

# Bibliographie-Bibliography

G. Battail

March, 2002

## Introduction

**Français.** J'ai dressé une liste de mes publications pour essayer de m'y retrouver. Elle peut avoir aussi une certaine utilité pour d'autres. Cette liste est à peu près complète, sauf pour les publications les plus anciennes. Je n'y ai pas inclus des rapports internes que j'ai rédigés à la Thomson (entre 1966 et 1973) sur des problèmes plus divers que ceux de la liste, mais seulement mentionné les titres de quelques brevets de cette période. La langue employée dans le titre est toujours celle de l'article. Des sommaires de certaines publications (estimées les plus importantes, surtout parmi les plus récentes) précèdent la liste proprement dite. Pour la plupart des articles écrits en français, le résumé en anglais publié avec l'article ('abstract' ou 'summary') est joint au sommaire français; si la langue de la publication est l'anglais, il n'y a le plus souvent qu'un sommaire anglais. J'ai aussi mentionné quelques travaux non terminés qui ont bien peu de chance de l'être un jour, ainsi que des projets dont l'avenir est incertain.

**English.** I compiled a list of publications in order to find my own way in my previous work. It may also have some usefulness for other people. This list is almost complete, except for the oldest publications. I did not include in it reports I wrote when working at Thomson (between 1966 and 1973) concerning more diverse problems than those of the list, but I mentioned the titles of some patents of this time. The language of the title is always that of the paper. Summaries or abstracts of certain publications (those deemed the most important, especially among the most recent ones) precede the list itself. For most of the papers written in French, the abstract or summary in English is appended to the French summary as it was when the paper was published; if the publication language is English, only an English summary is generally provided. I also mentioned few unfinished works which have little chance to be once completed, as well as projects of uncertain future.

## Sur l'emploi des signaux à bande limitée dans la théorie des communications

### Sommaire de [7]

On rappelle d'abord les difficultés et les paradoxes rencontrés dans l'utilisation des signaux à bande limitée en théorie des communications. L'examen critique du concept de spectre suggère de les interpréter en tenant compte du retard, en principe infini, impliqué dans leur définition même. L'hypothèse d'un retard infini paraît suffire en effet à les résoudre. On montre ensuite qu'on préfère systématiquement, dans la technique des communications, la limitation du spectre à la limitation (antagoniste) du retard, au profit de la qualité de transmission (notamment dans les systèmes multiplex).

Les signaux réels pouvant alors être considérés comme des approximations à retard fini des signaux à bande limitée, les seconds définissent une représentation pour les premiers, approchée asymptotiquement quand le retard accepté pour les signaux réels tend vers l'infini. On montre sa simplicité et sa généralité, ainsi que l'intérêt des méthodes qui en découlent, déduites du théorème d'échantillonnage, pour l'étude des systèmes de modulation.

## Décodage par Répliques

### Résumé de [20]

La redondance d'un message implique que chacun de ses symboles peut être reconstitué à partir de plusieurs contextes partiels; autrement dit, on peut calculer plusieurs répliques de chaque symbole en fonction des autres. Le décodage d'un code redondant est interprété dans cette perspective. Une formulation commode permet d'énoncer la règle de décision à vraisemblance maximale sur un symbole à partir d'un ensemble de ses répliques,

dans le cas binaire. On examine d'abord son application aux codes en blocs linéaires. La règle de décision tenant compte de toutes les répliques possibles peut s'exprimer en fonction d'un ensemble exhaustif déduit de la matrice de contrôle du code. Une modification de la règle de décision (qui en conserve la forme générale) en rend le résultat identique à celui de la décision à vraisemblance maximale mot par mot tout en la simplifiant. La restriction à un ensemble de répliques non exhaustif est un moyen de simplification du décodage, au détriment de l'optimalité, qui se réduit au décodage à seuil pour les codes orthogonalisables. Le cas des codes récurrents linéaires est enfin examiné plus sommairement. Les principaux problèmes spécifiques sont alors la réduction à un contexte fini et l'extension de la règle de décision aux codes non systématiques.

### Abstract of [20]

The very redundancy of a message enables to recover each symbol in terms of several partial contexts; in other words, it is possible to compute several replicas of each symbol in term of other ones. Decoding of redundant codes is interpreted according to this viewpoint. A convenient formalism results in the statement of the maximum-likelihood decision rule on a symbol, given a set of its replicas, in the binary case. It is first applied to linear block codes. The decision rule which takes into account all possible replicas is expressed in terms of an exhaustive set of replicas, derived from the parity-check matrix of the code. A modification of the decision rule, which saves its general shape, makes its result coincide with that of word-by-word maximum-likelihood decoding; besides, it simplifies this decision rule. Restricting the set of replicas taken into account also affords simplification of decoding, at the expense of optimality. It results in threshold decoding for orthogonalizable codes. The case of convolutional codes is briefly discussed. The main specific problems are then the restriction to a finite context and the extension of the decision rule to non-systematic codes.

## Replication Decoding, a Method of Soft Decoding

### Abstract of [22]

Redundancy in a code implies that each of its symbols can be recovered in spite of several erasure patterns, so that a number of "replicas" of it can be

computed in terms of other symbols. This remark is used as a foundation of soft decoding, considered as a diversity reception problem.

For linear  $q$ -ary block codes, the replicas are expressed in terms of the dual-code words. In the case of soft decision demodulation and memoryless channel, the maximum-likelihood decision rule is stated, in terms of a number of replicas. We show it takes into account not only the replicas explicitly considered, but all replicas resulting from them by linear combination. Its implementation can be simplified by duality transformation or by a sequential method. Finally, approximate computation of residual error rate is considered, in the binary case.

## Replication Decoding

### Abstract of [25]

Any symbol in a redundant code can be recovered when it belongs to certain erasure patterns. Several alternative expressions of a given symbol, to be referred to as its replicas, can therefore be computed in terms of other ones. Decoding is interpreted as decoding upon a received symbol, given itself and a number of such replicas, expressed in terms of other received symbols. For linear  $q$ -ary  $(n, k)$  block codes, soft-decision demodulation and memoryless channels, the maximum-likelihood decision rule is formulated in terms of  $r \leq n - k$  linearly independent replicas from the parity-check equations. All replicas deriving from the  $r$  selected replicas by linear combination are actually taken into account in this decision rule. Its implementation can be direct, use transformations or a sequential circuit implementing a trellis representation of the parity-check matrix. If  $r = n - k$ , decoding is optimum, in the sense of symbol-by-symbol maximum-likelihood. Simplification results in the transformed and sequential implementation when  $r < n - k$ . If the selected replicas are disjoint, generalized ( $q$ -ary, weighted) threshold decoding results. The decoding process can easily be modified in order to provide word-by-word maximum-likelihood decoding. Convolutional codes are briefly considered. Two specific problems are discussed: the use of previous decisions, which leads to a weighted generalization of feedback decoding, and the extension of replication decoding to non-systematic codes.

## An adaptive communication system for joint use of parallel channels

### Excerpts from the introduction of [26]

We assume that  $n$  parallel binary symmetric channels are available. Each of them has its own error probability and it is used in order to communicate one of the  $n$  bits of a word which belongs to an  $(n, k)$ ,  $k < n$ , linear code, to be denoted by  $\mathcal{C}$ . Figure 1 depicts the system considered in its most general form. Figure 2 represents the particular case where a mere  $(n, 1)$  repetition code is employed. This case will be helpful at a first step to obtain basic results, which will then be easily extended to the general case.

The  $n$  parallel channels are assumed to be stationary or almost stationary (i.e., slowly varying), but to have ill-known or even unknown characteristics. We shall show that a comparison of each channel output with the corresponding decoding decision enables determining factors such that the output of each channel (hence each decoder input) can be weighted in order to optimize the decoding decision. Moreover, we assume the decoder outputs themselves are weighted, so the reliability of decoding itself is taken into account. If some of the channels are very poor, weighted-input decoding suppresses the corresponding decoder inputs to the benefit of overall reliability. This system is *adaptive* since the necessary information for weighting the decoder inputs is exclusively drawn from its very operation.

A typical application of this system is digital communication through the ionospheric channel, using multiple-subcarrier modem and subject to selective fading or possible presence of jammers. Each subcarrier corresponds to a particular channel of the model [30]. Many other possible applications of this system can obviously be found.

Remark: this text is that of the communication I presented at ISIT, June 1979, Grignano, Italy, as rewritten in 2001.

## Initiation aux communications

### Contenu de [28]

Exposé didactique introduisant les principaux concepts de la théorie des communications et de l'information en prenant la communication orale pour exemple initial.

### Content of [28]

Didactic discussion introducing the main concepts of communication and information theory starting from the example of oral communication.

## Coding for radio channels

### Abstract of [30]

The conventional remedy to time and/or frequency variability of radio channels is diversity. Redundant coding is a kind of diversity, as each coded symbol can be recovered from other symbols. Only linear binary block codes are considered. Any binary random variable can be represented by its *algebraic value*, a real number whose sign indicates its most likely value and whose absolute value measures the probability of this value. The algebraic value of a received binary symbol is itself a random variable, whose distribution obeys a particular constraint. The algebraic value associated with the maximum likelihood decision on a binary symbol, given a set of independent replicas of it, and that associated with the sum modulo 2 of binary random variables are also considered. The symbol-by-symbol decoding is then analysed in the case of threshold decoding, then in the general case. An approximate bound on the decoding error probability for additive Gaussian noise and coherent demodulation is used to assess the advantage of coding when unequal-energy symbols are received, according to a deterministic or Rayleigh distribution. Simulation results are given for the Hamming (15,11) code. Coding affords a significant advantage provided the channel is good enough, while conventional diversity always provides gain.

## Exploitation de redondance et étalement de spectre

### Sommaire de [33]

On considère les rôles respectifs du codage de canal et de l'étalement de spectre dans un système d'accès multiple. L'étude est basée sur la géométrie de l'espace des signaux, d'abord pour un bruit additif, gaussien, stationnaire et blanc. Le codage introduit une redondance exploitable pour la protection contre le bruit et produit un accroissement irréductible du nombre de dimensions de l'espace des signaux. L'étalement de spectre consiste à n'en utiliser qu'un sous-espace. Pour un canal variable mais localement stationnaire et blanc, on montre

que l'étalement de spectre (à saut de fréquence) effectuée une moyenne sur le rapport signal à bruit. La convexité de la variation de la probabilité d'erreur après décodage en fonction du rapport signal à bruit entraîne une forte amélioration. Cette conclusion paraît subsister pour des canaux et des systèmes d'étalement de spectre beaucoup plus généraux.

### Summary of [33]

The author considers the respective parts of channel coding and spectrum spreading in a multiple access system. The study relies on signal-space geometry, first assuming the noise to be additive Gaussian stationary and white. Coding introduces redundancy as a means for noise protection, thereby irreducibly increasing the signal-space dimensionality. Spectrum spreading consists of using only a sub-space of it. In the case of a varying channel, which however may locally be considered as stationary and white, it is shown that spectrum spreading (by frequency hopping) acts as averaging the signal-to-noise ratio. The error probability after decoding being a convex function of the signal-to-noise ratio, such an averaging results in a significant improvement. This conclusion seems to remain true for a wide range of varying channels and spread spectrum systems.

## Description polynomiale des codes en blocs linéaires

### Analyse de [34]

Un code en blocs linéaire étant donné, on définit une matrice carrée contenant à la fois ses matrices génératrice et de contrôle. En associant deux jeux d'indéterminées à ses lignes et à ses colonnes respectivement, on définit deux polynômes qui décrivent l'ensemble des combinaisons linéaires de ses lignes d'une part, de ses colonnes d'autre part. On montre que la représentation polynomiale de la liste des mots du code, celle de ses classes latérales, ainsi que leurs homologues pour le code dual, s'en déduisent en donnant des valeurs particulières à certaines indéterminées. L'article est consacré aux propriétés mathématiques de ces polynômes, notamment à des relations entre eux qui généralisent l'identité de MacWilliams. Le formalisme ainsi introduit est à la base d'une représentation des codes linéaires par le diagramme du treillis, et on envisage quelques applications à des problèmes de décodage, thèmes d'études ultérieures. L'article proprement dit est restreint au cas binaire, mais la généralisation de

ses principaux résultats à un corps fini quelconque est traitée en annexe.

### Abstract of [34]

Given a linear block code, a square matrix is defined, which contains both its generator and parity-check matrices. Associating two sets of indeterminates with its rows and its columns, respectively, enables defining two polynomials which describe the set of linear combinations of its rows and its columns, respectively. It is shown that the polynomial representations of the code (as a list of words), of its cosets, and of the dual code and its cosets, result from giving certain of their indeterminates particular values. The paper is devoted to mathematical properties of these polynomials, especially to relations of each other which generalize the MacWilliams identity. The formalism thus introduced leads to trellis representation of linear block codes, and applications to decoding problems are finally suggested as possible future research topics. The paper in itself is restricted to the binary case, but the extension of its main results to any finite field is dealt with in the appendix.

## Décodage pondéré optimal des codes linéaires en blocs I.- Emploi simplifié du diagramme du treillis

### Analyse de [36]

On envisage le décodage pondéré, à vraisemblance maximale mot par mot, des codes  $q$ -aires linéaires en blocs. Tous les mots d'un tel code sont représentés par un diagramme en treillis, précisément défini grâce à la représentation du code par un polynôme à plusieurs indéterminées. On définit en fonction des probabilités *a priori* une 'cote' associée aux chemins en les nœuds du treillis, qui est une fonction non croissante du niveau de nœud et telle que le mot qui atteint la plus grande cote au dernier niveau de nœud (cote finale) est le meilleur pour le critère de vraisemblance maximale. Le décodage peut alors utiliser l'algorithme de Viterbi mais, si la cote finale d'un chemin particulier est connue, les nœuds du treillis de cote supérieure peuvent seuls appartenir au meilleur chemin. De plus, dès que l'on trouve un chemin meilleur que le chemin initialement considéré, sa cote finale sert de nouveau seuil pour la cote des nœuds, au dessous duquel il n'y a plus

à en tenir compte. Le seuil initial adopté est la cote finale du chemin spécifié par le résultat de la décision ferme sur les  $k$  premiers symboles,  $k$  étant la dimension du code. On montre de plus que son calcul fait intervenir celui du syndrome. On examine la stratégie d'exploration des autres chemins. On montre qu'un classement des symboles par fiabilité décroissante rend minimal le volume de calcul nécessaire en moyenne. Pour terminer, des moyens de simplifier davantage au détriment de l'optimalité sont brièvement décrits.

### Abstract of [36]

Maximum likelihood, word-by-word soft decoding of linear  $q$ -ary block codes is considered. All code-words are represented by a trellis which is precisely defined using multiindeterminate polynomial representation of the code. A metric is defined in terms of the *a priori* probabilities, associated with the paths at the trellis nodes, such that it is a non-increasing function of the node level and that the word of largest metric at the terminal node level (terminal metric) is the best one according to the maximum likelihood criterion. Then decoding may use the Viterbi algorithm but, if the terminal metric of a particular path is known, only nodes of larger metric need be considered. Moreover, once a path better than the initial one is determined, its terminal metric sets a new threshold, below which they have no longer to be considered. For setting the initial threshold, the path determined by the hard decision on the first  $k$  symbols is used ( $k$  is the code dimension). The author shows that computing its terminal metric is related to syndrome computation. He discusses the strategy for exploring the other paths. Minimizing the decoding effort results if the symbols are reordered in terms of their reliability. Finally, means for further simplifying at the expense of optimality are briefly discussed.

## Débits critiques en transmission non binaire orthogonale avec décisions fermes ou pondérées

### Analyse de [37]

Dans le cas binaire, l'emploi de décisions pondérées au lieu de décisions fermes apporte un bénéfice bien connu : en présence de bruit additif, gaussien et blanc, la capacité du canal et le débit critique  $R_0$  sont multipliés par un même facteur égal à  $\pi/2$  (ce résultat est la limite obtenue lorsque le rapport sig-

nal à bruit tend vers 0). Cet article est consacré à évaluer le bénéfice dû à des décisions pondérées, mais pour un alphabet non binaire et un système de modulation orthogonal. On examine les deux cas de réception cohérente et non cohérente. Outre la limite pour un rapport signal à bruit qui tend vers 0, on calcule dans chacun des cas le débit critique  $R_0$  en fonction du rapport signal à bruit. Les résultats sont présentés graphiquement, mais certaines grandeurs sont données sous forme de tables.

### Abstract of [37]

In the binary case, the use of soft decisions instead of hard ones is well known to provide a benefit: in the presence of additive Gaussian and white noise, the channel capacity and its cut-off rate  $R_0$  are both multiplied by  $\pi/2$  (this results obtains in the limit as the signal-to-noise ratio approaches zero). This paper is intended to evaluate the benefit due to soft decisions, but assuming a non binary alphabet and an orthogonal modulation system. Both coherent and noncoherent receivers are considered. Besides the limit for a vanishingly small signal-to-noise ratio, the cutt-off rate  $R_0$  is computed in every case in terms of the signal-to-noise ratio. The results are graphically presented but certain numerical values are given in tables.

## L'évolution du codage vue par un ingénieur, ou la dialectique de la fin et des moyens

### Résumé de [38]

On envisage l'évolution du codage d'un point de vue délibérément subjectif. Shannon a montré en 1948 que le bruit limite le débit d'information possible à travers un canal et non la qualité de la transmission, à l'aide d'un "codage aléatoire" pratiquement irréalisable, l'amélioration de la qualité impliquant une complexité rapidement croissante, surtout prohibitive au décodage. Transmettre "sans" erreur étant une fin possible, les moyens de l'atteindre devenaient objet de recherche. Il a fallu pour avancer se donner certaines structures de code, notamment la linéarité. A partir de cette option commune, les études sur les codes *cycliques* ont permis de les doter de bonnes propriétés de distance ; sur les codes *convolutifs*, ont abouti à des algorithmes de décodage généraux, en continuité avec la théorie de la détection. Apportant des solutions au problème le plus difficile et acceptant des "décisions souples"

plus économiques en rapport signal à bruit (RSB), ces codes ont trouvé des applications aux communications spatiales dès leur début (le bruit  $y$  est additif, gaussien et blanc). Si les études sur les codes cycliques et convolutifs ont longtemps évolué séparément, leur rapprochement a permis de transposer certains résultats d'un domaine à l'autre. Par exemple, l'algorithme de Viterbi peut être adapté aux codes linéaires en blocs. L'emploi du codage est en principe plus intéressant sur d'autres voies que le canal gaussien, notamment la plupart des voies radioélectriques, mais le groupement des erreurs  $y$  pose de redoutables problèmes. Pour une protection efficace, il faut alors répartir l'information sur un intervalle de temps long à l'échelle des variations du RSB. Le décodeur opère sur des symboles affectés d'un RSB moins variable, par effet de moyenne. La probabilité d'erreur étant fonction convexe du RSB, sa moyenne diminue.

Les études de codage ont donc abouti à tout un arsenal de moyens. Dans une large mesure, il reste aux ingénieurs à les adapter aux voies réelles. Avec les progrès de la technologie, le problème majeur des applications a cessé d'être la complexité, pour devenir peut-être la connaissance insuffisante des voies réelles. Le progrès dans cette voie implique d'améliorer la communication entre ingénieurs et spécialistes des codes, problème non technique que l'enseignement et des manifestations comme ce colloque contribuent, lentement, à résoudre.

## Summary of [38]

This paper is intended to the evolution of coding as (subjectively) seen by an engineer. Shannon showed in 1948 that noise restricts the possible information rate through a channel but not the reception quality, using a practically unfeasible 'random coding', where quality improvement demands rapidly growing complexity, especially prohibitive at decoding. 'Errorless' communication being a possible end, means for reaching it became research matter. In order to go on, certain code structures should be assumed, especially linearity. Sharing this assumption, studies on *cyclic* codes resulted in good distance properties, while those on *convolutional* ones obtained general decoding algorithms continuing detection theory. Yielding solutions to the most difficult problems and accepting 'soft decisions', more economical in signal-to-noise ratio (SNR), these codes and algorithms found applications in spatial communication since its very beginning (noise there is additive Gaussian and white). While studies on cyclic and convolutional codes de-

veloped separately for a long time, their partial convergence enabled transposing certain results from a domain to the other. For example, the Viterbi algorithm can be adapted to linear block codes. The use of coding may be in principle be more beneficial in channels other than the Gaussian one, especially almost all radio channels, but clustering of errors leads to formidable problems. For an efficient protection, information should be spread on a time interval long with respect to the scale of SNR variations. The decoder then operates on symbols having a less variable SNR due to averaging. Since the error probability is a convex function of SNR, its average decreases.

Coding studies therefore resulted in a wealth of means. To a large extent, the engineers still have to adapt them to the actual channels. Due to technological progress, the main problem of applications is no longer complexity, but maybe becomes the insufficient knowledge of the actual channels. Progress in this way demands improving communication between engineers and coding experts, a non-technical problem for the solution of which teaching and symposia like this one slowly contribute.

## Sur le décodage pondéré des codes linéaires

### Résumé de [39]

On rappelle la représentation de l'ensemble des mots d'un code linéaire en blocs  $(n, k)$  par le diagramme du treillis. Il est dit "de forme normale" si la donnée des  $k$  premiers symboles détermine un mot du code unique. On considère le décodage dans les trois cas où :

- la fiabilité individuelle des symboles est inconnue, manière classique de poser le problème qui conduit à prendre pour critère la distance de Hamming ;

- le canal est à paquets d'erreurs localisables en ce sens que la fiabilité des symboles est nulle dans une zone connue avec certitude et absolue en dehors. Selon les dimensions de cette zone, le décodage est possible (et son résultat est alors exact) ou non ;

- une mesure de la fiabilité de chaque symbole est disponible. Le décodage pondéré peut être interprété comme généralisant de façon probabiliste le cas précédent. Le treillis peut alors servir de support au décodage par l'algorithme de Viterbi.

Il est cependant possible de simplifier et on rappelle un algorithme qui le permet. Il comporte dans une première étape un reclassement des sym-

boles par fiabilité non croissante. On crée ainsi dans chaque mot un paquet “justifié” à droite. Il comporte une version optimale au sens de la vraisemblance maximale et des variantes, obtenues notamment en limitant le nombre des chemins parcourus dans le treillis. La suite est consacrée à une ébauche d’analyse de la complexité de cet algorithme et à rendre compte de résultats de sa simulation.

Un modèle est introduit et les différentes probabilités pertinentes sont calculées en fonction de ses paramètres. On suppose d’abord le treillis de forme normale, mais on montre ensuite que l’essentiel des résultats subsiste si le treillis obtenu après reclassement des symboles n’a pas cette forme.

Les résultats de simulation confirment qu’il suffit de parcourir un petit nombre de chemins du treillis pour obtenir une probabilité d’erreur résiduelle peu dégradée par rapport à l’optimum.

## **Décodage pondéré optimal des codes linéaires en blocs II. - Analyse et résultats de simulation**

### **Analyse de [44]**

Les auteurs se proposent d’étudier la complexité d’un algorithme de décodage pondéré des codes linéaires en blocs précédemment publié et de certaines de ses variantes simplifiées, en se restreignant au cas binaire. On présente à cet effet des calculs basés sur un modèle simplifié du fonctionnement du décodeur ainsi que des résultats de sa simulation. On commence par rappeler la description de cet algorithme en se référant au diagramme du treillis associé au code. Une description probabiliste du fonctionnement de l’algorithme sert d’introduction à un modèle dans lequel les ‘cotes’ associées à chaque chemin du treillis, qu’il s’agit de comparer, sont scindées en deux termes additifs, l’un certain, l’autre aléatoire. Une évaluation de la complexité de l’algorithme optimal et de certaines de ses variantes simplifiées est développée à partir de ce modèle. La méthode de simulation de l’algorithme et de ses variantes, ainsi que les résultats obtenus, sont enfin présentés.

### **Abstract of [44]**

This paper is devoted to study the complexity of an algorithm already published which is intended to weighted decoding of block codes, and of certain of its simplified variants; the discussion is restricted

to the binary case. To this end calculations based on a simplified model of the decoder operation as well as simulation results are presented. To begin with, the algorithm description is recalled, referring to the treillis associated with the code. A probabilistic description of the algorithm operation is used in order to introduce a model where each of the metrics associated with the paths, to be compared, is split into two additive parts, one of them being deterministic and the other one random. The complexity of the optimum decoding algorithm, as well as of simplified variants of it, is evaluated using this model. The method for simulating the algorithm and its variants, and the results thus obtained, are finally presented.

## **Pondération des symboles décodés par l’algorithme de Viterbi**

### **Analyse de [45]**

On expose un moyen de modifier le décodage des codes convolutifs par l’algorithme de Viterbi afin d’en déduire une estimation de la fiabilité de chacune des décisions quant au symboles décodés. Cela permet en particulier de pondérer le décodage du code extérieur dans un système concaténé et d’en améliorer de façon significative le résultat global.

### **Abstract of [45]**

A means for modifying Viterbi decoding of convolutional codes in order to obtain a reliability estimate of each decoding decision is discussed. This enables soft decoding of the outer code in a concatenated system and leads to a significant improvement of the overall performance.

## **Le décodage pondéré en tant que procédé de réévaluation d’une distribution de probabilité**

### **Analyse de [46]**

L’auteur propose de redéfinir le décodage pondéré d’un code redondant comme consistant à réévaluer une distribution de probabilité donnée *a priori*, pour tenir compte des contraintes du code. La solution optimale du problème ainsi posé s’obtient par

application du principe “d’écart entropique minimal” et on montre qu’elle coïncide avec le calcul des probabilités à comparer pour effectuer le décodage à vraisemblance maximale quand la distribution *a priori* est exactement connue. Le principe s’applique aussi à une distribution *a priori* approximative ou biaisée, ce qui explique la robustesse du décodage par rapport à la pondération. D’autre part, cette redéfinition permet d’utiliser les étapes intermédiaires du décodage, dans le cas où des codes sont associés par concaténation ou produit, comme source de pondération pour les étapes ultérieures. On est amené pour simplifier à une estimation de la distribution *a posteriori* de forme séparable par rapport aux symboles d’information, que l’on définit et dont on examine certaines applications.

### Abstract of [46]

We propose to redefine weighted decoding of a redundant code as consisting of reestimating a given prior probability distribution in order to take into account the code constraints. The optimum solution of this problem results from using the ‘minimum cross-entropy’ principle and is shown to coincide with the computation of the probabilities to be compared in order to perform maximum-likelihood decoding when the priori distribution is exactly known. The principle however also holds when the priori distribution is approximate or biased, which explains the robustness of decoding with respect to weighting information. Such a definition also enables using the intermediate steps of decoding, in the case of codes associated by concatenation or product, as a source of weighting information for the subsequent steps. One is led for simplicity’s sake to an estimate of the posterior probability in separable form with respect to the information symbols; its definition is given and certain of its applications are discussed.

## Décodage pondéré des codes concaténés avec code intérieur convolutif

### Résumé de [47]

On examine le décodage de codes concaténés, notamment avec un code intérieur convolutif. En supposant les codes constituants décodés l’un après l’autre, le décodage est globalement amélioré si la sortie du décodeur intérieur est pondérée. L’algorithme de Viterbi peut être modifié à cet

effet. En élargissant la tâche du décodeur à la détermination d’une distribution *a posteriori* sur les mots du code, étant donnée la distribution *a priori* des symboles en sortie du canal, on déduit de la règle de Bayes une formule générale mais complexe. Le principe de Kullback, pour une distribution *a posteriori* séparable par rapport aux symboles d’information, conduit à un système d’équations implicites qui est un cas particulier du résultat précédent. L’interprétation d’un code linéaire unique comme une sorte de produit de ses contrôles de parité aboutit à un algorithme par étapes où chacun de ces contrôles est décodé avec sortie pondérée par résolution de ce système. En revanche, avec le décodage séquentiel, le décodage du code concaténé global n’est pas plus compliqué que celui du code convolutif seul.

### Summary of [47]

This paper is intended to concatenated codes decoding, especially for convolutional inner code. Assuming successive decoding of the associated codes, overall decoding is improved by weighting the inner decoder output. The Viterbi algorithm can be modified to this end. Redefining the part of decoding to determine a posterior probability distribution on the codewords, given the prior distribution of the symbols, Bayes rule results in a general, but complex, formula. Kullback principle, for a posterior distribution separable with respect to the information symbols, results in a system of implicit equations which is a particular case of the previous result. Interpreting a single linear code as a kind of product of its parity-checks results in a step-by-step algorithm where each check is decoded with weighted output by solving this system. When using sequential decoding, however, the overall decoding is no more complex than that of the convolutional code alone.

## Suboptimum decoding using Kullback principle

### Abstract of [49]

Several successive decodings of cascaded codes become possible in principle without information loss if the decoding task is extended to determine a posterior probability distribution on the codewords. Kullback principle of cross-entropy minimization is considered as a means of implementing it. Its practical use, however, demands some kind of simplification. We propose to look for the posterior distri-



bution in separable form with respect to the information symbols, which leads to decoding output of same form as its input. As an illustration of these ideas, we considered decoding an iterated product of parity-check codes which results in a vanishingly small error probability provided the channel signal-to-noise ratio is larger than some threshold. Interpreting a single linear code as a kind of product of its parity checks, the same ideas lead to a simple and efficient algorithm.

## Construction explicite de bons codes longs

### Résumé de [52]

On montre que le critère de distance minimale n'est pas pertinent pour les longs codes en blocs. Pour un code de grande longueur  $n$ , on propose pour critère mieux adapté l'écart entropique de la distribution de poids normalisée de ce code par rapport à la distribution binomiale d'un  $n$ -uple résultant du tirage aléatoire indépendant et équiréparti de chacun de ses symboles. Le produit itéré de codes de parité apparaît comme un moyen de construction de codes longs par décimation de l'ensemble des  $n$ -uples, satisfaisant pour ce critère bien que mauvais au sens de la distance minimale. On présente les résultats obtenus par le calcul et la simulation de son décodage et on les compare à des limites théoriques. On montre leur proximité du débit critique  $R_0$  du canal.

### Abstract of [52]

The conventional criterion of minimum distance is shown to be irrelevant to long block codes. As a criterion better fitted to a code of large length  $n$ , we propose the cross-entropy of its normalized weight distribution with respect to the binomial distribution of an  $n$ -tuple resulting from an independent choice of each of its symbols. The iterated product of parity-check codes appears as a means for designing long codes by decimation among the whole set of the  $n$ -tuples which is good for this criterion although poor in terms of its minimum distance. Computed results and those from simulated decoding are presented and compared with theoretical limits. They are shown to be close to the channel cutoff rate  $R_0$ .

## Coding for the Gaussian Channel: the Promise of Weighted-Output Decoding

### Summary of [56]

We introduce the concept of weighted-output decoding, which enables us to perform many successive decodings without information loss. The design of a coding system for the additive white Gaussian channel can thus be viewed as a means for combining many simple codes. We illustrate this concept by the example of parity-check codes which are combined according to Elias' iterated product. Examination of the performance thus obtained leads us to criticize the conventional minimal distance criterion and to propose as a criterion a proximity measure of the weight distribution of the code with respect to the binomial one. According to this point of view, the iterated product of parity-check codes appears as a means of decimation of the set of  $n$ -tuples.

## Building long codes by combination of simple ones, thanks to weighted-output decoding

### Abstract of [57]

We consider an extension of the decoding task to deliver reliability information on its own decisions i.e., weighted-output decoding. This extension enables combining many simple codes to be successively decoded. As an example, the iterated product of parity-check codes is considered. Results of both computation and simulation of its performance over additive white Gaussian noise channel are presented. Comments on these results lead to criticize the minimal distance criterion and to suggest a better one. As performing a kind of decimation among the set of  $n$ -tuples, iterated parity-check codes may be deemed good according to this criterion although they are poor in terms of their minimal distance.

## Communication en présence de bruit gaussien

### Résumé de [60]

On envisage la communication en présence de bruit stationnaire, gaussien et blanc, dans l'interprétation géométrique de Shannon. Quand

l'alphabet utilisé est fini, la concaténation de plusieurs codes conduit à généraliser la fonction du décodage à l'estimation de la fiabilité de ses propres décisions, afin de permettre un nombre illimité de décodages successifs. Le produit itéré de codes de parité, moyen simple de combiner de nombreux codes simples, devient possible et ses bons résultats, en contradiction avec le critère de distance minimale, conduisent à proposer le remplacement de celui-ci par une mesure de proximité entre la distribution du poids du code et celle qui résulte en moyenne du codage aléatoire (binomiale).

## Décodage par résolution d'un système d'équations implicites analogiques

### Résumé de [61]

La tâche de décodage d'un code redondant étant élargie à la réévaluation d'une distribution de probabilité, on simplifie son résultat en cherchant la distribution *a posteriori* sous une forme séparable par rapport aux symboles d'information. La distribution optimale de cette forme s'obtient en rendant minimal l'écart entropique de celle-ci par rapport à la distribution *a priori*, ce qui conduit pour un code binaire à un système d'équations implicites analogiques qu'il s'agit de résoudre. On établit d'abord ce résultat pour un code en blocs binaire, puis on le généralise à un code non binaire. La résolution de ce système peut être envisagée par itération, mais la multiplicité de ses solutions entraîne que la principale difficulté du décodage ainsi ramené à cette résolution réside dans la détermination des valeurs initiales appropriées. On y parvient en interprétant un code linéaire comme une sorte de produit de ses contrôles de parité, qui peuvent être décodés séparément par répliques comme dans le cas du produit itéré de codes de parité. Des résultats de simulation sont présentés.

### Abstract of [61]

Decoding a redundant code, when redefined as a means for reestimating a probability distribution, results in a simple output if one looks for the posteriori distribution in a form separable with respect to the information symbols. The optimum distribution of this form results from minimizing its cross-entropy with respect to the prior distribution, which for a linear code leads to a system of implicit analog

equations to be solved. This result is first obtained for binary codes and then extended to any linear code. Iteration can be contemplated as a means for solving this system but it has multiple solutions so that determining proper initial values becomes the main difficulty. Such initial values were obtained by interpreting a linear code as a kind of product of its parity checks which can be separately decoded using replication decoding, as it was already performed for the iterated product of single-parity-check codes. Simulation results are presented.

## Codage de source adaptatif par l'algorithme de Guazzo

### Résumé de [63]

Dans le cas stationnaire, l'algorithme de Guazzo permet d'obtenir une longueur moyenne après codage de source aussi voisine que l'on veut de sa limite théorique, l'entropie de la source, sans exiger comme l'algorithme de Huffman de recourir à une extension de celle-ci. On montre qu'il est possible de rendre cet algorithme adaptatif et donc efficace pour des sources inconnues ou variables, ce que confirment quelques résultats de simulation. Enfin, on ébauche la comparaison de cet algorithme avec d'autres.

### Abstract of [63]

In the stationary case, the Guazzo algorithm yields an average length after source coding as close as desired to its theoretical limit, the source entropy, without demanding as the Huffman algorithm that an extension of it is used. We show that it can be made adaptive and thus efficient for unknown or varying sources, which is confirmed by simulation results. Finally, we outline the comparison of this algorithm with other ones.

## Coding and modulation for the Gaussian channel, in the absence or in the presence of fluctuations

### Abstract of [64]

Looking for systems which combine coding and multilevel modulation whose Euclidean distance distribution is close to that which results in the average from random coding, we consider the combination

of an MDS code over a large size alphabet and a one-to-one mapping of the alphabet into a symmetric constellation i.e., phase modulation. Its performance in the presence of additive Gaussian noise can be predicted from that of random coding, provided the signal-to-noise ratio is small enough. The results exhibit the sphere hardening phenomenon whether or not amplitude fluctuations are present. Weighted demodulator output and soft decoding should be effected in order to achieve this performance. Such decoding can be done in principle according to previous works by Fang and Battail. A prohibitive complexity can be avoided only at the expense of strict optimality.

## On Generalized Constellations and the Opportunistic Secondary Channel

### Abstract of [69]

An optimum bits-to-symbol mapping for square constellations is introduced which allows a simple detection in narrow-sense quadrature amplitude modulation (QAM) systems. Then, a family of two-dimensional generalized cross constellations is presented as well as upper and lower bounds on the symbol error probability over an ideal band-limited channel which generalize those previously known for conventional QAM. The application of this scheme to the opportunistic secondary channel is analysed and it is shown how fractional rates (in bits per 2-dimensional signal) can be supported on 2D generalized QAM systems. These signaling schemes are compared with multidimensional generalized constellations recently proposed by Forney and Wei.

## Performance of Lattice Codes over the Gaussian Channel

### Abstract of [70]

We develop upper and lower bounds on the (block) error probability of a scheme which combines lattice coding and quadrature amplitude modulation over the Gaussian channel. Examples of performance evaluation are provided for a few lattices. We also discuss the asymptotic behaviour of these bounds as  $n$  increases and we are led to conjecture that “covering” becomes more important than “packing” for rates beyond the cutoff rate.

## Performance of Lattice Codes over the Gaussian Channel

### Abstract of [71]

We derive an upper bound on the error probability of lattice codes combined with quadrature amplitude modulation (QAM) over the additive white Gaussian noise channel. This bound depends on a lattice figure of merit and is readily put in exponential form by using Chernoff bound. An interesting lower bound is derived by a similar reasoning. We also examine the estimation of the average information rate based upon the continuous approximation of the average power normalized to two dimensions, and suggest to improve it by using the sphere packing idea. Examples of performance evaluation are given for a few lattices. Finally, we present upper and lower bounds on the best fundamental coding gains per dimension (due to both density and thickness) for an arbitrary large number of dimensions. It is shown in the Appendix that, as the Ungerboeck codes, the lattice codes do not shape the signal power spectrum.

## The Random-Coded Modulation: Performance and Euclidean Distance Spectrum Evaluation

### Abstract of [73]

We apply the random coding argument to coded modulation. The well-known union bound on the error probability of general signaling schemes is revisited. The random coded modulation idea is introduced and a simple bound on the average performance of coded constellations is presented. A relationship between the union bound and the cut-off rate is exhibited by introducing the concept of  $N$ -dimensional partial cut-off rate. We define finite theta series for bounded finite-dimensional constellations and their related transfer functions. Bounds on the block and symbol error probability based on the transfer function are derived. The discussion is then focused on the squared Euclidean distance distribution. The evaluation of such parameters as its first two moments (average squared distance and squared distance variance) is considered by either finite theta series or transfer function of the bounded signal set. The Euclidean distance spectra of a few multidimensional coded modulation schemes based

on square/cross constituent two-dimensional constellations are presented. Their respective partial cut-off rates are computed. We discuss the asymptotic behaviour and we show that almost all very long coded constellations are good (actually, they tend to become quasi-identical in a certain sense). Finally, we examine how to extend the initial union bound to Gallager-type bounds.

## We can think of good codes, and even decode them

### Abstract of [75]

“All codes are good, except those we can think of.” This pessimistic opinion is widely shared among the coding theory community. We shall try instead to defend the optimistic statement of the above title. The word “good” is given in the quoted sentence the restricted meaning: “with a large minimum distance”. From a communication engineering point of view, we were led to criticize this definition and to propose as a better criterion of goodness the proximity of the normalized distance distribution of a code with respect to that which results in the average from random coding, as measured for instance by the cross-entropy of these distributions. Looking for codes which are good in this sense for the Euclidean metric, as relevant to the additive white Gaussian noise channel, we show that combining a maximum-distance separable code (e.g., a Reed-Solomon one) with an almost arbitrary one-to-one mapping of its  $q$ -ary symbols into a 2-dimensional constellation is a satisfactory solution provided  $q$  is large enough.

Near capacity-performance may be expected from such a *random-like* code, provided it can be decoded with reasonably low complexity. Using the Euclidean metric implies soft-decision decoding. We discuss two decoding algorithms for this purpose. The first one is sequential, as adapted to the finite context of a block code. It is potentially optimum, although practical considerations lead to limit the number of words to be tried. The second one is intrinsically nonoptimum and relies on an interpretation of a linear code as a kind of product of single-check codes which enables their cascaded weighted-output decoding. For large Reed-Solomon codes, none of these algorithms is fully satisfactory, but we suggest to combine them in order to obtain a near-optimum algorithm of acceptable complexity.

## Codage déterministe imitant le codage aléatoire pour le canal à bruit gaussien additif

### Résumé de [76]

On montre que la distribution des distances euclidiennes d'un système qui combine un codage du type séparable à distance maximale (MDS) et une modulation opérant une application bijective certaine des symboles de l'alphabet sur les points d'une constellation plane (satisfaisant à quelques conditions aisément réalisées) est voisine de celle qui serait obtenue en moyenne par codage aléatoire, pourvu que la longueur du code (donc la taille de son alphabet) et le nombre de ses dimensions soit suffisamment grands. Des moyens déterministes permettent ainsi en principe de s'approcher autant qu'on le souhaite de la capacité du canal à bruit additif, gaussien et blanc. On examine ensuite rapidement quelques-uns des problèmes posés par la mise en œuvre d'un tel système.

### Abstract of [76]

We show that the Euclidean distance distribution of a system which combines maximum distance separable coding and a modulation which performs a deterministic one-to-one mapping of the alphabet symbols onto a 2-dimensional constellation (provided some easily met conditions) is close to that which results in the average from random coding, provided the code length (hence the alphabet size) and the dimensionality of the code are large enough. Thus deterministic means enable in principle to approach as closely as desired the capacity of the additive white Gaussian channel. We then briefly review some problems related to the implementation of a such a system.

## Probabilité d'erreur du codage aléatoire avec décodage optimal sur le canal à bruit gaussien additif, affecté ou non de fluctuations d'amplitude

### Résumé de [77]

On a repris les calculs de Shannon relatifs à la probabilité d'erreur du codage aléatoire en présence de bruit gaussien additif, avec décodage optimal, sans autre contrainte que l'emploi de signaux d'énergie

constante. Les moyens disponibles de nos jours permettent de pousser plus loin les calculs littéraux et de calculer numériquement les expressions exactes, sans devoir recourir à des bornes. On utilise les résultats ainsi obtenus pour la prévision des performances qui peuvent être attendues d'un système combinant un codage séparable à distance maximale, non binaire, et une application des symboles de l'alphabet sur les points d'une constellation plane, notamment d'amplitude constante. On examine aussi le cas où la réception a lieu en présence de fluctuations de l'amplitude selon la loi de Rayleigh.

### **Abstract of [77]**

We took up again Shannon computations about the error probability of random coding in the presence of additive Gaussian noise, with no other constraint than the use of constant energy signals, and assuming optimum decoding. The means nowadays available enable to go farther in the literal computations and to numerically compute the exact expressions instead of having to rely on bounds. The results thus obtained are intended to predict those which may be expected from a system combining (non binary) maximum distance separable coding with mapping of the alphabet symbols into the points of a 2-dimensional constellation, especially of a constant-amplitude one. We also consider the case where receiving takes place in the presence of Rayleigh-distributed amplitude fluctuations.

## **Pseudo-random recursive convolutional coding for near-capacity performance**

### **Abstract of [81]**

We consider recursive convolutional coding as a means for constructing codes whose distance distribution is close to that obtained in the average by random coding, hence whose performance is expected to closely approach the channel capacity. We especially consider convolutional codes where the encoder register taps are such that it generates maximum-length sequences. Two algorithms for decoding these codes are discussed. Since both involve implementation difficulties, we propose to generate such codes by means similar to turbo-codes which make their decoding easy.

## **On random-like codes**

### **Abstract of [88]**

A random-like code is designed so as to make its normalized distance distribution (its weight distribution if it is linear) close to that obtained in the average by random coding. The iterated product of single-parity-check codes, for testing the use of several successive weighted-output decodings in order to reduce the overall decoding complexity, was the first example of a random-like code with a poor minimum distance but a good bit-error rate.

A distinction is introduced between strongly and weakly random-like codes. Strongly random-like codes are such that each term of their weight distribution is close to that of random coding, in contrast with weakly random-like ones which exhibit only a global shape similarity (as measured e.g., by cross-entropy). Strongly random-like codes are good for the minimum distance criterion as meeting the Varshamov-Gilbert bound and their word-error rate (WER) is good. In contrast, weakly random-like codes may have small bit-error rate (BER) but bad WER. From an engineering point of view, however, the BER is the most significant parameter so weakly random-like codes are actually interesting. Moreover, their design is easier.

We briefly review some codes which may be considered as random-like, with special emphasis on so-called "pseudo-random" systematic convolutional codes which are recursive and such that the recursive part of the encoder corresponds to a maximum-length generator. Even if such a code has a small free distance and thus does not result in a low enough BER, combining several such codes according to the turbo-code scheme enables control of the weight distribution tails, hence the BER, by increasing the number of combined codes, so as to meet any specified performance at a rate lower than the channel capacity.

## **Codage convolutif récursif pseudo-aléatoire**

### **Résumé de [90]**

La théorie classique des codes convolutifs repose pour l'essentiel sur l'énumération des poids des chemins qui, dans le graphe de transitions du codeur, partent de l'état 0 et y reviennent. Si cette énumération décrit assez bien les suites engendrées par un codeur non récursif, il n'en est pas de même des codeurs récursifs où le retour à l'état 0 n'est

pas de règle. On examine en particulier le cas des codes récurrents dits pseudo-aléatoires, où un élément au moins de la matrice génératrice est une fraction rationnelle ayant pour dénominateur un polynôme primitif. Pour des codes de ce type, les chemins qui reviennent à l'état 0 sont d'autant plus minoritaires que la longueur de contrainte est plus grande. On montre sommairement que la distribution des poids ainsi obtenue est voisine de celle du codage aléatoire. On suggère enfin de combiner deux ou plusieurs codes de ce type selon le schéma des turbo-codes pour concilier la facilité du décodage avec les performances dues à une grande longueur de contrainte.

### Abstract of [90]

The conventional theory of convolutional codes mostly relies on enumerating the weights of the paths which stem from, and eventually merge again with, the all-0 path in the encoder transition graph. Such enumerating describes fairly well the sequences generated by a non-recursive encoder but fails to do so for recursive ones where merging with the all-0 path is not the general case. We especially consider recursive pseudo-random convolutional codes, the generator of which contains at least a rational fraction having as denominator a primitive polynomial. For such codes, the paths which merge with the all-0 one are the fewer, the larger is the constraint length. We cursorily show that the weight distribution thus obtained is close to that of random coding. However, a practical decoder does not take into account the probabilities of the coded sequences, which belong to the same set whether the encoder is recursive or not. Decoding a pseudo-random code thus demands that the information sequences are restricted to some distinctive subset, which is achieved by concatenation. We examine how to combine two or more such encoders according to the turbo-code scheme.

## Hamming distance spectra of turbo-codes

### Abstract of [91]

This paper is intended to predict the performance of turbo-codes by analytical means. After a brief description of turbo-codes, the concept of basic Return-To-Zero (RTZ) sequences is introduced. Then, it is shown how RTZ sequences can be used to compute the Hamming Distance Spectrum (HDS) via a modified version of the Fano algorithm.

The HDS thus obtained is used to compute an upper bound on the bit error rate. Distance spectra of selected turbo-codes with short interleaving are presented and the validity of their performance prediction is confirmed by simulation (only provisional results are given here). Besides, a class of low-performance turbo-codes, referred to as *weak*, is identified.

## Weight distribution and performance of the iterated product of single-parity-check codes

### Abstract of [92]

We consider the iterated product of binary single-parity-check (SPC) codes. We show that their weight distribution asymptotically approaches that of random coding if the smallest code length in the product approaches infinity. According to a specific criterion, the best choice of the product parameters consists of taking all SPC codes of equal length. Estimates of the weight distribution obtained by simulation show that even moderately long codes have a weight distribution close to that obtained in the average by random coding. We also discuss decoding of these codes by iterated replication decoding and report results of its simulation.

## Does information theory explain biological evolution?

### Abstract of [101]

It is suggested that Dawkins' model of evolution needs error-correction coding in the genome replication process. Nested coding is moreover assumed. Consequences of these hypotheses are drawn using fundamental results of information theory. Genome replication is dealt with independently of phenotype encoding, which pertains to semantics. The proposed hypotheses enable explaining facts of genetics and evolution, including the existence of redundant DNA (the introns), the observed correlation between the rate of mutations on the one hand, the genome length and the redundancy rate on the other hand, the discreteness of species and the trend of eukaryotes evolution towards complexity.

## Randomness and structure in channel coding

### Abstract of [102]

Codes are sought such that their distance distribution mimics that of random coding. Depending on how the closeness of the distance distribution with respect to that of random coding is specified, we distinguish strongly and weakly random-like codes. The latter may have good bit (or symbol) error rate but their word error rate is poor. A crude model of them is proposed. Attempting to design random-like convolutional codes leads to recursive codes where the recursive part of the encoder is specified by a primitive polynomial. Although their decoding is difficult due to the large memory needed for good performance, their use as components in turbo codes is a simple and efficient means for obtaining weakly random-like codes with a specified bit error rate at an information rate close to the channel capacity. Moreover, the many-component turbo code scheme appears as intrinsically random-like regardless of the component codes.

## A conceptual framework for understanding turbo-codes

### Abstract of [103]

For understanding turbo-codes, we propose to locate them at the intersection of three main topics: the random-like criterion for designing codes, the idea of extending the decoding role to reassess probabilities and that of combining several codes by product or concatenation. Concerning the idea of designing random-like (RL) codes, we distinguish strongly and weakly random-like codes depending on how the closeness of their weight distribution to that obtained in the average by random coding is measured. Using e.g. the cross-entropy as a closeness measure results in weakly RL codes. Although their word error rate is bad, their bit error rate remains low up to the vicinity of the channel capacity. We show that pseudo-random recursive convolutional codes belong to this family. Obtaining reasonably good performance with a single code of this type involves high complexity and its specific decoding is difficult. However, using these codes as components in the turbo-code scheme is a simple means for improving the low-weight tail of the distribution and to adjust the bit error rate to any specification. In order to increase the encoder mem-

ory without inordinate complexity, it is suggested to use iterated non-exhaustive replication decoding.

## Polynomial description of linear block codes and its application to soft-input, soft-output decoding

### Abstract of [104]

This paper reviews the representation of binary linear block codes by multi-indeterminate ‘descriptive polynomials’ and extends it to versions permuted with respect to the usual systematic form. The main decoding rules (word-by-word and symbol-by-symbol) can then be expressed in terms of descriptive polynomials, the computation of which is easily implemented using trellises. Particular emphasis is given to the symbol-by-symbol decoding rule where the decoder input and output are both real numbers, assuming a logarithmic measure of the likelihood ratio is employed. The same form of input and output enables successive soft decodings of concatenated codes and iterated decoding. Keeping only the largest monomial of descriptive polynomials widely simplifies decoding and, moreover, results in the same decoded word as the word-by-word decoding rule although the decisions on the symbols are still expressed as real numbers. These tools are applied to convolutional codes (for a finite message length). Decoding a non-recursive non-systematic code by means of the trellis as defined here is shown to be of same complexity as using the trellis conventionally associated with the Viterbi algorithm. On the contrary, decoding a recursive systematic code, of better potential performance, is of greater and prohibitive complexity. Keeping reasonable complexity in this case can however use iteration. Two distinct reasons for iteration of decoding are identified, which both apply to turbo coding.

### Analyse de [104]

Cet article reprend la représentation de codes en blocs linéaires par des ‘polynômes descripteurs’ à plusieurs indéterminées et la généralise à des versions permutées par rapport à la forme systématique usuelle. Les principales règles de décodage (par mot et par symbole) peuvent être exprimées en fonction de polynômes descripteurs que l’on peut aisément calculer au moyen de treillis. On insiste surtout sur la règle de décodage

symbole par symbole, où l'entrée comme la sortie du décodeur sont des nombres réels, en supposant qu'une mesure logarithmique des rapports de vraisemblance est employée. La même forme à l'entrée et à la sortie permet des décodages pondérés successifs et le décodage itéré. On simplifie largement le décodage en ne conservant que le plus grand monôme des polynômes descripteurs et, de plus, le résultat obtenu est le même que celui de la règle de décodage mot par mot bien que les décisions sur les symboles soient toujours exprimées par des nombres réels. Ces outils sont appliqués aux codes convolutifs (pour un message de longueur finie). On montre que la complexité du décodage d'un code non récursif et non systématique à l'aide du treillis défini ici est la même qu'en employant le treillis habituellement associé à l'algorithme de Viterbi. Au contraire, le décodage d'un code récursif systématique, de meilleures performances potentielles, est d'une complexité plus grande et prohibitive. On peut cependant conserver une complexité raisonnable, dans ce cas, en faisant usage de l'itération. Deux raisons distinctes de l'itération du décodage sont identifiées, qui toutes deux s'appliquent aux turbo codes.

## On linear random-like codes

### Abstract of [109]

A linear random binary code can be obtained if each entry of its generator matrix is drawn at random independently of the others with probability  $1/2$ . The same result is obtained if its redundancy submatrix when put in systematic form, instead of the generator matrix itself, is drawn at random by the same means. Moreover, putting in systematic form a random but low-density generator or parity-check matrix results in a redundancy submatrix of density  $1/2$ , asymptotically for large word length. Similarly to turbo-codes, low-density parity-check codes may therefore be interpreted as weakly random-like. We comment this result and notice that many of the practically good coding schemes belong to this category.

Remark: the end of this paper contains an attempt to base the notion of '*random-like*' code on the idea of 'complication' outlined in Chapter VIII of [99].

## Symbol-by-symbol Decoding as an Approximation of Word-by-word Decoding

### Abstract of [110]

Soft-input soft-output decoding consists of estimating the information symbol *a posteriori* probabilities, taking account of the coding constraints, given the received symbol *a priori* probabilities. Kullback's principle of cross-entropy minimization is used for deriving optimum decoding rules assuming a linear, possibly non-systematic, binary code. A log-likelihood formalism is used throughout. Two decoding rules result, one by solving a system of analog implicit non-linear equations written in terms of a generator matrix, the other being the conventional one. We discuss simplified versions of both, present an interpretation of the first rule and compare it with the second one, given that both are intended to provide approximates of the same quantities.

## Is Biological Evolution Relevant to Information Theory and Coding?

### Abstract of [111]

Any living thing is made of a genome (or 'replicator') contained in a phenotype. The replicator is a DNA molecule made of a very long chain of nucleic bases which acts as a memory in the engineering sense. There are only four different nucleic bases so the replicator uses a 4-symbol alphabet. It controls the development of the phenotype through the synthesis of proteins according to the 'genetic code'. The phenotype hosts the replicator and protects it from the outer world, which enables its survival. The main property of the replicator is its ability to duplicate itself with high reliability, so a single replicator can generate a population of phenotypes by repeated replications. Although very unfrequent, the replication errors result in random 'mutations' which explore the field of possible phenotypes. Natural selection only keeps those which are best fitted to their environment. According to the model to be referred to as 'neo-Darwinian', biological evolution results from mutations and natural selection acting together.

We notice that many physical and chemical factors affect the replicator integrity, so this model



cannot work unless some kind of error correction exists in the replication process. We assume furthermore that ‘nested codes’ provide this correction i.e., that the result of some encoding, together with new information, has been encoded again, and that this process was repeated several times through the ages. Consequences of these assumptions are derived from information theory. Some of them seem in good agreement with observed facts: the high redundancy of the genome, the correlation between its length and redundancy on the one hand and the observed rate of mutations on the other hand, the discontinuous character of evolution, etc. Even the existence of discrete species and the trend of evolution towards complexity find here an explanation that the neo-Darwinian theory alone does not provide.

## References

- [1] G. B., “Étude générale comparée des systèmes de modulation en vue des communications par satellites artificiels,” Colloque URSI, Paris, sept. 1961, in *Space Radio Communication*, G.M. Brown, ed., Elsevier, 1962.
- [2] G. B., P. Brossard, “Démodulateur d’ondes modulées en fréquence,” Brevet français no 1 328 367 (déposé le 9 avr. 1962, p.v. No. 893 755)
- [3] G. B., “Détermination approximative de la position extrême du seuil de réception en modulation de fréquence,” Colloque IRE, Bruxelles, sept. 1962, *IRE Trans. on Inf. Th.*, Vol. IT-8, No 5, pp. S108–S121, sept. 1962.
- [4] G. B., “An FM demodulator employing preliminary estimation of instantaneous frequency,” International Conference on Satellite Communication, Londres, Nov. 1962.
- [5] G. B., “Dispositif pour l’échantillonnage et le codage de signaux à large bande de fréquences,” Brevet français no 1 354 785, déposé le 3 mai 1963 (p.-v. no 277 769)
- [6] G. B., “Sur le seuil de réception en modulation de fréquence,” *Annales Télécommunic.*, Vol. 19, No. 1–2, pp. 21-48, jan-fév. 1964.
- [7] G. B., “Sur l’emploi des signaux à bande limitée dans la théorie des communications,” *Annales Télécommunic.*, Vol. 19, No. 5–6, pp. 125–137, mai-juin 1964.
- [8] G. B., “A priori information and noise immunity in communication systems,” *Proc. IEEE (Corr.)*, pp. 1059-1060, Sep. 1964.
- [9] G. B., P. Brossard, “Système de communication par satellite artificiel à accès multiple,” Brevet français no 1 438 315 déposé le 27 fév. 1965.
- [10] G. B., “Limite théorique du seuil de réception pour un signal modulé en fréquence par un multiplex téléphonique à répartition en fréquence,” *Annales des Télécommunic.*, Vol. 20, No. 9–10, pp. 195-207, sept.-oct. 1965.
- [11] G. B., “On signal-to-noise ratios in communication systems,” *IEEE Trans.*, Vol. COM-14 (Correspondence), pp. 71-72, Feb. 1966.
- [12] G. B., H. Butin, et al., “Compression d’information de fac-similé,” Brevet français no ?
- [13] G. B., P. Deman, “Procédé de transmission de données rapides en ondes courtes,” Brevet français no ?
- [14] G. B., Traduction révisée et préface du livre de A. Spataru, *Théorie de la transmission de l’information: I - Signaux et bruits*, Masson, 1970.
- [15] G. B., “Perfectionnements aux dispositifs de codage et décodage des codes récurrents,” Brevet français, p.-v. no 72 00 496, déposé le 7 janvier 1972.
- [16] G. B., “Perfectionnements aux dispositifs de décodage à seuil des codes récurrents,” Brevet français déposé le 7 janvier 1972, p.-v. no 72 00 497
- [17] G. B., “Système de transmission de données binaires fortement protégé contre les erreurs,” Brevet français déposé le 19 fév. 1974, p.-v. No. 74 05 592
- [18] G. B., “Dispositif de modulation-démodulation numérique d’un signal à haute fréquence,” Demande de brevet No. 74 07 063
- [19] G. B., M. Decouvelaere, “Réinterprétation et généralisations du décodage à seuil pondéré des codes récurrents,” GRETSI 1975, pp. 305–314
- [20] G. B., M. Decouvelaere, “Décodage par Répliques,” *Annales Télécommunic.*, Vol. 31, No. 11–12, pp. 387-404, nov.-déc. 1976.

- [21] G. B., P. Godlewski, "Emploi de Représentations Polynomiales à Plusieurs Indéterminées pour le Décodage des Codes Redondants Linéaires," *Annales Télécommunic.*, Vol. 33, No. 3-4, pp. 74-86, mars-avr. 1978.
- [22] G. B., P. Godlewski, "Replication Decoding, a Method of Soft Decoding," in *Information and System Theory in Digital Communication*, NTG Fachberichte Band 25, pp. 220-229, VDE Verlag, Berlin, 1978.
- [23] G. B., "Théorie des signaux," in *Techniques de l'Ingénieur*, 1978.
- [24] G. B., "Théorie des codes et protection contre les erreurs," *ibidem*, 1978.
- [25] G. B., M. Decouvelaere, P. Godlewski, "Replication Decoding," *IEEE Trans.*, Vol. IT-25, No. 3, pp. 332-345, May 1979.
- [26] G. B., "An adaptive communication system for joint use of parallel channels", unpublished, July 1979 (written on Feb. 2001).
- [27] G. B., "Système adaptatif de communication numérique utilisant des canaux en parallèle", GRETSI 1979, pp. 93/1-93/6.
- [28] G. B., "Initiation aux communications", texte indit.
- [29] G. B., "Diversité et codage pour la transmission numérique par voie radioélectrique," GRETSI 1981, pp. ?
- [30] G. B., H.M.S. El-Sherbini, "Coding for Radio Channels," *Annales Télécommunic.*, Vol. 37, No. 1-2, pp. 75-96, Jan.-Feb. 1982.
- [31] G. B., Traduction partielle, adaptation et préface du livre de A.J. Viterbi & J.K. Omura, *Principe des communications numériques*, Dunod, 1982.
- [32] G. B., "Théorie de l'information," in *Techniques de l'Ingénieur*, 1982.
- [33] G. B., "Exploitation de redondance et étalement de spectre," *Rev. Tech. Th-CSF*, Vol. 14, No. 4, pp.925-956, déc. 1982.
- [34] G. B., "Description polynomiale des codes en blocs linéaires," *Annales Télécommunic.*, Vol. 38, No. 1-2, pp. 3-15, jan.-fév. 1983.
- [35] M. El-Soudani, G. B., "Soft Decoding Using a Trellis for a Concatenated System," GRETSI 1983, pp. 407-412
- [36] G. B., "Décodage pondéré optimal des codes linéaires en blocs I- Emploi simplifié du diagramme du treillis," *Annales Télécommunic.*, Vol. 38, No. 11-12, pp. 443-459, nov.-déc. 1983.
- [37] G. B., "Débits critiques en transmission non binaire orthogonale avec décisions fermes ou pondérées," *Annales Télécommunic.*, Vol. 39, No. 3-4, pp. 99-112, nov.-déc. 1984.
- [38] G. B., "L'évolution du codage vue par un ingénieur, ou la dialectique de la fin et des moyens," *Traitement du Signal*, Vol. 1, No. 2-1, pp. 87-96, 1984.
- [39] G. B., J. Fang, "Sur le décodage pondéré des codes linéaires," GRETSI 1985, pp. 507-512
- [40] G. B., "Procédé de décodage d'un code convolutif et décodeur correspondant," Demande de brevet No. 85 11863 du 2 Août 1985.
- [41] G. B., "Décodage pondéré des codes linéaires," Conférence IPMU, Paris, pp. 165-168, juil. 1986.
- [42] G. B., "Le décodage pondéré en tant que procédé de réévaluation d'une distribution de probabilité," Colloque "3 Journées sur le Codage", Cachan, nov. 1986.
- [43] J. Fang, G. Cohen, P. Godlewski, G. B., "Le décodage pondéré des codes linéaires est NP-complet," Colloque "3 Journées sur le Codage", Cachan, nov. 1986 ; Lecture notes in computer science No. 311, G. Cohen & P. Godlewski eds., pp. 141-149.
- [44] G. B., J. Fang, "Décodage pondéré optimal des codes linéaires en blocs II. - Analyse et résultats de simulation," *Annales Télécommunic.*, Vol. 41, No. 11-12, pp. 580-604, nov.-déc. 1986.
- [45] G. B., "Pondération des symboles décodés par l'algorithme de Viterbi," *Annales Télécommunic.*, Vol. 42, No. 1-2, pp. 31-38, jan.-fév. 1987.
- [46] G. B., "Le décodage pondéré en tant que procédé de réévaluation d'une distribution de probabilité," *Annales Télécommunic.*, Vol. 42, No. 9-10, pp. 499-509, sep.-oct. 1987.

- [47] G. B., G. Kawas-Kaleh, J.-C. Belfiore, R. Sfez, "Décodage pondéré des codes concaténés avec code intérieur convolutif," GRETSI 1987, pp. 217–220.
- [48] G. B., J.-C. Belfiore, R. Sfez, "Decoding as a means of reestimating a probability distribution; application to an iterated product of parity-check codes," 1988 IEEE International Symposium on Information Theory, Kobe, Japon, 19-24 June 1988.
- [49] G. B., R. Sfez, "Suboptimum decoding using Kullback principle," Conference IPMU, Urbino, Italie, 4–7 July 1988; Lecture notes in computer science No. 313, Springer, pp. 93–101, 1988.
- [50] G. B., "Décodage pondéré des codes linéaires en blocs par résolution d'un système d'équations implicites," Colloque "3 journées sur le codage", Toulon, 2-4 novembre 1988; Lecture notes in computer science No. 388, Springer, pp. 123–133, 1989.
- [51] G. B., "Is minimal distance a good criterion?," Colloque "3 journées sur le codage", Toulon, 2-4 Nov. 1988; Lecture notes in computer science No. 388, Springer, pp. 325–327, 1989.
- [52] G. B., "Construction explicite de bons codes longs," *Annales Télécommunic.*, Vol. 44, No. 7–8, pp. 392-404, juil.-août 1989.
- [53] R. Sfez, G. B., "Sur les schémas de codes concaténés avec décodages pondérés," 12-ème GRETSI, Juan-les-Pins, 12–16 juin 1989.
- [54] G. B., "Iterated coding of parity-check codes as a means for the explicit design of good long codes," International Conference on Communication Technology, Beijing, Chine, 12–14 July 1989.
- [55] G. B., "Rotating a redundant constellation in signal space against channel fluctuations," International Conference on Communication Technology, Beijing, Chine, 12–14 July 1989.
- [56] G. B., "Coding for the Gaussian channel; the promise of weighted-output decoding," *Int. J. of Satellite Communications*, Vol. 7, No. 3, pp. 183–192, July-Sep. 1989.
- [57] G. B., "Building long codes by combination of simple ones, thanks to weighted-output decoding," colloque ISSSE'89, Erlangen, Allemagne, pp. 634–637, 18–20 Sep. 1989.
- [58] G. B., Demande de brevet français sur l'algorithme de Guazzo adaptatif, No. 90 00 393, déposée le 15 janvier 1990.
- [59] G. B., "The adaptive Guazzo algorithm," 1990 IEEE ISIT, San Diego, CA, Jan. 1990.
- [60] G. B., "Communication en présence de bruit gaussien," *Echo des Recherches*, Vol. 139, pp. 3–12, 1-er trimestre 1990.
- [61] G. B., "Décodage par résolution d'un système d'équations implicites analogiques," *Annales Télécommunic.*, Vol. 45, No. 7–8, pp. 393–409, juil.-août 1990.
- [62] H. Magalhães de Oliveira, G. B., "A Capacity Theorem for Lattice Codes on Gaussian Channels", *Proc. IEEE/SBT Int. Telecomm. Symp., ITS'90*, pp. 1.2.1–1.2.5, Rio de Janeiro, Brazil, Sep. 1990.
- [63] G. B., "Codage de source adaptatif par l'algorithme de Guazzo," *Annales Télécommunic.*, Vol. 45, No. 11–12, pp. 677–693, nov.-déc. 1990.
- [64] G. B., H. Magalhães de Oliveira, Zhang W., "Coding and modulation for the Gaussian channel, in the absence or in the presence of fluctuations," EUROCODE 90, Udine, Italie, 5–9 Nov. 1990; Lecture Notes in Computer Science, Springer, No. 514, pp. 337–349.
- [65] G. B., M. Guazzo, "Sur le codage de source adaptatif," EUROCODE 90, Udine, Italie, 5–9 nov. 1990; Lecture Notes in Computer Science, Springer, No. 514, pp. 298–308.
- [66] G. B., R. Sfez, "A weighted-output variant of the Viterbi algorithm for concatenated schemes using a convolutional inner code," EUROCODE 90, Udine, Italie, 5–9 Nov. 1990; Lecture Notes in Computer Science, Springer, No. 514, pp. 259–270.
- [67] G. B., "Ébauche d'une méthodologie pour la conception des systèmes de communication numériques," en préparation
- [68] H. Magalhães de Oliveira, G. B., "The Random Coded-Modulation: Performance and Euclidean Distance Spectrum Evaluation", *Proc. of IEEE Int. Symp. Info. Theory, ISIT'91*, Budapest, Hungary, p. 2, Jun. 1991.
- [69] H. Magalhães de Oliveira, G. B., "On Generalized Constellations and the Opportunistic Secondary Channel", *Annales*

- Télécommunic.*, Vol. 47, No. 5–6, pp. 202–213, May-June 1992.
- [70] H. Magalhães de Oliveira, G. B., “Performance of Lattice Codes over the Gaussian Channel,” ISSSE’92, Paris, pp. 105–108, 1–4 Sep. 1992.
- [71] H. Magalhães de Oliveira, G. B., “Performance of Lattice Codes over the Gaussian Channel,” *Annales Télécommunic.*, Vol. 47, No. 7–8, pp. 293–305, July-Aug. 1992.
- [72] J. Fang, G. B., “Décodage pondéré optimal des codes linéaires en blocs III. - Généralisation à des codes non binaires,” en préparation
- [73] H. Magalhães de Oliveira, G. B., “The Random-Coded Modulation: Performance and Euclidean Distance Spectrum Evaluation,” *Annales Télécommunic.*, Vol. 47, No. 3-4, pp. 107–124, Mar.-Apr. 1992.
- [74] W. Zhang, G. B., “On the Euclidean Weight Distribution of Coded-Modulation Combining MDS codes over GF(q) and q-ary Modulation”, unpublished.
- [75] G. B., “We can think of good codes, and even decode them” Eurocode 92, Udine, 26–30 Oct. 92. CISM course and lectures No. 339, P. Camion, P. Charpin and S. Harari, Eds., Springer, pp. 353–358, 1993.
- [76] G. B., H. Magalhães de Oliveira, W. Zhang, “Codage déterministe imitant le codage aléatoire pour le canal à bruit gaussien additif”, *Annales Télécommunic.*, Vol. 47, No. 9–10, pp. 443–447, sept.-oct. 1992.
- [77] G. B., H. Magalhães de Oliveira, “Probabilité d’erreur du codage aléatoire avec décodage optimal sur le canal à bruit gaussien additif, affecté ou non de fluctuations d’amplitude”, *Annales des Télécommunic.*, Vol. 48, No. 1–2, pp. 15–28, jan.-fév. 1993.
- [78] H. Magalhães de Oliveira, G. B., “On Lattice Coding for the Gaussian Channel”, *European Transactions on Telecommunications*, Focus on Channel Coding and Information Theory, Vol. 4, No. 2, pp. 133–140, Mar.-Apr. 1993.
- [79] G. B., “Pseudo-random recursive convolutional coding for near-capacity performance”, 2nd International Symposium on Communication Theory and Applications, Ambleside (UK), 12–16 July 1993. Communications theory and applications II, B. Honary, M. Darnell, P. Farrell, Eds, HW Communications Ltd, pp. 54–65.
- [80] G. B., C. Berrou, A. Glavieux, “La capacité d’un canal peut être approchée par des moyens simples”, GRETSI’93, 13–16 sept. 1993, Juan-les Pins, pp. 623–626.
- [81] G. B., C. Berrou, A. Glavieux, “Pseudo-random recursive convolutional coding for near-capacity performance,” *Proc. GLOBECOM’93, Communication Theory Mini-Conference*, Vol. 4, pp. 23–27, Houston, U.S.A., Nov. 29–Dec. 2, 1993.
- [82] G. B., “Can we implement random coding ?”, 4-th IMA Conf. on Cryptography and Coding, Cirencester (U.K.), 13–15 Dec. 1993. *Codes and cyphers, Cryptography and coding IV*, P. Farrell, Ed., Formara Ltd, pp. 1–15.
- [83] Giuseppe Caire, Giorgio Taricco, G. B., “Weight distribution and performance of the iterated product of single-parity-check codes”, EUROCODE’94, La Bussière sur Ouche, 24–28 Oct. 1994.
- [84] G. B., D. Azzouz, “Décodage pondéré des codes de Reed-Solomon, décomposé en décodages successifs de codes simples”, EUROCODE’94, La Bussière sur Ouche, 24–28 Oct. 1994.
- [85] G. B., “Sur la théorie des communications,” 3-ièmes journées sur l’Enseignement des Télécommunications, Versailles, 16–17 novembre 1994.
- [86] G. Caire, G. Taricco, G. B., “Weight distribution and performance of the iterated product of single parity check codes,” *Proc. GLOBECOM’94, Communication Theory Mini-Conference*, pp. 206–211, San Francisco, U.S.A., Nov. 27–Dec. 1, 1994.
- [87] G. B., “Outlining a theory of recursive convolutional codes,” French-Israeli Workshop, Tel Aviv, Israël, 5–8 Dec. 1994.
- [88] G. B., “On random-like codes,” *Proc. 4-th Canadian Workshop on Information Theory*, Lac Delage, Québec, 28–31 May 1995; Information Theory and Applications II, J.-Y. Chouinard, P. Fortier and T.A. Gulliver, Eds,

- Lecture Notes in Computer Science No. 1133, pp. 76–94, Springer, 1996.
- [89] G. B., “Reed-Solomon encoding over  $GF(q)$  and  $q$ -PSK modulation”, *IEEE Inf. Th. Workshop*, Rydzyna, Poland, 25-29 June 1995.
- [90] G. B., “Codage convolutif récursif pseudo-aléatoire,” *Annales Télécommunic.*, Vol. 50, No. 9–10, pp. 779–789, sept.-oct. 1995.
- [91] R. Podemski, W. Holubowicz, C. Berrou, G. B., “Hamming distance spectra of turbo-codes,” *Annales Télécommunic.*, Vol. 50, No. 9–10, pp. 790–797, Sep.-Oct. 1995.
- [92] G. Caire, G. Taricco, G. B., “Weight distribution and performance of the iterated product of single-parity-check codes,” *Annales Télécommunic.*, Vol. 50, No. 9–10, pp. 752–761, Sep.-Oct. 1995.
- [93] G. B., “Pseudo-random turbo-codes”, *Proc. Int. Symp. on Signals, Systems and Electronics*, San Francisco, U.S.A., pp. 419–422, Oct. 25–27, 1995.
- [94] G. B., “Turbo-codes as random-like codes,” Mediterranean Workshop on Coding and Information Integrity, Palma de Mallorca, Spain, Feb. 28–March 1, 1996.
- [95] G. B., “Understanding and improving turbo-codes,” Turbo Coding Seminar, Lund, Sweden, pp. 9–17, 28–29 Aug. 1996.
- [96] C. Berrou, S. Evano, G. B., “Turbo-block-codes,” Turbo Coding Seminar, Lund, Sweden, pp. 1–7, 28–29 Aug. 1996 and Assemblée générale de l’URSI, Lille, 28 Aug.–5 Sep. 1996.
- [97] G. B., J. Boutros, “On communication over fading channels,” ICUPC, Boston, pp. 995–988, 29 Sep.–2 Oct. 1996.
- [98] G. B., *Brève introduction aux codes correcteurs d’erreur*, cours ENST, vers 1996.
- [99] G. B., *Théorie de l’information. Application aux techniques de communication*, Masson, 1997.
- [100] G. B., “A conceptual framework for understanding turbo-codes” Proceedings of the International Symposium on Turbo Codes and Related Topics, Brest, pp. 55–62, 3–5 Sep. 1997.
- [101] G. B., “Does information theory explain biological evolution?”, *Europhysics Letters*, Vol. 40, No. 3, pp. 343–348, Nov. 1st 1997.
- [102] G. B., “Randomness and structure in channel coding”, in *Communications and coding*, M. Darnell and B. Honary, Eds., pp. 30–47, Research Studies Press & John Wiley and Sons, Jan. 1998.
- [103] G. B., “A conceptual framework for understanding turbo-codes”, *IEEE Jour. Select. Areas Commun.*, pp. 245–254, Feb. 1998.
- [104] G. B., “Polynomial description of linear block codes and its application to soft-input, soft-output decoding,” *Annales Télécommunic.*, Vol. 54, No. 3–4, pp. 148–165, Mar.-Apr. 1999.
- [105] G. B., “L’idée d’information”, *Sciences et Avenir, Les grandes idées du siècle*, Hors-série No. 121, décembre 1999 – janvier 2000.
- [106] G. B., “Théorie de l’information”, chapitre introductif d’un ouvrage collectif sur le codage de canal, à paraître, Hermès, ?
- [107] G. B., *La science de l’information, l’information dans les sciences*, en préparation.
- [108] G. B., “On Gallager’s low-density parity-check codes”, International Symposium on Information Theory, *Proc. ISIT 2000*, p. 202, Sorrento, Italie, 25–30 June 2000.
- [109] G. B., “On linear random-like codes”, *Proc. 2nd International Symposium on Turbo Codes and Related Topics*, pp. 47–50, Brest, 4–7 Sep. 2000.
- [110] G. B., “Symbol-by-symbol Decoding as an Approximation of Word-by-word Decoding”, *Proc. International Workshop on Coding and Cryptography*, pp. 57–72, Paris, 8–12 Jan. 2001.
- [111] G. B., “Is Biological Evolution Relevant to Information Theory and Coding?”, *Proc. ISCTA ’01*, pp. 343–351, Ambleside, UK, 15–20 July 2001.
- [112] G. B., “Hommage à Shannon”, mars 2001.
- [113] G. B., “Tribute to Shannon”, March 2001.

- [114] G. B., “Le manque d’information”, *Sciences et Avenir*, Hors-série No. 128, “Dieu joue-t-il aux dés?”, pp. 80–85, octobre/novembre 2001.
- [115] G. B., “Replication decoding revisited”, in preparation