

ACTIVITÉ DE RECHERCHE

J.-F. BERCHER

Professeur associé,
ESIEE

Modélisation et Simulation
Cité Descartes, Noisy-le-Grand

Une version hypertexte comprenant des liens sur les articles référencés est accessible sur
<http://www.esiee.fr/~bercherj/Documents/Rapport06/Rapport06.pdf>

1 Contexte

Ces quelques pages décrivent mon activité de recherche depuis début 2003, date de l'évaluation précédente. La charge d'un enseignant à l'ESIEE est de 500 heures équivalent TP, et une activité de recherche peut être encouragée par une décharge de 20% d'enseignement, mesure dont j'ai bénéficié. Le renouvellement de cette décharge passe, tous les trois ans, par l'examen d'un rapport de recherche par deux rapporteurs extérieurs à l'institution.

Afin de resituer l'activité de recherche présentée ci-après, je dirai quelques mots sur mon activité d'enseignement. J'interviens pour des cours, travaux dirigés et pratiques en premier cycle comme dans les 3 années du cycle ingénieur, dans le domaine du traitement du signal et des télécommunications : bases du traitement du signal, filtrage numérique, estimation spectrale, traitement d'antenne, filtrage adaptatif, introduction au codage, compression et traitement d'images, synchronisation numérique. Entre avril 1999 et janvier 2002, j'ai été responsable de la majeure télécommunications et traitement du signal, spécialisation couvrant les deux dernières années du cycle ingénieur.

Ce travail comprend deux axes très distincts, qui sont menés parfois alternativement, parfois simultanément.

- Un premier axe correspond à mes intérêts «historiques» pour les notions d'entropie et de théorie de l'information. Il consiste en l'exploitation de concepts issus de la théorie de l'information, et notamment l'étude de mesures d'information ou de complexité appliqué à l'analyse, le filtrage et la restauration de signaux et images, et plus récemment rejoint certaines préoccupations de la communauté de la physique statistique. Ce travail est mené en partie en collaboration avec C. Vignat, maître de conférences à l'Université de Marne-la-Vallée, et bénéficient de nombreuses conversations informelles avec les membres du laboratoire.
- Le second axe correspond à une participation de plus en plus active à une activité d'étude et d'analyse de nouvelles architectures radio pour les émetteurs récepteurs numériques. Il s'agit notamment de l'analyse fonctionnelle, d'analyse spectrale, de problèmes de calcul de performances, de simulation comportementale et d'algorithmes adaptatifs. Ces travaux sont effectués avec C. Berland (Esiee, labo Electronique) et G. Baudoin (Esiee, labo Signaux et Télécommunications).

Nos travaux sur la période concernent en particulier :

1. **Maximum d'entropie sur la moyenne itératif** – Nous étudions une extension de la méthode du maximum d'entropie sur la moyenne permettant la prise en compte de statistiques de bruit d'observation variées et

menant à une mise en œuvre itérative [Holejsovska04](#)]. Le cadre applicatif est typiquement la déconvolution et la reconstruction d'images.

2. **Inégalités sur l'information de Fisher** – Dans le cas de l'information de Fisher, nous avons confirmé et étendu des inégalités caractérisant l'évolution de l'information de Fisher pour des systèmes linéaires non inversibles. [[Bercher02a](#), [Bercher03b](#)]
3. **Analyse dans le plan d'information de Fisher- Shannon** – Pour l'analyse des signaux, notamment dans un contexte non stationnaire, nous avons montré que l'on peut tirer parti de l'étude conjointe des informations de Shannon et de Fisher [[Bercher03a](#)]
4. **Analyse statistique de séquences d'ADN** – Nous avons débuté une étude de séquences d'ADN à l'aide de mesures statistiques. À l'aide de l'information de Kullback, nous avons pu caractériser des séquences répétées. Nous avons pu également bâtir un algorithme de détection de séquences promotrices.
5. **Sur la maximisation de l'entropie de Rényi-Tsallis** – Depuis la mi-2003, je travaille sur l'entropie de Tsallis, à comprendre les raisons de son succès et à établir un certain nombre de résultats sur les propriétés des distributions maximisantes. Présentation [[Bercher04b](#)], congrès [[Bercher06c](#)], article soumis [[Bercher06g](#)].
6. **Architecture des émetteurs-récepteurs numérique** – Un premier travail est mené avec et sur les idées de C. Berland sur les nouvelles architectures d'émetteur-récepteur numériques. Nous avons en particulier obtenu une nouvelle architecture d'émetteur complètement numérique [[Bercher05](#),[Bercher06a](#)]. Sur ce thème, d'autres résultats ont et seront présentés. Un autre travail est mené dans le cadre d'un coencadrement de thèse sur l'analyse d'une boucle à verrouillage de phase à traitement de signal numérique. Nous avons notamment développé un *modèle comportemental complet* [[Bercher06b](#)]
7. **Projet Dreamm** – Je participe à l'action "Traitement du signal" du projet Dreamm, sur le diagnostic automatisé de la maladie de Menière. Ce projet a été sélectionné lors d'un appel d'offre conjoint CNRS-INRIA-INSERM en juin 2005. Pour le moment, les fonds n'ont pas été débloqués et je ne ferai que décrire le contexte de ce projet qui a pris du retard.

Quelques résultats antérieurs. Afin de remettre en perspective l'activité présentée dans ce rapport, je donne ci-dessous très rapidement quelques résultats antérieurs :

1. Développements et implantations sur dsp – Une première application à la fois le développement d'une méthode de traitement du signal (déconvolution binaire adaptative) et l'étude de son implantation. Dans une seconde application, on a examiné la possibilité d'implanter un émetteur-récepteur CDMA, basé sur la norme IS95. Ces deux applications ont été exposées respectivement dans [[Bercher98a](#)] et [[Bercher98b](#)].
2. Estimation de l'entropie de Shannon – Nous avons proposé deux méthodes d'estimation récursive de l'entropie de Shannon. Ceci permet par exemple de mesurer « en ligne » le contenu informationnel d'un signal ; cf [[Bercher00a](#), [Bercher99a](#)]
3. Reconstruction par maximum d'entropie sur la moyenne – Nous avons contribué au développement et à la compréhension d'une structure méthodologique fondée sur le maximum d'entropie, permettant la résolution de problèmes inverses linéaires, cf [[Bercher99b](#)].
4. Déconvolution à l'aide de l'entropie de Rényi – L'étude de l'entropie de Rényi, d'une manipulation plus aisée que l'entropie de Shannon, nous a permis de construire une fonction de contraste et un algorithme de déconvolution de signaux [[Bercher02b](#)].

2 Maximum d'entropie sur la moyenne itératif

La méthode du maximum d'entropie sur la moyenne constitue un cadre interprétatif et constructif de méthodes de résolution de problèmes inverses (typiquement des problèmes de restauration ou de reconstruction de signaux et d'images pour lesquelles les mesures sont insuffisantes et entachées de bruit – synthèse de Fourier, tomographie, projections). Le principe est de considérer l'image (l'objet) inconnue comme la moyenne d'une loi, à maximum d'entropie, et satisfaisant les contraintes d'observation. Des contraintes a priori peuvent être intégrées sous la forme d'une mesure de référence. Une propriété intéressante de cette approche est de conduire à la définition d'un critère strictement convexe (ce qui garantit l'unicité de la solution) prenant en compte

la mesure de référence, et de posséder une approche duale attrayante pour l'implantation [Bercher99b]. Voir également (Amblard 2001), pour une application en imagerie médicale.

Une première stratégie de prise en compte du bruit a déjà été proposée : le problème est résolu en utilisant un « objet étendu » comprenant à la fois l'objet initial et le bruit, ce qui conduit à nouveau à un critère (implicite) convexe. Dans ce travail, on étudie une autre démarche .

L'idée de base est la suivante. La solution du problème sans bruit est la moyenne d'une loi exponentielle par rapport à une mesure de référence. Dans le cas bruité, on peut imaginer de résoudre le problème en remplaçant les observations initiales par la moyenne de la loi a posteriori contruite en utilisant la vraisemblance des observations et la loi à maximum d'entropie comme loi a priori. La procédure est alors à mettre en œuvre de manière itérative : à partir d'un certain jeu de données « moyennes », on détermine les paramètres de la loi à maximum d'entropie (tel que la moyenne de cette loi soit solution du problème inverse pour ce jeu de « données »), puis on remet à jour les « données moyennes » en calculant la moyenne a posteriori (en pratique, cette moyenne est estimée par *Monte Carlo*). En fait, cette procédure est analogue à un algorithme EM écrit pour une famille exponentielle engendrée par la mesure de référence initiale. Ce lien avec une procédure EM permet de prévoir la convergence de l'algorithme. La recherche des paramètres de la loi à maximum d'entropie est équivalente à la recherche de ces paramètres au sens du maximum a posteriori. Celui-ci étant strictement concave pour une famille exponentielle, la solution est en principe unique. La solution du problème inverse est alors également unique. En principe, cette solution définie au départ comme la moyenne de la loi à ME est également la moyenne de loi a posteriori. Une conséquence intéressante de cette approche est enfin la possibilité de caractériser l'estimateur obtenu en utilisant la covariance a posteriori.

J'ai encadré un travail de post-doctorat (Pavla Holejsovska, étudiante tchèque) sur ce sujet en 2003, et, si les résultats sont encourageants et ont donné lieu à plusieurs publications [Holejsovska03a, Holejsovska03b, Holejsovska04], ils ne m'apparaissent pas complètement concluants, et ce travail sera poursuivi, par exemple via un encadrement de stage de Master.

3 Inégalités sur l'information de Fisher

Avec C. Vignat, nous avons repris certains résultats de R. Zamir sur une inégalité matricielle générale pour l'information de Fisher. Cette inégalité permet de borner l'information de Fisher après une transformation linéaire (non inversible) de vecteurs aléatoires. Cette borne fournit alors une fonction de contraste possible pour les problèmes de déconvolution et séparation de sources dans le cas convolutif, sous réserve d'être capable quelque part, d'estimer l'information de Fisher (scalaire) et/ou sa dérivée.

Nous avons obtenu deux nouvelles démonstrations simples et compactes des résultats de Zamir ainsi qu'une extension. Ces résultats ont été présentés dans un symposium sur la théorie de l'information. [Bercher02a] et publiés par le journal JIPAM (*Journal of Inequalities in Pure and Applied Mathematics*) en novembre 2003 [Bercher03b].

D'autre part, le cas discret peut être important pour les applications, notamment en télécommunications. Le problème est alors intéressant, mais difficile : l'information de Fisher n'est pas définie pour des signaux à support discret, et différentes stratégies peuvent être utilisées pour étendre la définition (à partir de l'extension de résultats ou de modèles documentés pour le cas continu – par exemple la convergence vers la loi de Poisson plutôt que vers la gaussienne). À partir de ces extensions, nous cherchons à explorer les inégalités Fisher/Shannon que l'on peut en déduire.

Notons encore dans ce paragraphe sur l'information de Fisher que nous avons défini (non publié) un estimateur de l'information de Fisher (scalaire) fondé sur les statistiques d'ordre, en reprenant la démarche qui conduit à définir l'estimateur de Vasicek pour l'entropie de Shannon. On obtient ainsi un estimateur fonction d'un rapport de dérivées de la fonction quantile, qui se calcule simplement à partir de statistiques d'ordre. Cet estimateur présente, expérimentalement, une variance plus importante que l'estimateur de l'entropie de Shannon correspondant (ce qui peut se comprendre dès la définition de l'information de Fisher qui dépend de la dérivée du logarithme de la densité de probabilité), pour un comportement moyen intéressant. Pour des signaux non-stationnaires, présentant des changements de lois, l'estimateur (implanté à l'aide de fenêtres glissantes) présente un comportement très étonnant, en détectant très précisément et sans ambiguïté les non ruptures. Cet effet peut sans doute s'interpréter comme lié à l'emploi de statistiques d'ordre d'une part, et aux propriétés de divergence de l'information de Fisher lorsque le signal devient déterministe ou à support discret. Encore une fois, il reste

sur ce nouvel estimateur tout un travail à effectuer sur la quantification statistique, sur la compréhension de son comportement et sur des applications, et le temps manque.

4 Plan d'information de Fisher-Shannon

L'entropie de Shannon a été nommée en raison de son analogie formelle avec l'entropie de la thermodynamique. Le lien entre ces deux entropies est en fait plus qu'une analogie, comme cela a été discuté par de nombreux auteurs, à commencer par Brillouin (1962) et Jaynes (1983). Plus récemment, Frieden (1998) a tenté l'unification des différents principes de la physique statistique en s'appuyant sur l'information de Fisher.

Avec C. Vignat, nous nous sommes intéressés aux relations entre l'entropie de Shannon et l'information de Fisher. Différents articles arguent de la supériorité de l'information de Fisher ou de l'entropie de Shannon, suivant les cas. En fait, l'information de Fisher et l'entropie de Shannon présentent nombre de propriétés similaires, qui semblerait autoriser à substituer l'une par l'autre. Cependant, les deux quantités sont reliées par une « relation d'incertitude » (produit de l'information de Fisher et de la puissance entropique supérieur à 1) qui indique que les deux quantités ne doivent pas évoluer conjointement de manière anodine. Cette observation nous a conduit à nous intéresser à une représentation conjointe dans le plan d'information Fisher-Shannon. Nous avons étudié deux familles de densité de probabilité : les Student-t et les gaussiennes généralisées – qui sont des distributions couramment rencontrées en physique et nous avons montré qu'elles peuvent être parfaitement décrites par leurs coordonnées dans le plan Fisher-Shannon. Une évolution des paramètres des lois se traduit alors par une trajectoire dans le plan Fisher-Shannon. Il est alors possible de construire des trajectoires arbitraires dans le plan Fisher-Shannon, ce qui signifie, dans un contexte non-stationnaire, que l'étude d'un seul des deux indicateurs peut être insuffisante (une trajectoire en escalier, par exemple se traduit par des sauts, non simultanés, dans l'information de Fisher et dans l'entropie de Shannon), et qu'aucun des indicateurs n'est plus adéquat que l'autre. Cependant, la représentation n'est pas forcément complète : on peut par exemple trouver des distributions de variances différentes qui partagent la même coordonnée dans le plan Fisher-Shannon, et il peut être alors judicieux de s'intéresser à une représentation Fisher-Shannon-variance (notons que dans le cas des deux familles que nous avons étudié, un point de même coordonnée en Fisher-Shannon-variance correspond à une loi gaussienne qui est l'intersection de nos deux familles). Un article issu de ce travail a été publié dans *Physics Letters A* (juin 2003). [Bercher03a]. Il est amusant de noter que ce travail a permis l'ajout d'une entrée dans *Mathworld*. Par ailleurs, cette idée a été reprise dans le domaine de la biophysique (cf les 3 dernières références ci-dessous)

Quelques références :

Léon Brillouin, *Science and Information Theory*, Academic Press, 1962.

E. T. Jaynes, *E.T. Jaynes : Papers on Probability, Statistics, and Statistical Physics*, R. D. Rosenkrantz ed., Kluwer, 1983

B. Roy Frieden, *Physics from Fisher information : a unification*, Cambridge University Press, 1998

J. Sanchez-Ruiz, J. S. Dehesa *Fisher information of orthogonal hypergeometric polynomials* *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Volume 182 , Issue 1, pp. 150-164, October 2005.

E. Romera and J. S. Dehesa, *The Fisher-Shannon information plane, an electron correlation tool* *The Journal of Chemical Physics*, Volume 120, Issue 19, pp. 8906-8912, May 2004.

Sungchul Ji, *Fisher-Shannon information plane as a cell-state space*, Seventeenth Annual Molecular Biophysics Minisymposium, Friday may 6, 2005, Rutgers University, New Jersey.

5 Analyse statistique de séquences d'ADN

Dans les années 1990, quelques auteurs ont noté que les fréquences d'occurrence de doublets de bases, les dinucléotides, était spécifique de différentes espèces, c'est-à-dire qu'il est possible de classifier les espèces à partir des fréquences des dinucléotides. Plus récemment, Deschavanne et al (Deschavanne 1999) ont étendu cette idée en considérant des mots de plus grande longueur (de 3 à 8 nucléotides), et ces auteurs ont montré que les fréquences de ces différents mots était très spécifique des différentes espèces et que l'on pouvait ainsi classifier

les espèces et retrouver les arbres phylogénétiques. Ceci amène alors à une notion de signature génomique, complètement indépendante de la signification des mots.

Nous avons repris cette idée d'analyse des fréquences d'apparition de mots nucléotidiques (la distribution de probabilité) pour analyser des séquences d'ADN, mais dans un cadre « intra-espèce ». Ce travail est réalisé en collaboration avec deux chercheurs de l'INSERM, unité 468 (Créteil).

Stationnarité — Un premier point consiste à étudier la stationnarité des distributions le long de la séquence ou si l'on peut repérer des dépendances en fonction de la distance (en bases) entre mots. Une première analyse a été réalisée, à l'aide de fenêtres glissantes, en considérant les distributions de probabilité elles mêmes, leur entropie, et une distance de Kullback entre les distributions empiriques, pour différents éloignements. Cette première analyse montre que les distributions semblent à peu près stationnaires et que l'entropie paraît constante (bien que l'on puisse distinguer les isochores). La distance de Kullback permet quant-à-elle de repérer de façon très claire des séquences répétées. Cette étude de stationnarité sera poursuivie avec des mots de plus grande longueur.

Promoteurs — Les gènes sont précédés par une séquence promotrice dont la taille est de l'ordre de 1 à 2kB, avec une partie spécifique de 600 bases. La détection et la localisation des promoteurs de transcription est actuellement un enjeu important en bioinformatique et en génétique moléculaire.

Nous avons bâti des bases d'apprentissage pour les séquences purement génomiques (non codantes), pour des séquences codantes et pour des séquences de promoteurs, à partir des bases de données publiques. En utilisant ces bases, nous avons construit des signatures de référence pour chacune des trois classes. Ces trois classes de signature peuvent être distinguées quantitativement en utilisant une distance de Kullback ou une distance d'Hellinger,

En utilisant un rapport de vraisemblance avec une pondération adéquate, nous avons bâti un classificateur de Bayes "naïf", en testant les rapports de vraisemblance promoteur/genomique or promoteur/codant, nous obtenons un taux de reconnaissance d'environ 80% pour des promoteurs de 600 bases, et nous avons pu confirmer la présence de promoteurs sur des séquences actuellement étudiées à l'unité 468. Des essais sur des séquences documentées nous permettent de retrouver et localiser de manière fiable l'ensemble des promoteurs. Notons que des outils de reconnaissance de promoteurs existent, auxquels notre algorithme peut-être comparé favorablement. Quelques illustrations préliminaires de ces résultats ont été regroupées sur le site <http://www.esiee.fr/~bercherj/DNAStat/DNAStat.html>. Un article sur ce sujet sera présenté au colloque MaxEnt 2006, [Bercher06d].

6 La maximisation de l'entropie de Rényi-Tsallis

Depuis la mi-2003, je travaille sur l'entropie de Tsallis, à comprendre les raisons de son succès et à établir un certain nombre de résultats sur les propriétés des distributions maximisantes. Il me semble être parvenu à un certain nombre de résultats, qui ont été présentés une première fois dans [Bercher04b] et raffinés par la suite. Un article de congrès sera présenté à MaxEnt 2006 [Bercher06c], et un article a été soumis à la revue Physica-A [Bercher06g]. Une premier round a eu lieu et l'article est en cours de refonte (notamment réduction de taille). Je résume les point saillants ci-dessous, à partir du résumé soumis à MaxEnt.

Le formalisme de la mécanique statistique (cf. Tsallis1999, Tsallis2002) non extensive conduit à une distribution canonique, Boltzmann, généralisée, sous la forme d'une distribution puissance appelée facteur de Tsallis, dépendant d'un seul paramètre – l'index entropique, et qui se confond avec la distribution de Boltzmann lorsque l'index entropique tend vers 1. Les résultats de nombreuses mesures, expérimentations, résultats numériques et modèles physiques particuliers, sont compatibles avec une description par une distribution de Tsallis.

Les distributions de Tsallis, aussi appelées (improprement) distributions de Levy, peuvent être dérivées par maximisation de l'entropie de Tsallis (Tsallis1988) sous des contraintes particulières : contrainte de moyenne ou contrainte de « moyenne généralisée » (moyenne dans laquelle la distribution de probabilité est portée à une puissance). Evidemment, ces distributions ne coïncident pas avec celles qui apparaissent via le principe classique de Maximum d'entropie. Par conséquent, elles ne peuvent pas se prévaloir d'une justification probabiliste, parce que la fonction de taux de la théorie des grandes déviations est unique (voir LaCour2000b, Grendar2004). Compte tenu du succès des statistiques non extensive, il devrait, quelque part, y avoir un modèle probabiliste qui conduise à une justification de la maximisation de l'entropie de Tsallis. C'est la réflexion qui a débuté ce travail. On peut noter également qu'il y a un certain nombre d'indications du fait que les résultats de

la statistique non extensive soient particulièrement importants pour des systèmes à la limite ou partiellement à l'équilibre, caractérisés par des fluctuations d'un paramètre intensif (Beck2004a, Wilk2000).

Dans ce travail, je propose une formulation MaxEnt amendée pour le cas de systèmes avec un équilibre déplacé, et je montre que dans ce contexte l'entropie pertinente est l'entropie de Rényi (dont on déduit de manière biunivoque l'entropie de Tsallis). Par ailleurs, j'interprète les contraintes de moyenne utilisées en mécanique statistique non extensive, et donne une justification claire à la notion de moyenne généralisée. J'ai ensuite établi les formes exactes des distributions maximisantes (et noté que la forme couramment reportée dans la littérature n'est pas correcte). Je propose ensuite des procédures numériques permettant d'estimer le paramètre (de Lagrange) de la distribution de Tsallis, et de caractériser les entropies associées.

Je montre en fait que les distributions de Tsallis peuvent être dérivées comme les minimisantes de l'information de Kullback-Leibler à une distribution de référence Q (c'est-à-dire en fait comme les maximisantes de la Q -entropie de Shannon), si la minimisation est conduite avec une contrainte sur la log-vraisemblance moyenne (i.e. une contrainte moyenne sur le rapport logarithmique de proportions), et sur une contrainte (moyenne) d'observation. La log-vraisemblance moyenne caractérise le déplacement à l'équilibre conventionnel. Ceci correspond donc à une formulation maxEnt 'amendée', où on recherche une distribution « intermédiaire » entre deux références, disons P_1 et Q , avec une contrainte supplémentaire qui permet d'ajuster le nouvel équilibre. La solution de ce problème, P^* , est analogue à l'*escort distribution*, qui apparaît plutôt arbitrairement en statistiques nonextensives.

Je présente ensuite deux scénarii pour la contrainte d'observation moyenne : l'observable est la moyenne sous P_1 , la distribution d'un sous-système, ou alors sous P^* , la distribution apparente du système complet (et cette moyenne n'est alors autre que la fameuse moyenne généralisée). Dans les deux cas, je montre que la formulation de MaxEnt 'amendée' conduit à la maximisation de la Q -entropie de Rényi d'ordre α Q -entropy, sujette à la contrainte de moyenne correspondante. On retrouve ainsi les deux choix classiques de contrainte de la littérature de thermostatistique nonextensive. Ces deux scénarii fournissent des distributions de Tsallis d'exposants opposés, et l'index entropique α est tout simplement le paramètre de Lagrange associé à la contrainte de log-vraisemblance.

Une difficulté importante apparaît pour la détermination du paramètre de la distribution de Tsallis. En effet, son expression est implicite, car son expression, comme celle de sa fonction de partition, dépend de sa moyenne statistique (qui n'est pas un simple paramètre du problème). Ceci conduit au fait, notamment, que la fonction duale associée n'est pas calculable ou simulable. Pour identifier le paramètre naturel, je propose alors deux fonctions duales alternatives dont la maximisation numérique conduit au même maximum que la fonction duale à définition implicite, et permet ainsi d'identifier le paramètre optimal.

J'ai ensuite étudié le cas de plusieurs mesures de référence élémentaires, donné les expressions des fonctions de partition et entropies associées, établi (numériquement) leur évolution en fonction de l'index entropique et retrouvé quelques fonctions classiques dans le cas de la limite classique de Boltzmann-Gibbs-Shannon. J'ai étudié également certaines propriétés de symétrie et de dualité entre les solutions obtenues pour les contraintes classique et généralisées, et discuté la structure de Legendre de la thermodynamique que l'on peut associer à ce modèle.

Tous ces résultats sont discutés dans l'article soumis [Bercher06g]. Parmi les prolongements, je peux citer le fait qu'il semble bien que ce modèle permette retrouver la loi zéro de la thermodynamique dans le cas non extensif. Ceci n'est pas le cas jusqu'ici, car la distribution de Tsallis associée à un système composite ne se factorise pas en un produit des distributions de Tsallis sur chacun des sous systèmes indépendants, comme cela se produit pour la distribution d'équilibre de Boltzmann. En reprenant le problème avec l'approche décrite ci-dessus, il semble que cette propriété de factorisation ('*state-product*') soit valide.

7 Apports pour l'architecture des émetteurs numériques

7.1 Architecture EER

C. Berland (Prof associée ESIEE) a une activité de recherche centrée sur les nouvelles architectures d'émetteur-récepteur numériques. Depuis plusieurs années, je travaille avec elle sur ses idées de nouvelles architectures. Nous avons notamment travaillé à la conception et la validation d'une nouvelle architecture d'émetteur numérique pour des modulations à enveloppe variable (les applications visées sont typiquement pour de l'OFDM).

La difficulté est dans ce cas de minimiser les distorsions apportées par l'étage de puissance (non linéarités). Une technique possible est d'utiliser une prédistorsion (adaptative).

Une autre approche consiste à faire fonctionner l'amplificateur en mode commuté en décomposant le signal d'entrée en son enveloppe (module) et sa phase. L'enveloppe est utilisée pour moduler (l'alimentation de) l'amplificateur qui fonctionne en mode commuté avec une « version saturée » de l'entrée sinusoïdale (phase plus porteuse). Il s'agit de l'architecture EER, pour *Envelope Elimination and Restoration*.

Après avoir réfléchi au problème de détermination d'une forme d'onde optimale pour coder l'entrée à l'aide d'une modulation à largeur d'impulsions, j'ai proposé d'utiliser un codage sigma-delta qui permet d'obtenir des performances comparables à l'aide de dispositifs existants. Cette modification de l'architecture l'EER a abouti à une nouvelle architecture d'émetteur complètement numérique. (C. Berland a encadré une étudiante en convention Cifre avec STMicroelectronics Crolles pour la réalisation matérielle de cette architecture dans le cadre d'un financement CIFRE). Un brevet (en une version nationale et une internationale) a été déposé puisque cette nouvelle solution permet de générer un signal à enveloppe constante à partir d'un signal modulé à enveloppe non constante [Bercher05]. Dans le cadre de ce travail, le but étant de retrouver un signal modulé « normal », la restauration de la variation de l'enveloppe se fait en sortie de l'amplificateur de puissance par une simple opération de filtrage. L'avantage de cette architecture réside dans le fait que le signal à l'entrée de l'amplificateur est à puissance constante. Une fois celui-ci généré, l'amplification se réalise simplement sans soucis de phénomènes de distorsion AM/AM et AM/PM. L'amplification peut être réalisée par tout type d'amplificateur (A, B, AB, C, E) et permet d'optimiser les rendements. Ceci a été décrit dans un article qui vient de paraître [Bercher06a]

Des difficultés proviennent du fait que les différents étages analogiques introduisent des retards entre module et phase. Les performances, notamment spectrales, dépendent alors de l'effet de ces décalages, ce qui revient à déterminer la fonction d'autocorrélation du signal produit des module et cosinus de la phase (retardée), où le signal initial peut être approché par un processus gaussien de fonction d'autocorrélation connue. Il s'avère que le problème est très difficile et je n'ai pu obtenir de solution analytique simple — le résultat le plus simple conduit à une double intégration d'un produit de 6 fonctions de Bessel. Finalement, une estimation par Monte-Carlo semble s'imposer, et nous avons décrit cette solution dans un article de congrès [Bercher04a]

Pour compenser les retards entre « voies » (module et phase), j'ai développé deux algorithmes de synchronisation numérique originaux, le premier permettant de compenser les retards lorsque seule l'une des composantes module-phase est décalée par rapport au signal initial ; et le second qui fonctionne en aveugle à partir d'une mesure d'indépendance entre module et phase (en effet, module et phase d'un signal gaussien sont indépendants *au même instant*, mais pas à deux instants différents, ce qui fournit un critère de synchronisation). Cette approche paraît particulièrement originale dans le cadre de la conception d'émetteurs numériques. Nous devrions soumettre un petit article sur ce sujet pour le colloque IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (Nice, Décembre 2006).

Nous pensons également prolonger ce travail en reconsidérant la conception de l'interface air d'un système de communication sous l'angle de l'optimisation matérielle, sous une contrainte de consommation. Avec C. Berland nous avons constitué une petite équipe de 4 personnes et déposé récemment une **proposition d'ANR jeune-chercheur** [PropANR] (C. Berland porteur du projet). Nous avons également déposé un dossier de labellisation auprès du pôle « Ville et Mobilité Durable » et proposé un sujet de thèse sur ce thème, dont le texte est repris ci-dessous :

Dans ce travail de thèse, nous souhaitons reconsidérer la conception de l'interface air d'un système de communication sous l'angle de l'optimisation matérielle, en maintenant la qualité de service tout en l'adaptant au contexte (capteur, interférence co-canal, débit utile). Un point crucial est de minimiser la consommation (autonomie, continuité de service). Il faudra rechercher les solutions qui permettront la réalisation d'un système électronique qui soit faible consommation et faible tension, (encombrement des batteries). La méthodologie adoptée consiste développer une solution expérimentale (prototype logiciel) dans le cas de la bande radio 5,4 Ghz (récemment libérée - décision ANRT janvier 2006). Les points clé et verrous à lever sont les suivants.

- a) Émetteur à haut rendement – Nous proposons de rechercher, définir et étudier des techniques permettant de transformer une modulation quelconque (ou une classe de modulations) en une modulation à une enveloppe constante.
- b) Récepteur faible consommation – Le récepteur idéal pourrait être constitué par un amplificateur faible bruit suivi d'un convertisseur analogique numérique radiofréquence (RF). La limitation des performances liée aux interférents peut être évitée en utilisant un système d'étalement/désétalement RF.

- c) Synchronisation – Les limitations des techniques d'étalement résident dans la synchronisation des signaux reçus et des « signaux d'étalement ». Le troisième verrou à lever est ainsi la définition de stratégies permettant de rendre simple et robuste le dispositif de synchronisation.
- d) Débit variable, codage et cryptage de la transmission – Le débit variable sera géré au niveau des couches logicielle et électronique. L'architecture numérique sera dimensionnée pour permettre la gestion des différentes fréquences d'horloge et le protocole de communication sera adapté.
- e) Plateforme de simulation et validation – Une plate forme de simulation et validation sera développée, en couplant les outils de simulation RF avec des outils de modélisation de systèmes numérique.

7.2 Boucle à verrouillage de phase entièrement numérique

Geneviève Baudoin, Professeure à l'ESIEE, m'a gentiment proposé de co-encadrer un étudiant en thèse Cifre. Il s'agit d'un travail qui a donc débuté en octobre 2004, avec le doctorant, Cyril Joubert, en convention Cifre avec St Microelectronics, (RF Expertise Center - Cellular Terminal Division, Thierry Divel et Serge Ramet) sur le sujet suivant : « Contribution à l'analyse d'une boucle à verrouillage de phase à traitement de signal numérique : stabilité et cycles limites, sources de bruit de phase. »

Une architecture (et même plusieurs) de boucle à verrouillage de phase entièrement numérique a été proposée par B. Staszewski et son équipe (Texas Instrument). Cette architecture est très récente, la publication « complète » datant de 2005 (mais les éléments étaient disponibles avant dans différents articles de conférence). L'idée du travail de thèse est d'analyser cette architecture, de proposer éventuellement des aménagements, et de l'adapter pour un fonctionnement à plus haute fréquence, pour arriver jusqu'à la réalisation d'un prototype. Outre la compréhension du fonctionnement, un premier travail est la *simulation* de l'architecture. Compte tenu des fréquences mises en jeu, cette simulation directe est difficile à envisager car elle conduirait à des temps de simulation considérables et des quantités de données énormes. Pour traiter ce point, et disposer d'un moyen d'ajuster et d'optimiser les différents paramètres de la boucle, nous avons développé un *modèle comportemental complet* du système, qui permet de le simuler avec une charge en calcul très raisonnable. L'article de congrès [Bercher06b] présente ce modèle. A ce sujet, B. Staszewski nous a écrit : « *I read your paper with great interest. Certain passages looked like something I would have written but could not due to the confidential nature of the design and application. I welcome a new and fresh angle on the stuff that I have been working on for quite a long time. I wish we could co-operate on this research. This topic requires a special set of skill and you have excelled.* »

Depuis, nous avons incorporé dans le modèle la simulation des effets de « dithering ». Nous pensons essayer de présenter ce modèle complet dans le cadre d'un article bref au journal IEEE Circuits and Systems. D'autre part, le système comporte deux calculs d'inversion sur des données qui peuvent être variables dans le temps. Nous avons construit deux algorithmes adaptatifs permettant de suivre ces variations et surtout d'alléger le coût de calcul global. Ces deux algorithmes pourront être présentés en congrès, probablement également à IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (Nice, Décembre 2006).

Référence :

R. B. Staszewski and P. T. Balsara, "Phase-Domain All-Digital Phase-Locked Loop," IEEE trans. on circuits and System, vol. 52, no. 3, pp. 159-163, March 2005.

8 Projet Dreamm

Je participe, en tant que membre initiateur et de liaison à l'action "Traitement du signal" au projet Dreamm, sur le diagnostic automatisé de la maladie de Ménière. Ce projet, en partenariat avec le CHU de Clermont Ferrand, l'ESIEE, l'Université Marne la Vallée (J.-C. Pesquet, A. Chevreuil) et l'INRIA Rocquencourt, vise à mettre en place un prototype permettant une estimation rapide de la pression de l'oreille interne ; ceci afin de pouvoir faire naître des thérapeutiques. D'autres applications sont possibles, notamment l'estimation de la pression intra-crâniennes et ceci pour des applications diverses : examen des traumatismes crâniens, exploration en milieu extrême : (pilotes de chasse, scaphandriers). Ce projet [ProjetDreamm] a été sélectionné lors d'un appel d'offre conjoint CNRS-INRIA-INSERM : (de J.L. Coatrieux à Paul Avan en juin 2005) « *J'ai le plaisir de vous faire savoir que le Comité de l'Appel à Projets Santé : Information et Technologies lancé conjointement par le CNRS, l'INRIA et l'Inserm a retenu votre projet. Cet appel a été particulièrement sélectif puisque sur les 107 propositions reçues, seules 8 ont été sélectionnées sur la liste principale et 5 sur la liste complémentaire.* »

Votre projet a été jugé excellent et placé sur la liste principale. Il sera financé à hauteur de 80 keuros. » Pour le moment, les fonds n'ont pas été débloqués et le projet a pris du retard. Je reprends ci-dessous le résumé du projet, et le contenu de l'action « traitement du signal ».

La maladie de Menière, dont souffrent 100 000 patients rien qu'en France, associe des vertiges intenses, très handicapants dans la vie quotidienne, une surdité et des bourdonnements d'oreille. Son évolution par crises s'étale sur dix à vingt ans. Sa cause reste inconnue et son déroulement n'est pas maîtrisé car les traitements proposés, empiriques, sont d'efficacité très inégale. L'ignorance qui entoure cette maladie va de pair avec l'absence de moyens objectifs spécifiques de diagnostic et de suivi. Il y a bien un facteur qui semble commun à tous les malades, mais sa confirmation ne peut être obtenue qu'à l'autopsie : le gonflement d'un des compartiments de l'oreille interne. La présence de ce phénomène fait penser que la maladie de Menière allait de pair avec une mauvaise régulation de la pression dans l'oreille interne. Cependant, faute de moyen d'exploration du vivant du malade, on ignore comment sa pression varie, au décours des crises comme en réponse aux tentatives de traitement. On ne sait donc ni prévoir ni expliquer les crises ni valider les traitements. Nous avons découvert une méthode qui permet d'explorer la pression dans l'oreille interne de manière non invasive. En effet, selon qu'elle appuie plus ou moins sur la chaîne osseuse qui transmet le son à l'oreille interne, elle le modifie de façon caractéristique. Il suffit de détecter comment les sons parviennent aux cellules sensorielles de l'oreille interne pour en déduire la variation de la pression au cours du temps. Nous avons validé un prototype de mesure des réponses acoustiques des récepteurs auditifs permettant efficacement l'extraction des variations de pression et l'identification d'anomalies dans la maladie de Menière. Toutefois ce prototype n'est pas portable, et chez près de la moitié des patients, la réponse acoustique est inexploitable. Pour lever ces obstacles, nous avons réuni 4 équipes complémentaires associant des compétences en biophysique, traitement de signaux très bruités et conception d'architecture embarquable. Le but est de fabriquer un appareil miniaturisé, équipé d'algorithmes plus puissants, avec une électronique adaptée à l'enregistrement des réponses électriques des récepteurs auditifs, beaucoup plus robustes que les réponses acoustiques. L'appareil permettra un diagnostic objectif de pression anormale sur des malades non seulement en crise lors d'une hospitalisation, mais également à domicile. Ceci rendra possible la constitution d'une base de données objectives, seule approche susceptible de mener à une compréhension du déroulement de la maladie de Menière. Au-delà de cette phase exploratoire, en plus de permettre un diagnostic plus rapide, l'appareil aboutira peut-être à rationaliser les moyens de traitement, avec un enjeu portant sur plusieurs millions de malades à suivre pendant des années.

Aspects traitement du signal (responsable UMR 8049) – J.-C Pesquet, A. Chevreuil, J.-F. Bercher L'action "traitement du signal" a pour ambition de sélectionner, concevoir et optimiser les méthodes statistiques et les algorithmes associés permettant la détection des situations pathologiques, l'estimation de la phase des otoémissions et la quantification de la qualité de ces méthodes.

Le problème de traitement du signal se ramène à celui de l'estimation de l'amplitude et de la phase d'une sinusoïde de fréquence connue, avec un rapport signal/bruit très défavorable. Des techniques simples de moyennage après FFT fournissant des résultats préliminaires ont été jusqu'à présent mises en oeuvre de manière totalement empirique.

L'objectif actuel consiste à dégager des méthodes plus sophistiquées permettant d'obtenir des estimations plus fiables du couple amplitude - phase, et de la variance d'estimation, en un temps aussi court que possible, éventuellement sous forme adaptative.

Le premier travail consistera à préciser quantitativement la nature des données disponibles, notamment les caractéristiques statistiques du bruit et les limites de l'hypothèse de stationnarité. Cette pré-étude permettra de calculer des bornes d'estimation statistique qui conduiront à une évaluation des limites de performances atteignables, en fonction du nombre d'échantillons disponibles. Dans un second temps, diverses méthodes d'estimation seront étudiées (maximum de vraisemblance, M-estimateurs, ...) en tenant compte des diverses contraintes techniques (telles que la complexité algorithmique) et physiologiques (par exemple, limitation de la puissance pouvant être émise). On envisagera la possibilité d'exploiter la diversité apportée par la présence conjointe du signal acoustique, éventuellement recueilli à partir de deux microphones, et du potentiel électrique. Les algorithmes choisis seront validés sur une base d'enregistrements. La fourniture correspondant à cet axe de recherche consistera en un rapport présentant les solutions envisagées, leurs performances sur des signaux réels et la proposition d'une solution particulière en liaison avec le travail d'implantation sur le prototype.

9 Divers

Expertises Je suis régulièrement sollicité pour effectuer des expertises pour les revues IEEE transactions on Signal Processing, IEEE Signal Processing Letters et Traitement du Signal.

Amies Je participe, avec C. Florea, au montage d'un gros consortium européen sur le thème des matériaux avancés (Amies : Advanced Materials for Informatics Electronics and systems), comportant des aspects traitement (statistique) de données. Par ailleurs, nous sommes en train de monter, pour la rentrée 2006, un master en cohabilitation avec l'université de Craiova (Roumanie), et des collaborations de recherche.

3e cycle Jusqu'à 2004, j'ai été chargé du cours de « traitement et compression d'images » dans la filière « Analyse et traitement d'images » du DEA d'Informatique Fondamentale et Applications de l'université de Marne-la-Vallée.

Logiciel Un vieux travail a été valorisé, grâce à la ténacité de J.-F. Giovannelli, dit Gio, S. Brette, H. Carfantan, J.-F. Giovannelli, T. Martin, J.-F. Bercher, C. Heinrich, J. Idier, C. Soussen., *Gradient à Pas Adaptatif avec Corrections, une mise en oeuvre Matlab : GPAC.m*, GPI – LSS, Logiciel déposé., Déclaration d'invention n°DI-0258-01, Logibox APP n°21961, IDDN.FR.001.070033.000.S.P.2006.000.10800, France, 2006.

10 Références

- [Bercher98a] C. Leal, C. Meihlac, A. Pesme, J.-F. Bercher, C. Vignat, “**recovering binary data transmitted over unknown communication channels**”, in *Proc. of DSPCONF Texas-Instrument*, Noisy-le-Grand, sept. 1998, pp. 119-124.
- [Bercher98b] D. Janu, G. Baudoin, J.-F. Bercher, O. Venard, “**Design of a CDMA simulator and implementation on a TMS320601**”, in *Proc. of DSPCONF Texas-Instrument*, Noisy-le-Grand, Sept. 1998, pp. 101-106.
- [Bercher99a] J.-F. Bercher, C. Vignat, “**Estimating the entropy of a signal with applications**”, dans *Proc. ICASSP 99, Phoenix*, march 1999.
- [Bercher99b] G. Le Besnerais, J.-F. Bercher, G. Demoment, “**A new look at the entropy for solving linear inverse problems**”, *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 45, n°5, pp.1565-1578, july 1999.
- [Bercher99c] C. Vignat, J.-F. Bercher, “**Un estimateur récursif de l'entropie**”, *actes du dix-septième colloque GRETSI*, Vannes, septembre 1999.
- [Bercher00a] J.-F. Bercher, C. Vignat, “**Estimating the entropy of a signal with applications**”, *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 48, n°6, june 2000.
- [Bercher02a] C. Vignat, J.-F. Bercher, “**Matrix Fisher Information Inequalities for Non-Invertible Linear Systems**”, IEEE International Symposium on Information Theory, Lausanne, Switzerland, June 30-July 5, 2002.
- [Bercher02b] J.-F. Bercher, C. Vignat, “**Renyi entropy convolution inequality with Applications**”, Eusipco 2002, Toulouse, France, September 2002.
- [Bercher03a] C. Vignat, J.-F. Bercher, “**Analysis of signals in the Fisher–Shannon information plane**”, *Physics Letters A*, vol. 312, pp. 27–33, june 2003.
- [Bercher03b] C. Vignat, J.-F. Bercher, “**On Fisher information inequalities and score functions in non-invertible linear systems**”, *JIPAM. Journal of Inequalities in Pure and Applied Mathematics*, vol. 4, no. 4, Article 71, 9 pp., november 2003. 03.
- [Holejsovska03a] P. Holejšovská, Z. Peroutka, J.-F. Bercher, « Adaptive signal processing using maximum entropy on the mean method and Monte Carlo analysis » In : MATLAB 2003, pp 191-196, ISBN 80-7080-526-9.
- [Holejsovska03b] P. Holejšovská, J.-F. Bercher, “**Elimination of the Measurement System Impact on the Measured Data by Maximum Entropy on the Mean Method**”, *Diagnostika '03*, Plzen, pp. 192-195, september 2003, ISSN 80-7082-952-4.
- [Holejsovska04] P. Holejsovska, Z. Peroutka, J. Cengery, J.-F. Bercher, « Continuous Non-Invasive Blood Pressure Measuring Based on the Reconstruction by Maximum Entropy on the Mean Method » In Jirí Jan, Jirí Kozumplík, and Ivo Provazník, editors, BIOSIGNAL 2004 : 17-th Biennial International Eurasip Conference Proceedings, pages 121-123, Brno, Czech Republic, June 2004.

- [Bercher04a] J.-F. Bercher, A. Diet, C. Berland, G. Baudoin, M. Villegas, “**Monte carlo Estimation of Time mismatch Effect in an OFDM EER Architecture**”, IEEE Radio & Wireless Conference RAWCON 2004, sept 2004.
- [Bercher04b] J.-F. Bercher et C. Vignat, « **Levy distributions and the maximization of Rényi-Tsallis entropy** », in “Power laws in probabilities and statistics”, CIRM, march 22-26, 2004.
- [ProjetDreamm] L. Buzer *et al.*, « **Diagnostic de la maladie de Menière** », réponse à l’appel d’offre « Santé : Information et Technologies » conjoint CNRS-INRIA-INSERM, mars 2005.
- [Bercher05] C. Berland, J. F. Bercher, I. Hibon, M. Villegas, D. Belot, D. Pache, V. Le Goasoz, « **Digital Transmitter Architecture** », Brevet FR0405636, publié le 25/05/2004 ; Brevet international US2006034391A1, publié le 16/02/2006.
- [Bercher06a] C. Berland, I. Hibon, J.-F. Bercher, M. Villegas, D. Belot, D. Pache, V. Le Goasoz “**New transmitter architecture for nonconstant envelope modulation**”, *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol. 53, Issue 1, pp 13 - 17, january 2006.
- [Bercher06b] C. Joubert, J.-F. Bercher, G. Baudoin, T. Divel, S. Ramet, P. Level, « **Time Behavioral model for Phase Domain ADPLL based frequency synthetizer** » IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS 2006), january 2006.
- [PropANR] C. Berland, J.-F. Bercher, A. Exertier and Y. Blanchard, « **Architecture Radiofréquence Efficace pour transmissions sécurisées à faible tension, consommation et débit variable** », Proposition ANR jeune chercheur, mars 2006.
- [Bercher06c] J.-F. Bercher, “An amended MaxEnt formulation for deriving Tsallis factors, and associated issues”, accepted in MaxEnt 2006, ([abstract here](#)) Twenty sixth International Workshop on Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering, Paris, France, July 8-13, 2006
- [Bercher06d] J.-F. Bercher, P. Jardin et B. Duriez, “Bayesian classification and entropy for promoter prediction in human DNA sequences”, accepted in MaxEnt 2006, ([abstract here](#)) Twenty sixth International Workshop on Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering, Paris, France, July 8-13, 2006
- [Bercher06e] C. Joubert, J.-F. Bercher, G. Baudoin, T. Divel, S. Ramet, P. Level, « **Contribution to the analysis of a Phase domain ADPLL** » en préparation pour ICECS may 2006.
- [Bercher06f] C. Joubert, J.-F. Bercher, G. Baudoin, T. Divel, S. Ramet, P. Level, « Contribution to the analysis of a Phase domain ADPLL » ([presub here](#)) en préparation pour IEEE Circuits and Systems, 2006.
- [Bercher06g] J.-F. Bercher, “**On the maximization of Rényi/Tsallis Q -entropy**”, Submitted to *Physica A*, here is [Part1](#), and also [Part2](#), september 2005.