celle à laquelle on pourrait s'attendre si l'on se réfère aux autres mesures limites de martingales engendrées par processus multiplicatifs, comme les cascades canoniques ou les cascades associées à un processus de Poisson composé (voir [18]). En particulier, la dégénérescence est générique.

**Théorème** Les propriétés suivantes sont équivalentes :

- (i)  $\mathbb{P}(\|\mu\| > 0) > 0$  ;
- (ii)  $(\|\mu_n\|)_{n \geq 1}$  est uniformément intégrable ;
- (iii)  $\forall n \geq 1, Y_n = 1$  presque sûrement ;
- (iv)  $\|\mu\| = 1$  presque sûrement ( $\mu$  est une mesure de probabilité) ;
- (v)  $\forall n \geq 2 \forall (j_0, \dots, j_{n-1}) \in \mathbb{Z}^n \setminus \{0, \dots, 0\}, \sum_{k=0}^{n-1} j_k b^k = 0 \implies \prod_{k=0}^{n-1} \hat{W}(j_k) = 0$ .

Dans le cas où il y a dégénérescence, l'alternative est de considérer la suite  $(\mu_n / \|\mu_n\|)_{n \geq 1}$ . Si  $W$  est strictement positive et régulière, la théorie des opérateurs de Perron Frobenius aléatoires fournit la convergence de la martingale normalisée.

Ces phénomènes sont illustrés par un programme grâce auquel ces processus sont maintenant intégrés au logiciel FRACLAB. Ce programme, a fait émerger quelques phénomènes et conjectures qui feront l'objet d'un prochain rapport de recherche.

Enfin, dans [41], l'analyse multifractale du processus limite est faite en autorisant un ensemble dense de points de saut pour une classe de fonctions  $W$ , ce qui est également un point nouveau et important.

## 6.4. Analyses multifractales : des « boîtes » au formalisme centré

**Participant** : Julien Barral.

*En collaboration avec Fathi Ben Nasr et Jacques Peyrière (Université d'Orsay).*

**Mots clés** : dimension de Hausdorff, dimension de packing, formalisme multifractal pour les mesures, mesures statistiquement auto-similaires.

Les physiciens utilisent les boîtes d'une grille fine pour estimer la dimension d'un ensemble, et plus généralement le spectre multifractal d'une mesure. Les structures dépendant d'une grille apparaissent également naturellement dans certains systèmes dynamiques et certains processus multiplicatifs. D'autre part, en théorie géométrique de la mesure, on préfère calculer un spectre multifractal défini sans avoir recours à une grille. C'est ce qui a amené Olsen à développer un formalisme multifractal centré.

Dans [42] on donne des conditions suffisantes sur une mesure pour que la validité du formalisme pour une grille entraîne celle du formalisme centré. On obtient notamment la validité du formalisme d'Olsen pour les mesures quasi-Bernoulli et les mesures statistiquement auto-similaires associées à une grille  $c$ -adique.

## 6.5. Echantillonnage et warping fréquentiel

**Participants** : Stéphane Lafon, Jacques Lévy Véhel.

*En collaboration avec Jacques Peyrière (Université d'Orsay).*

**Mots clés** : échantillonnage, espaces de Sobolev, warping, espaces de Paley-Wiener, fonctions de Laguerre généralisées.

Le théorème de Shannon-Whittaker occupe une position fondamentale tant du point de vue des applications (conversion analogique-numérique, filtrage) que du point de vue conceptuel. Cependant il n'est pas adapté à l'analyse de certains signaux, par exemple ceux qui sont modélisés par un processus fractal.

Le but de ce travail est de s'affranchir du cadre naturel de l'échantillonnage de Shannon en utilisant une technique dite de « warping » fréquentiel.

L'idée du warping consiste à appliquer une transformation non linéaire au domaine des fréquences de façon à ce qu'un signal donné ait certaines qualités. Autrement dit, en contractant les fréquences d'un signal autour de l'origine, on peut transformer n'importe quelle fonction en un signal à bande limitée. Il y a évidemment de nombreuses façon d'opérer, et on s'intéresse en particulier au cas où ladite transformation est une isométrie de l'espace de départ (à déterminer) sur un espace de Paley-Wiener (fonctions à bande limitée). On peut alors appliquer la mécanique de la théorie de l'échantillonnage classique au signal obtenu, et revenir à l'espace des fréquences usuelles.

Cette approche a été totalement formalisée en termes mathématiques, ce qui a permis d'identifier :

- une famille paramétrable d'opérateurs de warping,
- la famille correspondante d'espaces de signaux analysables par cette méthode.

L'opérateur de warping constitue une isométrie entre un espace de Sobolev paramétré par une fonction de warping  $\varphi$  et un espace de Paley-Wiener. Par conséquent, à partir des bases hilbertiennes classiques de cet espace, on récupère des bases hilbertiennes de l'espace de Sobolev en question. Appliqué au cas particulier  $\varphi(u) = \tan(u)$ , on obtient les espaces de Sobolev classiques et les bases obtenues sont les fonctions de Laguerre généralisées.

## 6.6. Analyse de données en grande dimension

**Participant :** Stéphane Lafon.

*En collaboration avec R.R. Coifman de l'université de Yale, New Haven, CT, USA.*

**Mots clés :** analyse de donnée, haute dimension, data mining.

Il s'agit de développer des outils permettant d'analyser efficacement des données en grande dimension.

Dans de nombreux domaines, l'accumulation massive de données pose le problème du stockage et du traitement de l'information. Face à d'immenses bases de données, la question qui se pose est : quel type d'information peut-on extraire, et comment procéder ? Le problème se pose par exemple en biotechnologie (micro-tableaux d'expression des genes), pour internet (moteurs de recherche), pour l'analyse des données financières ou en imagerie hyperspectrale.

Ces données sont modélisées comme des objets mathématiques de grande dimensionnalité, et de nombreux algorithmes d'analyse de données sont inapplicables, car leur complexité croît exponentiellement avec la dimension.

Les recherches se concentrent actuellement sur le problème de l'approximation de fonctions. Avec les méthodes usuelles d'approximation (splines, ondelettes, Fourier ...), il faut  $\varepsilon^{-\frac{d}{\alpha}}$  coefficients pour approximer une fonction  $f \in C^\alpha(\mathbb{R}^d)$  avec une précision  $\varepsilon$ . Ce nombre est exponentiel et l'un des objectifs est de déterminer des classes de fonctions « intéressantes » pour lesquelles une compression efficace est possible. Ce travail de recherche a permis de mettre au point un algorithme multirésolution d'analyse de la dimension locale d'une sous-variété en haute dimension. Il s'agit maintenant d'étudier la possibilité d'utiliser cet algorithme à des fins d'approximation et de compression.

## 6.7. Extension à plusieurs paramètres du mouvement brownien multifractionnaire

**Participants :** Erick Herbin, Jacques Lévy Véhel.

**Mots clés :** auto-similarité asymptotique locale, mouvement brownien multifractionnaire, processus à plusieurs paramètres, régularité Höldérienne.

Le mouvement brownien fractionnaire (fBm) a été beaucoup utilisé dans la modélisation de phénomènes aléatoires. Cependant, la régularité Höldérienne de ses trajectoires est constante, ce qui constitue sa principale

limitation. C'est pour pallier celle-ci que le mouvement brownien multifractionnaire (mBm) a été introduit. Celui-ci est paramétré par une fonction  $H$  telle qu'en chaque point  $t$ , la régularité presque sûre des trajectoires est égale à  $H(t)$ . Sur la base des deux extensions classiques du fBm que sont le mouvement brownien fractionnaire de Lévy et le drap brownien fractionnaire, deux types de définition de mouvements browniens multifractionnaires, pour des indices variant dans  $\mathbf{R}_+^N$ , ont été faites dans le but d'une utilisation en traitement d'images ou modélisation de terrains.

- *Le champ brownien multifractionnaire*, extension isotrope du mBm, est défini par

$$X_t = \int_{\mathbf{R}^N} \left[ \|t - u\|^{H(t) - \frac{N}{2}} - \|u\|^{H(t) - \frac{N}{2}} \right] \cdot \mathbb{W}(du)$$

- alors que *le drap brownien multifractionnaire* par

$$X_t = \int_{\mathbf{R}^N} \prod_{i=1}^N \left[ |t_i - u_i|^{H_i(t) - \frac{1}{2}} - |u_i|^{H_i(t) - \frac{1}{2}} \right] \cdot \mathbb{W}(du)$$

Une étude de la régularité des trajectoires a montré qu'en chaque point  $t$ , l'exposant de Hölder ponctuel (resp. local) des trajectoires est presque sûrement égal à l'infimum de  $H(t)$  et de l'exposant ponctuel (resp. local) de  $H$  en  $t$ . Ce cas n'était jusqu'alors pas considéré puisqu'on supposait toujours que la fonction  $H$  restait inférieure à sa régularité.

En outre, une forme faible d'auto-similarité, appelée auto-similarité asymptotique locale, a été montrée. Dans le cas d'une fonction d'exposant  $H$  irrégulier, le processus limite peut être différent d'un mouvement brownien fractionnaire.

## 6.8. Étude théorique et heuristique des stratégies d'évolution

**Participants :** Anne Auger, Marc Schoenauer.

*En collaboration avec Claude Le Bris (Cermics, ENPC).*

**Mots clés :** *stratégies évolutions, Algorithmes évolutionnaires, auto-adaptatif, martingales.*

Les stratégies d'évolutions (ES) sont des algorithmes évolutionnaires utilisés principalement en optimisation paramétrique. Les ES les plus performants à l'heure actuelle (CMA-ES, ...) sont auto-adaptatifs : ils adaptent leur opérateur de mutation en tenant compte du paysage de la fitness. L'état de l'art de l'étude théorique de tels algorithmes se concentre essentiellement sur la fonction de fitness  $x \rightarrow \sum_{i=0}^{dim} x_i^2$ .

Le but de ce travail est l'étude de modèles auto-adaptatifs d'ES sur des fonctions plus générales que la fonction  $x \rightarrow \sum_{i=0}^{dim} x_i^2$ . Les résultats théoriques obtenus portent d'une part sur la convergence presque sûre et  $L^p$  vers un minimum local du processus aléatoire défini par l'algorithme, d'autre part sur des estimations des vitesses de convergence. Ces résultats théoriques sont validés avec succès par de nombreux tests numériques.

Des articles sont en cours d'écriture sur ces travaux en collaboration avec Claude Le Bris.

## 6.9. Analyse de l'efficacité d'un code évolutionnaire

**Participants :** Pierre Collet, Jean Louchet, Evelyne Lutton.

**Mots clés :** *algorithme évolutionnaire, optimisation stochastique.*

Les algorithmes évolutionnaires sont usuellement considérés comme gros consommateurs de temps CPU. Cependant certaines applications récentes, ayant pour ambition de faire des algorithmes peu coûteux (quasi-temps-réel), et certains nouveaux modèles évolutionnaires qui reposent sur une exploitation plus fine des mécanismes Darwinien simulés, amènent à reconsidérer sérieusement certaines idées reçues concernant la complexité calculatoire de ces algorithmes. Nous avons par exemple revisité celle qui consistant à dire que l'étape d'évaluation est le plus gros consommateur de temps CPU (on voit souvent mentionner le fameux seuil des 90% du temps de calcul total). En effet de nombreuses applications de taille réelle ne correspondent pas

du tout à cette répartition. Cette étude est fondée sur une analyse de certains opérateurs « intelligents », et de l'équilibre en termes de complexité algorithmique entre calcul de fitness et opérateurs d'évolution.

Dans des travaux antérieurs, nous avons comparé deux bibliothèques évolutionnaires à l'aide d'un jeu de fonctions-test, ce qui nous a amenés à faire des tests systématiques. Nous avons pu vérifier que le temps de calcul utilisé dans la partie évaluation de fitness était rarement aussi important que ce qui est communément admis.

En fait pour beaucoup d'algorithmes récents, le surcoût calculatoire des opérateurs d'évolution (sélection, croisement/recombinaison, mutation) est très loin d'être négligeable, même dans des cas-test simples. Sans analyse préliminaire précise, il semble ainsi discutable dans de nombreux cas de :

- s'acharner à minimiser le nombre d'appel à la fonction de fitness afin de rendre les algorithmes plus efficaces,
- de mesurer la complexité (et l'efficacité) des algorithmes évolutionnaires en termes de nombre d'appels à la fonction de fitness.

Nous avons observé expérimentalement, sur un grand nombre de cas, provenant aussi bien d'applications réelles que de nos tests systématiques, une disparité de la proportion temps d'évaluation sur temps CPU total variant de 98% à 26%. Nous avons ensuite étudié précisément l'influence d'opérateurs « optimisés » (comme la mutation log-normale auto-adaptative). Ces opérateurs sont souvent très efficaces pour des problèmes de petite dimension mais deviennent coûteux lorsque la taille de l'espace de recherche augmente.

Ainsi, suivant les caractéristiques du problème abordé, il peut être plus judicieux d'optimiser le code de calcul de la fonction de fitness et d'autoriser beaucoup d'évaluations plutôt que de complexifier les opérateurs de façon à réduire le nombre d'appels à la fonction de fitness.

La version 0.7c de EASEA affiche la proportion de temps de calcul passée en évaluation, afin de fournir une indication sur les portions de codes à optimiser en priorité. Un heuristique simple qui ressort de notre analyse consiste à considérer que lorsque le temps d'évaluation est inférieur à 60% du temps CPU total, il est hasardeux de chercher à optimiser l'algorithme en tentant de complexifier les opérateurs.

## 6.10. Liens entre EDAs et EAs

**Participants :** Anne Auger, Vivek Pandey, Marc Schoenauer.

**Mots clés :** *algorithmes à évolution de distributions, Algorithmes évolutionnaires.*

Les algorithmes à évolution de distribution (Evolution of Distribution Algorithms - EDAs) sont des algorithmes d'optimisation, où l'on fait évoluer une distribution de probabilité et non pas une population. A chaque génération de l'algorithme, on échantillonne la distribution, puis on crée une nouvelle distribution (ou on modifie la distribution précédente) à partir d'une sélection d'individus de la population ainsi générée.

Le travail effectué a consisté dans un premier temps à comprendre les points communs entre de tels algorithmes et certains Algorithmes Évolutionnaires (Stratégies d'évolution, algorithmes génétiques avec croisement « SBX », ...). Dans un deuxième temps, l'effet des opérateurs de variations (croisement, mutation) sur des distributions a été modélisé, puis simulé sur des problèmes simples (en dimension 1). Les premiers résultats semblent montrer un avantage de cette approche sur les approches purement EDA (de type PBIL), dans le cas de certains opérateurs de croisement.

## 6.11. Utilisation d'approximations par Machines à Vecteur Support et algorithmes évolutionnaires

**Participants :** Kamal Abboud, Xavier Merlhiot, Marc Schoenauer.

**Mots clés :** *apprentissage automatique, apprentissage statistique, algorithmes évolutionnaires.*

Ces travaux concernent le premier aspect de l'interaction entre évolution et apprentissage décrit section 3.5 à savoir l'utilisation de techniques d'apprentissage statistiques au sein d'algorithmes évolutionnaires.

La thèse de Kamal Abboud est centrée sur l'approche des Machines à Vecteurs Supports (Support Vector Machines ou SVM) : utilisant les points déjà évalués lors des générations précédentes, on construit une approximation de la fonction objectif autour du meilleur individu, que l'on minimise ensuite par une méthode déterministe classique (ici de type BFGS). Le résultat est inséré dans la population comme « enfant » [30]. Les travaux en cours concernent la comparaison de cette approche avec la méthode dite « Surface Response Method » dans laquelle c'est l'ensemble de l'optimisation qui s'effectue sur une approximation de la fonction objectif, ainsi que sur la manière de minimiser le nombre d'évaluations de la vraie fonction objectif.

Durant son stage de DEA, Xavier Merlhiot [47] a utilisé les SVM comme processus de morphogénèse. Le problème est celui de l'identification de fonction (avec en ligne de mire le problème de l'identification de l'isotherme en chromatographie [51]), et l'idée est de représenter la fonction à identifier par un ensemble d'« exemples » : la fonction cherchée est alors le résultat de l'application des SVMs aux exemples en question (les paramètres des SVM pouvant également être incorporés au génotype). Un des avantages de l'utilisation de cette approche est qu'il est alors possible d'ajouter des « vrais » exemples à l'ensemble qui évolue (en chromatographie, par exemple, les chimistes disposent d'un nombre très limité d'exemples, et les approches usuelles ne savent pas les prendre en compte, sauf a posteriori). Quant à l'intérêt des SVM, il apparaît lors du passage en grandes dimensions, où les méthodes d'approximation usuelles cessent de donner des résultats satisfaisants.

Ces travaux ont fait l'objet d'une communication commune à GECCO2002 [29].

## 6.12. Algorithmes évolutionnaires multi-objectifs

**Participant :** Marc Schoenauer.

*En collaboration avec Olga Roudenko, du CMAPX.*

**Mots clés :** algorithmes évolutionnaires, frontière de Pareto.

Olga Roudenko achève une thèse centrée sur les algorithmes évolutionnaires multi-objectifs. Ses activités peuvent se répartir selon trois grands axes :

- Développements algorithmiques, avec en particulier la mise au point et l'étude à la fois théorique et expérimentale d'un opérateur de croisement spécifique au multi-objectif, prenant en compte les relations de domination au sens de Pareto entre les individus de la population.
- Implantation des modèles de sélection les plus courants et les plus efficaces au sein de la librairie EO (voir section 5.2).
- Mise en oeuvre pratique sur des applications.

Dans un travail commun avec Hatem Hamda (CMAP - Ecole Polytechnique) l'optimisation multi-objectif a été appliquée au problème de l'optimisation topologique de formes (coeur de la thèse d'Hatem Hamda, qui doit soutenir en janvier 2003). L'approche utilisée pour ce problème était fondée jusque-là sur la transformation d'un objectif en contrainte. L'approche multi-objectif permet d'obtenir le front de Pareto sur plusieurs problèmes pour lesquels les méthodes traditionnelles (homogénéisation, « fonction level set », ...) sont inapplicables, comme des objectifs mettant en jeu à la fois la rigidité et des valeurs propres [36].

En collaboration avec la société FIAT (Turin), dans le cadre du projet européen *Ingenet*, plusieurs problèmes réels ont pu être abordés, tels l'optimisation de la forme d'un pare-chocs [39], ou l'optimisation des régimes de fonctionnement d'un moteur en vue de respecter les normes de pollution européennes [40].

## 6.13. Modèles évolutionnaires à comportements sociaux et économiques

**Participants :** Pierre Collet, Marc Schoenauer.

**Mots clés :** *algorithme évolutionnaire, optimisation stochastique.*

Dans le cadre du projet européen DREAM, nous développons un nouveau type d'algorithme évolutionnaire cherchant à développer des comportements sociaux et économiques.

Dans les algorithmes traditionnels, lors de chaque génération, de nouveaux individus sont créés de manière « autoritaire » par le moteur évolutionnaire, en ce sens que c'est lui qui détermine grâce à des sélecteurs quels sont les individus à recombinaison pour fabriquer la nouvelle génération.

Une fois que celle-ci est constituée, l'évaluation de tous les descendants a lieu, puis, selon la performance de tous les individus évalués, une phase de remplacement intervient, permettant de ramener le nombre d'individus à la taille d'origine de la population.

Le nouvel algorithme développé prend le nom de mode « MULTI-ACU », car le renouvellement des générations est basé sur une économie dont l'unité monétaire est l'ACU (pour Activation Currency Unit).

A leur naissance, le moteur évolutionnaire donne à chaque nouvel individu un certain nombre d'ACUs, qui leur serviront à décider de ce qu'ils feront. Lors de chaque génération, une fonction d'activation propre à chaque individu est appelée par le moteur évolutionnaire. Cette fonction permet à l'individu d'effectuer des actions, suivant le nombre d'ACUs qu'il possède, sachant que toute action a un coût et que tout individu n'ayant plus d'ACUs se voit éliminé. Une taxe est prélevée à chaque génération pour éviter les oisifs.

Ensuite, suivant leur réussite, chaque action est rétribuée par un nombre d'ACUs déterminé dans le moteur évolutionnaire. Ainsi, les individus peuvent maintenant demander à être recombinaison, ou à subir une mutation, ou à être migrés dans un autre îlot (car l'environnement distribué de la machine DREAM prévoit un certain nombre d'îlots par run).

Suivant la liberté qui leur est conférée, l'espoir est de voir évoluer une forme d'économie et de comportements sociaux (avec par exemple certains individus qui trouveraient leur avantage à prêter des ACUs à d'autres moyennant intérêts, plutôt que de chercher à évoluer, ...).

Lorsque ces expériences sont menées sur plusieurs îlots, une certaine forme de politique gouvernementale pourra aussi apparaître, si les îlots peuvent modifier le coût local des actions, des rétributions, et le montant de la taxe par génération, dans le but d'obtenir les meilleurs résultats de la population gérée.

Un rapport de recherche INRIA décrit l'ensemble de ces interactions, et un prototype est en cours d'implémentation sur la machine DREAM.

## 6.14. Etudes d'outils pour la dissimulation d'information : approches fractales, protocoles d'évaluation et protocoles cryptographiques

**Participants :** Evelyne Lutton, Frédéric Raynal.

*En collaboration avec Pascale Charpin (projet Codes) et Caroline Fontaine (Université de Lille). Frédéric Raynal a soutenu sa thèse en mars 2002.*

**Mots clés :** *watermarking.*

*Glossaire*

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

Certaines solutions de tatouage reposent sur un algorithme de compression fractale, dont le point central est la résolution du problème inverse pour les systèmes de fonctions itérées (IFS). Nous avons développé une méthode d'optimisation stochastique de type évolutionnaire, en l'adaptant à des situations qui autorisent la reconstruction de la solution à partir d'un sous-ensemble de la population (approche parisienne). Cependant, bien que meilleur que les méthodes antérieures pour la résolution du problème inverse pour les IFS, cet algorithme reste calculatoirement trop coûteux.

Par ailleurs, nous avons analysé les éléments d'un schéma de tatouage à base de spectres multifractals. Un spectre multifractal permet d'analyser et de répertorier l'irrégularité locale des points d'une image vis-à-vis d'une mesure de référence. L'idée est de spécialiser ces mesures de références afin de les utiliser pour l'insertion d'information et l'authentification. Si nos tests montrent une bonne robustesse de l'information de régularité, nous n'avons néanmoins pas pu déterminer un critère pour les mesures de référence suffisamment discriminant pour permettre un tatouage raisonnablement fiable.

Parallèlement, une méthode d'évaluation automatique des schémas de tatouage a été élaborée : Stirmark Benchmark repose sur de nombreux tests (transformations géométriques, marquage multiple, taux de fausses alarmes, etc). Ce logiciel, initialement prévu pour des images, a également été adapté pour des fichiers audios.

L'élaboration de ce logiciel a montré l'importance du protocole dans lequel s'inscrit le schéma proposé. Pour étudier cette relation, nous avons étudié l'application des principaux concepts cryptographiques à la dissimulation d'information. Bien que les problématiques diffèrent, nous avons constaté que certaines notions s'intègrent directement dans le schéma (preuve à divulgation nulle de connaissance ou partage de secret) alors que d'autres correspondent plutôt au protocole (aspect asymétrique ou signature numérique).

## 6.15. Analyse de profils routiers

**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.

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 implantées dans la boîte à outils FRACLAB.

Les résultats 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.

Nous avons proposé une méthode de sur-échantillonnage des profils qui permet de conserver la régularité locale. Celle-ci autorise des calculs plus précis pour les modèles de frottement.

## 6.16. Compression fractale par approche évolutionnaire parisienne

**Participants :** Evelyne Lutton, Sébastien Mirabel.

**Mots clés :** *compression fractale, évolution artificielle, approche parisienne.*

Les méthodes de compression fractales à base de systèmes de fonctions itérées sont fondées sur une résolution simplifiée du problème inverse associé (en 3D). Cela peut être compris comme un problème d'optimisation, suffisamment complexe pour qu'une approche évolutionnaire puisse se justifier. Cette étude a consisté à analyser et à améliorer une approche simple de ce problème. Puis à élaborer une approche parisienne, afin de prendre en charge la constitution d'une partition de l'image et la recherche des correspondances entre blocs de façon parallèle. Les premiers résultats obtenus nous ont permis de relâcher certaines contraintes de la méthode classique (sur les tailles relatives des blocs), tout en maintenant un temps de calcul raisonnable.

## 6.17. ArtiE-Fract

**Participants :** Jonathan Chapuis, Evelyne Lutton.

*En collaboration avec Emmanuel Cayla, de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics (CAO).*

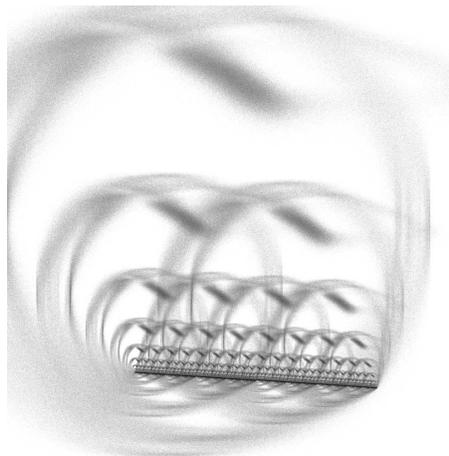
ArtiE-Fract est fondé sur un algorithme évolutionnaire interactif. L'utilisateur contrôle une recherche aléatoire dans un espace de formes fractales, et l'algorithme s'efforce de s'approcher de ce que l'utilisateur recherche consciemment ou inconsciemment, par le biais de l'analyse des évaluations successives d'ensemble d'images présentées à l'utilisateur. ArtiE-ract permet en outre une interaction directe très poussée, grâce aux modèles d'images fractales employés (IFS non-linéaires) de façon à autoriser une réelle démarche créatrice. Ainsi, deux modes d'interaction sont disponibles à tout moment :

- une interaction « passive », où l'utilisateur donne des notes aux images qui lui sont présentées à l'écran (recherche aléatoire orientée),
- une interaction « directe », où les images peuvent être manipulées, modifiées, distordues, géométriquement via des points de contrôle, colorimétriquement ou structurellement, de façon non-triviale. Divers types de morphings et de transformations sont en outre accessibles, pour créer des animations.

La collaboration avec le spécialiste en CAO, Emmanuel Cayla, qui est aussi artiste-peintre a permis d'affiner les outils d'interaction, pour faire d'ArtiE-Fract un outil de design graphique performant et original.



RENARD



ROUE D'EAU

Figure 1. Exemples d'images créées par Emmanuel Cayla à l'aide d'ArtiE-Fract

## 6.18. Simulations de Monte Carlo parallèles compétitives

**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. Benoît Leblanc a soutenu sa thèse en mars 2002.*

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

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.

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.

La simulation moléculaire a pour but de simuler un ensemble de particules en interaction représentant un système physico-chimique. Les algorithmes de Monte Carlo par chaîne de Markov appliqués dans ce cas peuvent rencontrer des problèmes d'efficacité statistique analogues à celles rencontrés par la dynamique moléculaire lors de la simulation de molécules complexe, comme par exemple des polymères. Le but étant d'échantillonner l'ensemble des configurations possibles, en accord avec la distribution de Boltzmann-Gibbs, l'efficacité statistique de tels algorithmes réside dans la capacité à fournir plus rapidement des états décorrélés couvrant l'espace des configurations, constituant ainsi un échantillonnage statistiquement valide.

Nous nous sommes intéressés aux possibilités offertes par l'évolution artificielle (EA, classe d'algorithmes d'optimisation stochastique inspirés du principe biologique de l'évolution darwinienne) pour contribuer à améliorer cette efficacité. Ayant exploré l'utilisation de différentes mesures comme critère d'optimisation, nous avons identifié les fréquences relatives des différents mouvements de Monte Carlo, applicables conjointement lors d'une même simulation, comme degrés de liberté pouvant être optimisés.

Nous avons combiné des simulations parallèles avec un « serveur » génétique afin d'effectuer un échantillonnage tout en optimisant simultanément les fréquences des mouvements de Monte Carlo. Nos simulations ont montré qu'il était possible d'obtenir des améliorations par rapport à des réglages de références, pour les critères considérés.

Adaptant cet outil au cadre du Monte Carlo avec thermalisation parallèle (parallel tempering) nous avons pu améliorer certains de ses paramètres et indiqué des pistes pour améliorer encore le choix des températures additionnelles.

## 6.19. Text-mining par algorithmes évolutionnaires : créativité, transversalité et personnalisation

**Participants :** Yann Landrin-Schweitzer, Evelyne Lutton, Pierre Collet.

*En collaboration avec Thérèse Vachon et Pierre Parisot de IK@N section Knowledge Engineering, Novartis Pharma AG.*

**Mots clés :** *algorithmes évolutionnaires, programmation génétique, text-retrieval, réseaux sémantiques, vocabulaires, extraction de connaissances, personnalisation.*

En appliquant une approche parisienne à un système de programmation génétique, nous optimisons un profil personnalisé permettant d'adapter les méthodes de recherche et l'extraction de documents aux intérêts et particularités des utilisateurs de moteurs de recherche documentaires.

Dans un contexte d'inflation de la taille et de la diversité des bases de données documentaires, disposer d'un outil d'extraction de documents par critères de contenu efficace est devenu nécessaire. Au-delà d'architectures matérielles performantes, l'obstacle de la formulation de critères adaptés persiste, et la multiplication tant des sources de données que des types d'utilisateurs de ces systèmes demande une solution évolutive, adaptée à chaque utilisateur, et capable d'une grande sélectivité. Cela est particulièrement crucial dans le cadre de bases documentaires scientifiques, où il ne s'agit plus d'accéder à un document particulier, mais plutôt d'extraire des idées complémentaires permettant d'étendre une recherche en cours. La construction d'une telle solution par un système automatique, nécessairement incrémentale en l'absence d'informations *a priori*, peut se baser sur une notion de satisfaction de l'utilisateur. Les méthodes de la programmation génétique ont fait leur preuves pour l'optimisation de critères bruités en environnements dynamiques. Par une approche parisienne, nous optimisons, au fur et à mesure des requêtes, un profil utilisateur décrivant des méthodes de réécriture des requêtes entrés. La satisfaction de l'utilisateur, mesurée comme le taux de documents visités parmi ceux

proposés, dirige l'évolution de ce profil. Le prototype développé à montré, par des résultats en ligne avec les outils courants du marché, que cette approche était viable. De manière plus remarquable, il exhibe des propriétés émergentes de transversalité et de créativité : sont listés des documents relevant de processus de réflexion similaires dans des domaines non reliés à la requête, ou proposant une approche originale du sujet, qui n'auraient pas été listés dans un outil de recherche classique basé sur une analyse sémantique.

## 6.20. Optimisation de parcours pédagogique par colonie de fourmis

**Participants :** Pierre Collet, Benoît Leblanc, Evelyne Lutton, Yann Semet.

*En collaboration avec Yannick Jamont et Raphaël Biojout, de PARASCHOOL.*

**Mots clés :** *e-learning, optimisation par colonie de fourmis.*

Le but de ce projet est d'améliorer le logiciel Paraschool d'e-learning, en optimisant le parcours pédagogique proposé à l'élève par une méthode évolutionnaire interactive qui se rapproche des méthodes parisiennes : l'Optimisation par Colonies de Fourmis.

Le logiciel d'e-learning de la société Paraschool propose un soutien scolaire aux élèves de la seconde à la terminale, en mathématiques, physique et français. Il est utilisé sur internet par plusieurs milliers d'utilisateurs, ainsi qu'en réseau local dans de nombreux lycées, et contient des rappels de cours, des exercices et des questionnaires à choix multiples qui permettent aux étudiants de s'entraîner seuls.

Le logiciel original permettait de naviguer de pages en pages grâce à des liens html qui tenaient seulement compte de notions de remédiations ainsi que des items déjà visités. Il ne prenait cependant pas en compte les spécificités dynamiques d'utilisateurs individuels ou collectifs.

La société Paraschool cherchait donc un système permettant d'améliorer la navigation en lui donnant des caractéristiques adaptatives, d'après l'historique de chaque utilisateur. Différents étudiants doivent voir un logiciel différent, adapté à leur niveau et à leurs cas particulier tel qu'il a pu être détecté automatiquement par le logiciel ou par l'enseignant.

Ce projet utilise les Algorithmes à Colonies de Fourmis pour obtenir ce résultat : chaque étudiant qui parcourt le graphe pédagogique est vu par le logiciel comme une fourmi virtuelle qui libère des phéromones virtuelles dans le graphe suivant les réussites et les échecs. Une représentation de l'interaction entre les utilisateurs et le matériel pédagogique émerge ainsi grâce aux informations stigmergiques déposées dans l'environnement.

Cette technique est utilisée pour élaborer des probabilités qui dictent le comportement du logiciel. Un des avantages principaux vient du fait que cette méthode est à la fois adaptative et robuste. Les étreintes mortelles ou convergences du systèmes sont évitées grâce à l'évaporation des phéromones, et les étudiants, en parcourant le graphe, remettent continuellement les probabilités à jour, reflétant ainsi la dynamique de leurs besoins.

## 6.21. Paramétrage interactif d'implant cochléaires par approche parisienne

**Participant :** Pierre Collet.

*En collaboration avec le Pr. Bruno Frachet, chef du service ORL de l'Hôpital Avicenne et Claire Bourgeois-République, doctorante de l'Université de Dijon.*

**Mots clés :** *algorithme évolutionnaire interactif, approche parisienne, bioinformatique.*

L'équipe du Professeur FRACHET permet depuis une dizaine d'années aux sourd profonds d'entendre à nouveau, par l'intermédiaire d'un implant cochléaire placé dans l'oreille interne du patient. Les électrodes de l'implant vont directement exciter les terminaisons neuronales situées le long de la cochlée d'après le traitement du signal effectué par un micro-processeur portable. Bien que les sons « entendus » par les patients ne correspondent plus du tout à ceux résultant d'une audition naturelle, certains arrivent à réapprendre à comprendre le langage parlé et peuvent soutenir une conversation téléphonique.

Cela dit, le paramétrage des prothèses implantées reste extrêmement complexe. La thèse de Claire BOURGEOIS-RÉPUBLIQUE a pour but d'élaborer un logiciel de paramétrage automatique basé sur un algorithme évolutionnaire utilisant une fonction d'évaluation interactive : l'estimation de la qualité du paramétrage par le patient.

Il est très difficile de trouver un paramétrage optimal pour l'implant, principalement car les patients sont tous différents, et ne savent pas bien décrire leurs sensations. Cette complexité est augmentée par le fait que les paramètres à ajuster sont très nombreux.

L'approche parisienne permet de diminuer de manière drastique le nombre d'évaluations pour rendre l'optimisation interactive. Avec l'aide de l'expert, le patient testera les différents paramétrages proposés par l'algorithme et les évaluera à l'aide d'une interface graphique.

Un premier prototype est en cours de développement, pour l'instant il ne prend pas encore en charge la phase de téléchargement des nouveaux paramètres dans le micro-processeur de l'implant cochléaire.

Un contact est pris avec la société MXM (fabricant français d'implants cochléaires) pour que cela soit possible de manière automatique une fois le premier prototype réalisé.

L'utilisation d'algorithmes évolutionnaires pour paramétrer les implants cochléaires permet d'explorer l'espace de recherche de façon beaucoup plus large que ce que peut faire un expert humain, ce qui maximise les chances de trouver un bassin d'attraction menant à un meilleur optimum.

## 6.22. Vision stéréo par approche parisienne : algorithme des mouches

**Participants :** Amine Boumaza, Jean Louchet.

**Mots clés :** *évolution artificielle, vision stéréo, robotique mobile.*

De nombreux travaux de ces quinze dernières années ont montré qu'une grande partie des problèmes d'analyse d'images pouvait se ramener à des problèmes d'optimisation de fonctions irrégulières. Cela a conduit la communauté scientifique à introduire les méthodes d'évolution artificielle comme méthodes de résolution de problèmes en analyse d'images. Cependant la combinatoire des problèmes à résoudre et la complexité des primitives manipulées (régions, contours, polyèdres, surfaces ...) en limite l'application.

L'« approche parisienne » est la base de l'algorithme des « mouches » que nous développons : cela permet de résoudre de manière élégante et rapide des problèmes décomposables comme la stéréovision, ouvrant des perspectives intéressantes d'application en temps réel notamment dans les systèmes mobiles robotisés où la puissance de calcul disponible est réduite.

L'idée est de faire évoluer pendant plusieurs générations une population de point 3D appelés « mouches » dans l'espace, en utilisant une fonction de fitness qui concentre ces derniers sur les surfaces visibles des objets de la scène.

Des résultats en simulation ont montré que cette méthode de reconstruction est bien adaptée au problème de l'évitement d'obstacles en robotique mobile. Nous étudions actuellement son intégration dans un système de navigation en temps-réel d'un robot mobile autonome (collaboration avec le projet IMARA depuis Mai 2002), ce qui nous a amené à adapter l'algorithme au traitement de séquences d'images et à étudier le problème de la fusion de données provenant de capteurs multiples.

## 6.23. Contrôleurs symboliques en robotique évolutionnaire

**Participants :** Nicolas Godzik, Marc Schoenauer.

*En collaboration avec Michèle Sebag (LRI-Orsay).*

**Mots clés :** *robotique évolutionnaire.*

La thèse de Nicolas Godzik est axée sur la robotique évolutionnaire, c'est-à-dire, mettre à la disposition du robot des contrôleurs évolués à l'aide d'algorithmes évolutionnaires. Quelques parties du logiciel EvoRobot de Stefano Nolfi (CNR-Rome) de simulation de Khepera ont été reprises pour créer un nouveau logiciel de simulation de robot Khepera porté sous le système d'exploitation Linux. L'évolution artificielle est désormais



Figure 2. Algorithme des mouches : les points en surimpression représentent la projection sur le couple stéréo de la position des « mouches ».

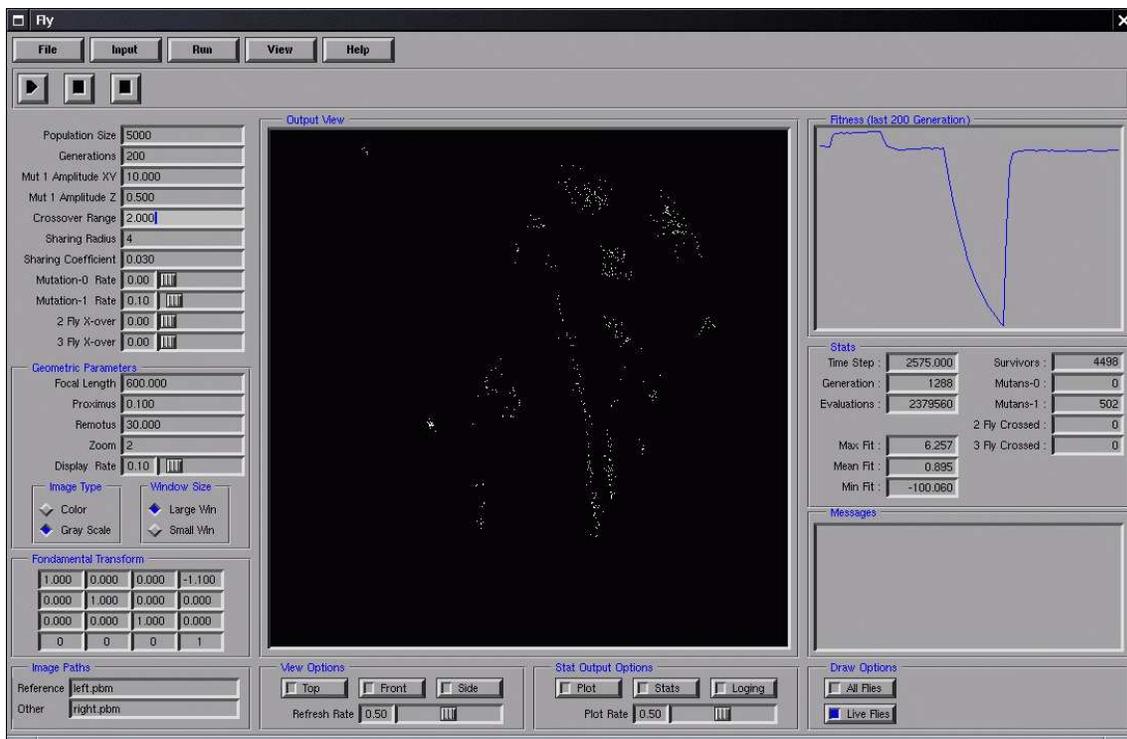


Figure 3. Algorithme des mouches : interface et vue de dessus du nuage de « mouches », évolué sur le couple d'images de la figure 2 : les véhicules et la bordure de la route sont détectés en temps réel.

gérée grâce à la librairie Evolving Objects (voir section 5.2) et la partie graphique a été totalement réécrite en OpenGL (voir section 5.2).

Au niveau conceptuel, l'approche proposée en ce début de thèse se situe entre les travaux de Brooks (procédant de façon déterministe et descendante) et les travaux de Nolfi et Floreano (optimisation d'un contrôleur réseau de neurones « aveugle »). Les limitations de ces deux approches sont pour la première le temps nécessaire pour décomposer une tâche complexe de manière déterministe et efficace, et pour la deuxième une grande difficulté à optimiser un comportement très complexe du fait que le contrôleur s'exprime dans un langage de bas niveau (ex : vitesse des moteurs).

Une première étape vers une approche intermédiaire utilise des contrôleurs dits *symboliques*, dont les sorties correspondent à un choix entre plusieurs comportements de base pertinents pour la tâche à accomplir : aller tout droit, en marche arrière, tourner à droite, à gauche - tout ceci modulé par un paramètre continu, vitesse pour les comportements avançant, angle de rotation pour les comportements tournants. Les performances de ces contrôleurs symboliques sont meilleures que celles des contrôleurs classiques pour l'apprentissage de tâches simples (éviter d'obstacles, recherche de « nourriture », ...).

Une étape suivante a été franchie en mettant en place des contrôleurs de type *superviseur*, gérant des contrôleurs ayant été construits eux-mêmes par évolution, en vue d'une tâche précise (par exemple, éviter d'obstacles, recherche de lumière, ...). Ces superviseurs se sont illustrés en obtenant de meilleures performances que les contrôleurs classiques dans l'expérience d'exploration d'environnement avec recharge de batterie (proposée initialement par Stefano Nolfi et Dario Floreano) - et ils ont également fait preuve d'une meilleure robustesse (par exemple, lorsque le temps de déchargement de la batterie est sensiblement plus court).

L'ensemble de ce travail a été réalisé dans le cadre d'un pré-projet de l'action *ROBEA*, et un compte-rendu détaillé en a été écrit pour les journées *ROBEA* des 24 et 25 octobre [35].

## 7. Contrats industriels

L'équipe a des contrats avec :

- l'IFP : un contrat CIFRE avec l'IFP a financé la thèse de Benoît Leblanc, dont le sujet concerne l'emploi d'algorithmes génétiques en simulation moléculaire.
- 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).
- PARASCHOOL sur l'optimisation évolutionnaire de parcours pédagogique (e-learning).

## 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 en outre principalement développé à l'IRCCYN depuis 2 ans.
- 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, et avec le groupe Géophysique (Andreas Ehinger) sur l'identification de profils de vitesse en prospection pétrolière.
- le projet CODES (Pascale Charpin, et Daniel Augot), sur l'étude du watermarking.

- l'Université de Clermont Ferrand (A. 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'Université de Yale (R. Coiffman) pour l'analyse de données en haute dimension (thèse de S. Lafon).
- l'Université d'Orsay (J. Peyrière) pour l'échantillonnage de fonctions fractales.
- ROBEA : dans le cadre du programme CNRS-INRIA ROBEA (ROBotique et Entites artificielles), la proposition « Évolution de Comités d'Experts pour le contrôle d'un robot autonome » coordonnée par Marc Schoenauer et Michèle Sebag (LRI-Orsay) acceptée au titre de pré-projet en novembre 2001 pour un an. Autres participants : LRI-Orsay et Laboratoire de Mécanique de l'INSA Rouen.
- l'Université d'Orsay, LRI (M. Sebag) sur l'évolution et l'apprentissage.
- Société EADS Launch Vehicles (Max Cerf) sur l'optimisation multi-critère de la configuration des lanceurs consommables.
- Société Dassault Aviation (Jacques Périaux) sur le choix automatique en ligne parmi plusieurs méthodes d'optimisation pour des problèmes en aérodynamique.

## 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 a été largement impliquée dans le développement du logiciel d'algorithmes évolutionnaires européen EO parrainé par EvoNet, et était chargée de l'aspect langage de spécification et interface graphique.

Marc Schoenauer participe au projet européen DREAM (IST-1999-12679 - voir section 5.4).

Dans le cadre des activités mettant en jeu l'apprentissage et l'évolution (voir section 3.5), Marc Schoenauer a été co-coordonateur avec Michèle Sebag (Équipe I&A - LRI-Orsay) de l'*Expression of Interest* pour un projet intégré RGoud (Reaching Goal Using Data), soumise en juin 2002 à l'appel préliminaire du sixième programme européen (FP6). Cette EoI regroupe plus de 60 partenaires, dont les principaux acteurs des domaines de l'apprentissage (réseaux européens MLNet-KDDnet) et des algorithmes évolutionnaires (réseau Evonet). Cette EoI vise à appliquer conjointement les techniques d'apprentissage et d'évolution artificielle à 4 domaines d'applications test : le traitement de données médicales, l'ingénierie numérique en Mécanique des Solides, la simulation des phénomènes de propagation et de diffusion des pollutions atmosphériques, et la fouille de textes.

# 9. Diffusion des résultats

## 9.1. Comités d'organisation

Pierre Collet est trésorier de l'Association pour l'Evolution Artificielle depuis octobre 2000.

Pierre Collet, Evelyne Lutton et Marc Schoenauer sont membre du comité d'organisation du congrès « Evolution Artificielle '2003 », qui aura lieu à Marseille en novembre 2003.

Evelyne Lutton et Jacques Lévy Véhel organisent la prochaine conférence « Fractals in Engineering », qui aura lieu en juin 2004 à Rome.

Evelyne Lutton est secrétaire de l'Association pour l'Evolution Artificielle, depuis Décembre 1994. Elle a été Program Chair de la conférence EuroGP 2002 (3-5 Avril, Kinsale, Ireland).

Marc Schoenauer est président fondateur de l'Association Évolution Artificielle, président de l'AFIA (Association Française d'Intelligence Artificielle) après avoir été 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, depuis sa création en 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

Evelyne Lutton est membre des comités de programme de CEC2003, GECCO2003, EuroGP2003, EvoIASP2003, PPSN 2002.

Marc Schoenauer est membre des comités de Programme de CEC 2003 (tutorial chair), EuroGP 2003, EvoCOP 2003, GECCO 2003, PPSN 2002 (tutorial chair), EMO'03, EUROGEN 2003 (scientific committee).

## 9.3. Comités éditoriaux

Jacques Lévy Véhel :

- Editeur associé du journal « FRACTALS ».
- Relecteur pour les revues suivantes : ACHA, Fractals, TS, IEEE Tr. Sig. Proc.

Evelyne Lutton :

- Relectrice pour les revue IEEE Transactions on Evolutionary Computation, IEEE Signal Processing Letters, Genetic Programming and Evolvable Machine, et IEEE Computer Graphics and Applications.
- Membre du Comité de rédaction de la revue Technique et Science Informatiques (TSI).

Marc Schoenauer :

- Editeur en chef du journal *Evolutionary Computation*, MIT Press, depuis Septembre 2002.
- 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 *Applied Soft Computing* (Elsevier), depuis sa création en septembre 2000.
- Membre du Comité de Lecture de la collection *Mathématiques et Applications* de la SMAI (Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles) depuis janvier 2001.
- Membre du comité éditorial du *Journal of Genetic Programming and Evolvable Machines* (Kluwer) depuis sa création en janvier 2000, et du *Journal of Heuristics* (Elsevier) depuis 1999.

## 9.4. Groupes de travail

Evelyne Lutton et Marc Schoenauer sont membres du comité de pilotage des Journées Evolutionnaires Trimestrielles.

## 9.5. Séminaires

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

Séminaires donnés par les membres du projet :

Erick Herbin :

- 24th European Meeting of Statisticians, Prague, August 19-23, 2002.
- Journées MAS : Modélisation pour les sciences du vivant, Grenoble, 2-4 septembre 2002.

Evelyne Lutton & Jacques Lévy Véhel :

- Tutorial EA & Fractals. PPSN 2002, Grenade, Septembre 2002.

Jacques Lévy Véhel :

- Orateur au Colloque Aléa et Auto-similarité à Orléans.
- 24th European Meeting of Statisticians, Prague, August 19-23, 2002.

Stéphane Seuret :

- Orateur au Congrès Autosimilarité et Applications à Clermont Ferrand.
- Organisation du Groupe de Travail Fractales et du séminaire FHMM.

Marc Schoenauer :

- Séminaire A3, octobre 2001
- Ilog - séminaire interne, décembre 2001
- Université P.&M. Curie, LIP6, février 2002.
- Université de Madrid, décembre 2002.

## 9.6. Enseignement universitaire

Julien Barral :

- Chargé de cours sur les Fractales à l'Ecole Centrale de Paris (6 h).
- Chargé de cours dans le module « Mathématiques financières » du DEA d'Analyse de Montpellier (10h).

Yann Landrin-Schweitzer :

- Cours de Java en DEUG MASS 1ère année, Université Paris Dauphine.

Jacques Lévy Véhel :

- Module « Ondelettes et Fractales » du DEA AIA de l'Ecole Centrale de Nantes (10 h).
- Cours à l'Université de Montréal (Avril 2002).

## 9.7. Autres enseignements

Erick Herbin :

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

Jacques Lévy Véhel :

- Chargé de cours sur les Fractales à l'Ecole Centrale de Paris (6 h).
- Chargé de cours sur les fractales et les ondelettes à l'ENSTA (9 h).
- Chargé de cours sur les Fractales et l'analyse Temps Echelle à l'Ecole Centrale de Nantes (15 h).
- Chargé de cours sur les Fractales à l'ESIEA (15 h).
- Responsable d'un module sur l'analyse fractale à l'INT (6 h).
- 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'Ecole Centrale de Paris (18 h).
- Assistante du cours sur les Fractales à l'ESIEA (3 h).

Marc Schoenauer :

- Professeur chargé de cours à temps partiel à l'Ecole Polytechnique.
- Professeur responsable du cours Optimisation de l'ENPC (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).

## 9.8. Jury de thèses (en tant que rapporteur)

- Jacques Lévy Véhel :
  - C. Melot (Univ. Paris XII),
  - E. Guérin (Univ. Lyon I).
- Marc Schoenauer :
  - Cyril Fonlupt, *Programmation génétique et applications*, Habilitation à diriger des recherches, Spécialité Informatique, Université du Littoral, Calais, décembre 2001.
  - Lionel Jarlan, *Inversion des données des diffusiomètres spatiaux pour le suivi de la végétation en zone semi-aride : application au Sahel africain*. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III, télédétection spatiale, décembre 2001.
  - Daniel Tauritz, *Adaptive information filtering : concepts and algorithms*. Thèse de l'Université de Leiden (Pays-Bas), spécialité informatique, mars 2002.
  - Sibylle Müller, *Bio-Inspired Optimization Algorithms for Engineering Applications*. Thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich - ETHZ, juillet 2002.
  - Frédéric Chapelle, *Évaluation de Systèmes Robotiques et Comportements Complexes par Algorithmes Évolutionnaires*. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, octobre 2002.
  - Pascal Hébrard, *Optimisation d'une zone de contrôle pour la stabilisation de l'équation des ondes*. Thèse de l'Université de Nancy, novembre 2002.
  - Adel Ben Haj Yedder, *Optimisation numérique et contrôle optimal : applications à la chimie moléculaire*. Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, décembre 2002.
  - Bertrand Braunschweig, *Vers la simulation numérique par agents apprenants*, Habilitation à diriger des recherches, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Janvier 2003.

## 9.9. Conférences invitées

Jacques Lévy Véhel a été conférencier invité à l'Université de Yale et à l'Université de Nantes.

Jacques Lévy Véhel et Julien Barral ont été conférenciers invités au congrès annuel de la Société Américaine de Mathématiques, dans la session organisée en l'honneur de Benoît Mandelbrot, en janvier 2002.

Marc Schoenauer a été conférencier invité à la Conférence Eurogen 2001, septembre 2001, Athènes.

# 10. Bibliographie

## Bibliographie de référence

- [1] K. DAUDI, J. LÉVY VÉHEL, Y. MEYER. *Construction of continuous functions with prescribed local regularity*. in « Journal of Constructive Approximation », numéro 03, volume 014, 1998, pages 349-385.

- [2] M. DEKKING, J. LÉVY VÉHEL, E. LUTTON, C. (. 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*. in « Applied and Computational Harmonic Analysis », volume 5, 1998, pages 487-492.
- [4] J. LÉVY VÉHEL. *Fractal Approaches in Signal Processing*. éditeurs C. EVERTSZ, H. PEITGEN, R. VOSS., in « Fractal Geometry and Analysis », World Scientific, 1996.
- [5] J. LÉVY VÉHEL. *Introduction to the multifractal analysis of images*. éditeurs Y. FISHER., in « Fractal Image Encoding and Analysis », Springer Verlag, 1997.
- [6] J. LÉVY VÉHEL, R. VOJAK. *Multifractal Analysis of Choquet Capacities : Preliminary Results*. in « Advances in Applied Mathematics », volume 20, January, 1998, pages 1-43.
- [7] E. LUTTON, J. LÉVY VÉHEL. *Hölder functions and Deception of Genetic Algorithms*. in « IEEE Transactions on Evolutionary computing », numéro 2, volume 2, July, 1998.
- [8] E. LUTTON. *Genetic Algorithms and Fractals - Algorithmes Génétiques et Fractales*. Habilitation à diriger des recherches, Université Paris XI Orsay, 11 Février, 1999, Spécialité Informatique.
- [9] 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.
- [10] R. PELTIER, J. LÉVY VÉHEL. *Multifractional Brownian Motion*. rapport technique, numéro 2645, INRIA, 1995, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-2645.html>.
- [11] C. TRICOT. *Courbes et Dimension Fractale*. Springer Verlag, 1997.

## Livres et monographies

- [12] J. LÉVY VÉHEL, C. WALTER. *Les Marchés fractals*. série Collection Finance, PUF, Février, 2002, Préface de Benoît Mandelbrot, 194 pages.
- [13] éditeurs A. G. TETTAMANZI, C. RYAN, J. MILLER, J. A. FOSTER, E. LUTTON., *Genetic Programming*. série 5th European Conference, EuroGP, Springer Verlag, Kinsale, Ireland, April 3-5, 2002.

## Thèses et habilitations à diriger des recherche

- [14] B. LEBLANC. *Simulations Moléculaires de Monte Carlo : amélioration de l'efficacité statistique de l'échantillonnage grâce aux algorithmes d'évolution artificielle*. thèse de doctorat, Université d'Orsay, 27 mars, 2002.
- [15] F. RAYNAL. *Etudes d'outils pour la dissimulation d'information : approches fractales, protocoles d'évaluation et protocoles cryptographiques*. thèse de doctorat, Université d'Orsay, 1er Mars, 2002.

## Articles et chapitres de livre

- [16] J. BARRAL. *Poissonian products of random weights : uniform convergence and related measures*. in « Rev. Math. Ibero-Amer. », 2002, Accepté pour publication.
- [17] J. BARRAL, B. B. MANDELBROT. *Multifractal products of cylindrical pulses*. in « Prob. Theory Relat. Fields », numéro 3, volume 124, 2002, pages 409-430.
- [18] J. BARRAL, B. MANDELBROT. *Multifractal products of cylindrical pulses*. in « Probab. Theory Relat. Fields. », numéro 3, volume 124, 2002, pages 409-430.
- [19] A. EIBEN, M. SCHOENAUER. *Evolutionary computing*. in « Information Processing Letter », numéro 1, volume 82, 2002, pages 1-6.
- [20] H. HAMDA, F. JOUVE, E. LUTTON, M. SCHOENAUER, M. SEBAG. *Compact Unstructured Representations for Evolutionary Design*. in « Applied Intelligence », volume 16, 2002, pages 139-155.
- [21] E. HERBIN. *From  $N$  parameter fractional Brownian motions to  $N$  parameter multifractional Brownian motions*. in « Rocky Mountain Journal of Mathematics », July, 2002.
- [22] K. M. KOLWANKAR, J. LÉVY VÉHEL. *A time domain characterization of the fine local regularity of functions*. in « JFAA », numéro 4, volume 8, 2002, pages 319-334.
- [23] K. M. KOLWANKAR, J. LÉVY VÉHEL. *A time domain characterization of the fine local regularity of functions*. in « JFAA », numéro 4, volume 8, 2002, pages 319-334.
- [24] J. LÉVY VÉHEL. éditeurs D. S. M. BARNSELY, E. VRSCAY., *Mathematics and its Applications*. série IMA Volumes, volume 132, Springer Verlag, 2002, chapitre Signal enhancement based on Hölder regularity analysis, pages 197-209.
- [25] B. LEBLANC, E. LUTTON, F. AXEL. *Genetic Algorithms as a tool in the study of aperiodic order, with application to the case of X-Ray diffraction spectra of GaAs-AlAs multilayer heterostructures*. in « The European Physical Journal B », numéro issue 4, volume 29, 2002, pages 619.
- [26] J. LOUCHET, M. GUYON, M.-J. LESOT, A. BOUMAZA. *Dynamic Flies : a new Pattern recognition tool applied to stereo sequence processing*. in « Pattern recognition letters », volume 23, 2002, pages 335-345.
- [27] F. MANSANNÉ, M. SCHOENAUER. *An automatic geophysical inversion procedure using a Genetic Algorithm*. éditeurs P. WONG, F. A. M., NIKRAVESH., in « Soft Computing for Reservoir Characterization and Modeling », série Studies in Fuzziness and Soft Computing, volume 80, Physica-Verlag, 2002, pages 331-353.
- [28] S. SEURET, J. LÉVY VÉHEL. *The local Hölder function of a continuous function*. in « Applied and Computational Harmonic Analysis », volume A paraître, 2002.

## Communications à des congrès, colloques, etc.

- [29] K. ABBOUD, X. MERLHIOT, M. SCHOENAUER. *Deterministic Function Learning within Evolutionary Algorithms*. in « GECCO 2002 Workshop Program », pages 148-151, 2002.
- [30] K. ABBOUD, M. SCHOENAUER. *Surrogate Deterministic Mutation : Preliminary Results*. in « EA'01 - Selected papers. LNCS 2310 », Springer Verlag, éditeurs P. C. ET AL. (EDITORS)., pages 103-115, 2002.
- [31] M. ARENAS, P. A. CASTILLO, B. DOLIN, I. F. DE VIANA, J. J. MERELO, M. SCHOENAUER. *JEO : Java Evolving Objects*. in « Proc. GECCO'02 », pages 991-994, 2002.
- [32] M. ARENAS, P. COLLET, A. EIBEN, M. JELASITY, J. MERELO, B. PAECHTER, M. PREUSS, M. SCHOENAUER. *DREAM : A Framework for Distributed Evolutionary Algorithms*. in « PPSN2002 », PPSN2002publisher, éditeurs PPSN2002EDITORS., pages 665-675, 2002.
- [33] M. ARENAS, L. FOUCART, M. SCHOENAUER, J. J. MERELO. *Computación Evolutiva en Java : JEO*. in « Congreso Español de Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (AEB'02) », pages 46-53, 2002, ISBN : 84-607-3913-9.
- [34] P. COLLET, J. LOUCHET, E. LUTTON. *Issues on the Optimisation of Evolutionary Algorithms Code*. in « CEC », Honolulu, USA, May 12-17, 2002.
- [35] N. GODZIK, M. SCHOENAUER, M. SEBAG. *Contrôleurs symboliques en robotique évolutionnaire*. in « Journées ROBEA », Octobre, 2002.
- [36] H. HAMDA, O. ROUDENKO, M. SCHOENAUER. *Multi-Objective Evolutionary Topological Optimum Design*. in « Evolutionary Design and Manufacture », Springer Verlag, éditeurs I. PARMEE., pages 121-132, 2002.
- [37] M. KEIJZER, J. J. MERELO, G. ROMERO, M. SCHOENAUER. *Evolving Objects : a general purpose evolutionary computation library*. in « EA'01 - Selected papers. LNCS 2310 », Springer Verlag, éditeurs P. C. ET AL. (EDITORS)., pages 229-241, 2002.
- [38] B. LEBLANC, E. LUTTON, B. BRAUNSCHWEIG, H. TOULHOAT. *Mixing Monte Carlo moves more efficiently with an evolutionary algorithm*. in « 223rd ACS National Meeting », Orlando, Florida, Avril 7-11, 2002, Accepted abstract to Division of Computers in Chemistry, "CCG Excellence Awards for the Spring ACS National Meeting".
- [39] O. ROUDENKO, T. BOSIO, R. FONTANA, M. SCHOENAUER. *Optimization of car front crash members*. in « EA'01 - Selected papers. LNCS 2310 », Springer Verlag, pages 202-214, 2002.
- [40] O. ROUDENKO, C. RANDAZZO, E. CASTAGNA. *Application of a Pareto-Based Evolutionary Algorithm to Fuel Injection Optimisation*. in « Proc. of Statistics and analytical methods in automotive engineering », pages 81-92, 2002.

## Rapports de recherche et publications internes

- [41] J. BARRAL, M.-O. COPPENS, B. B. MANDELBROT. *Multiperiodic multifractal martingales measures*. rapport technique, numéro 4563, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4563.html>, Soumis aux Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society.
- [42] J. BARRAL, F. B. NASR, J. PEYRIÈRE. *Comparing multifractal formalisms : the neighboring condition*. rapport technique, numéro 4562, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4562.html>, Soumis au Asian Journal of Mathematics.
- [43] S. SEURET, J. LÉVY VÉHEL. *A Time Domain Characterization of 2-microlocal Spaces*. rapport technique, numéro 4545, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4545.html>, 34 pages. A paraître dans "Journal of Fourier Analysis and Applications".

## Divers

- [44] A. AYACHE, A. BENASSI, S. COHEN, J. LÉVY VÉHEL. *Regularity and identification of Generalized Multifractional Gaussian Processes*. Preprint, March 5, 2002, Submitted.
- [45] J. BARRAL, S. SEURET. *From multifractal measures to multifractal wavelet series*. Preprint, 2002.
- [46] J. LÉVY VÉHEL, S. SEURET. *2-microlocal Formalism*. Preprint, 2002.
- [47] X. MERLHIOT. *Identification de fonctions par optimisation évolutionnaire d'ensembles d'apprentissage de SVMs*. Rapport de DEA, Ecole Polytechnique, 2002.

## Bibliographie générale

- [48] R. CERF. *Artificial Evolution, European Conference, AE 95, Brest, France, September 1995, Selected papers*. volume Lecture Notes in Computer Science 1063, Springer Verlag, 1995, chapitre Asymptotic convergence of genetic algorithms, pages 37-54.
- [49] N. COHEN. *Antennas in Chaos : Fractal-Element Antennas*. in « Fractals in Engineering 97 », INRIA, 1997, Hot Topic Session, Arcachon, France, June 25-27.
- [50] T. E. DAVIS, J. C. PRINCIPE. *A Simulated Annealing Like Convergence Theory for the Simple Genetic Algorithm*. in « Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithm », pages 174-182, 1991, 13-16 July.
- [51] A. FADDA. *Identification de fonctions par méthodes évolutionnaires*. thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, 1998.
- [52] B. GOERTZEL. *Fractal image compression with the genetic algorithm*. in « Complexity International », volume 1, 1994.
- [53] D. E. GOLDBERG. *Genetic Algorithms and Walsh functions : I. A gentle introduction, II. Deception and its analysis*. in « Complex Systems », numéro 2, volume 3, April, 1989, pages 129-171.

- 
- [54] J. JULIANY, M. D. VOSE. *The Genetic Algorithm Fractal*. in « Evolutionary Computation », numéro 2, volume 2, 1994, pages 165-180.
- [55] G. MANTICA, A. SLOAN. *Chaotic optimization and the construction of fractals : solution of an inverse problem*. in « Complex Systems », volume 3, 1989, pages 37-62.
- [56] D. J. NETTLETON, R. GARIGLIANO. *Evolutionary algorithms and a fractal inverse problem*. in « Biosystems », volume 33, 1994, pages 221-231, Technical note.
- [57] V. N. VAPNIK. *Statistical Learning Theory*. Wiley, 1998.
- [58] L. VENCES, I. RUDOMIN. *Fractal compression of single images and image sequences using genetic algorithms*. 1994, The Eurographics Association.
- [59] E. R. VRSCAY. *Fractal Geometry and Analysis*. J. Bélaïr and S. Dubuc, 1991, chapitre Iterated function Systems : theory, applications and the inverse problem, pages 405-468, *Kluwer Academic Publishers*.