

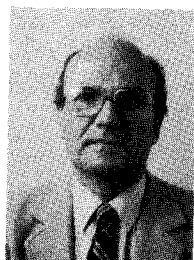
## L'évolution du codage

## vue par un ingénieur

## ou la dialectique de la fin et des moyens

an engineer's point of view on the evolution of coding or the dialectic of the end and the means

Gérard BATTAIL



École Nationale Supérieure des Télécommunications  
Département Systèmes et Communications  
46, rue Barrault, 75634 PARIS CEDEX 13

Ingénieur civil des Télécommunications (1956). Ingénieur au CNET (1959-1966), à la Division Télécommunications de Thomson-CSF (1966-1973), professeur à l'École Nationale Supérieure des Télécommunications depuis 1973. Enseignement et recherche en théorie des communications : modulation, codage de source et de canal, théorie de l'information. Intérêt particulier porté au décodage pondéré des codes correcteurs d'erreurs : généralisation du décodage à seuil pondéré à des codes linéaires quelconques (décodage par répliques), décodage pondéré optimal des codes linéaires en blocs, simplifié par rapport à l'algorithme de Viterbi; applications aux transmissions radioélectriques.

## RÉSUMÉ

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 et algorithmes 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.

## MOTS CLÉS

Codage correcteur d'erreurs, décodage pondéré, codes linéaires, codes cycliques, codes convolutifs, décisions souples, canaux variables, canaux radioélectriques, réception en diversité, diagramme du treillis, algorithme de Viterbi, décodage par répliques, entrelacement, canal à paquets d'erreurs.

**SUMMARY**

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 problem 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 developed 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 more beneficial in channels others 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 became 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 the present one slowly contribute.

**KEY WORDS**

Error-correction encoding, weighted decoding, linear codes, cyclic codes, convolutional codes, soft decisions, varying channels, radio channels, diversity reception, trellis diagram, Viterbi algorithm, replication decoding, interleaving, bursty channel.

**TABLE DES MATIÈRES****Introduction****1. Les origines****2. L'évolution parallèle de deux grandes familles de codes linéaires****3. Applications : résultats, promesses et difficultés**

- 3.1. Codes convolutifs, canal gaussien additif et communications spatiales
- 3.2. Les promesses du codage pour les voies radioélectriques
- 3.3. Codage et entrelacement pour le canal « à paquets d'erreurs »
- 3.4. Comment modéliser les voies de transmission ?
- 3.5. Une solution éprouvée : la diversité

**Conclusion****Bibliographie****Introduction**

Prononcer une conférence invitée à la séance inaugurale de ces journées est un honneur auquel je suis très sensible. La difficulté de la tâche est pourtant redoutable : comment traiter d'un sujet général devant un auditoire de spécialistes, dans un domaine si divers, si complexe, si mouvant ? Aussi ai-je choisi, pour l'alléger, un point de vue délibérément subjectif : ne parler du codage qu'à travers mon expérience personnelle d'ingénieur. Je serai donc partiel et partial ; au moins n'aurai-je pas prétendu le contraire ni tu mon parti pris.

Le domaine du codage paraît au premier abord caractérisé par un contraste flagrant entre :

- une *finalité utilitaire*, la protection des communications contre les perturbations des voies de transmission ;
- et l'emploi de *moyens mathématiques* d'un raffinement parfois considérable.

Tel est le sens du sous-titre « la dialectique de la fin et des moyens », car le moteur de l'évolution du codage est sans doute le couple antagoniste :

*promesses de la théorie/résultats atteints,*

que nous verrons à l'œuvre dans toute la suite. C'est pourquoi aussi les sujets que je vais évoquer seront

systématiquement désignés par un couple de propriétés antagonistes ou, du moins, fortement contrastées. La liste de ces couples antagonistes constitue donc le plan de cette conférence (fig. 1).

Moyens mathématiques Promesses de la théorie	Finalité utilitaire Résultats atteints
Codage aléatoire	Construction explicite
Accroissement de complexité ⇒ amélioration	Complexité limitée par la technologie disponible
Codes cycliques	Codage convolutif
Canal supposé stationnaire pour les besoins de la théorie	Canaux réels très souvent variables
Hypothèses précises sur les canaux	Connaissance très insuffisante des voies réelles
Solutions parfois compliquées à des problèmes simples	Solutions voulues simples à des problèmes intrinsèquement complexes
Validité mathématique intrinsèque d'une solution	Interprétation dans le langage et la perspective des communications

Fig. 1. — Plan d'ensemble, sous la forme d'une liste de couples antagonistes.

## 1. Les origines

Historiquement, le premier couple de contraires remonte aux origines, c'est-à-dire à l'énoncé par Shannon du théorème fondamental du codage de canal [1]. Shannon a en effet montré en 1948 que le bruit perturbateur limitait le débit d'information possible à travers un canal mais non la qualité de la transmission (spécifiée par exemple par une probabilité d'erreur). Il s'agissait alors d'une idée neuve qui reste aujourd'hui encore surprenante : le sens commun n'associe-t-il pas une transmission erronée à un canal bruyant ?

Ce résultat n'était pourtant établi qu'en utilisant un « codage aléatoire » pratiquement irréalisable. Une fin hautement souhaitable étant ainsi proposée (transmettre « sans » erreur), les moyens de l'atteindre par une construction explicite devenaient objet de recherche. L'origine même des études de codage de canal est donc dans le couple antagoniste :

*codage aléatoire/construction explicite.*

Rien dans la théorie ne disant ce que devait être la construction explicite d'un code, il fallait pour avancer se donner certaines structures, au risque que les options prises paraissent arbitraires par rapport au but poursuivi. J'avoue pour ma part avoir éprouvé, m'intéressant il y a plus de 20 ans aux problèmes de bruit dans les systèmes de modulation, une certaine méfiance à l'égard des techniques de codage (pourant étroitement apparentées), dans la mesure où les structures employées ne découlaient pas de la finalité de communication. Bien entendu, l'efficacité des résultats obtenus a justifié *a posteriori* les options prises et dissipé cette réticence.

Non moins important que l'utilisation du codage aléatoire était le caractère asymptotique du théorème : l'amélioration indéfinie de la qualité impliquait une complexité indéfiniment croissante, particulièrement

prohibitive au décodage. On aboutissait ainsi au couple de contraires :

*amélioration avec une complexité accrue/complexité limitée par la technologie disponible.*

Si cet antagonisme a dominé l'évolution du codage, la technologie elle-même a vécu une prodigieuse évolution. Ainsi la complexité réalisable avec une fiabilité et un coût satisfaisants est-elle une fonction très rapidement croissante du temps. On peut estimer que la technologie a maintenant atteint le niveau de complexité nécessaire à l'emploi effectif des techniques de codage, mais cela n'est vrai que depuis peu d'années.

## 2. L'évolution parallèle de deux grandes familles de codes linéaires

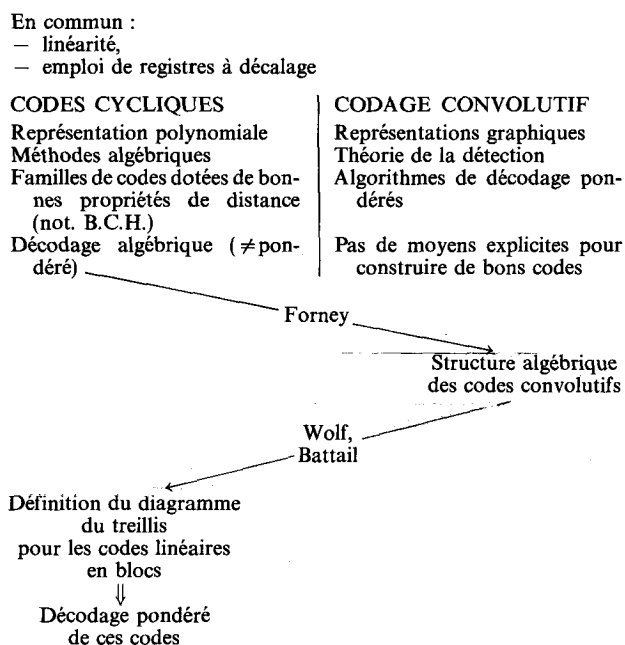
Dans la recherche de moyens de construction explicites, l'hypothèse de linéarité est tôt apparue comme apportant une simplification notable sans cependant restreindre exagérément le champ du possible. Par ailleurs, les moyens technologiques de l'époque (il s'agit des années 50) permettaient surtout de réaliser, outre des fonctions logiques simples, des registres à décalage. Je voudrais maintenant montrer comment, utilisant l'option commune de linéarité et ce type de technologie, deux grands axes de recherche ont été définis par des prémisses si différentes que les études ainsi suscitées ont évolué à peu près indépendamment. Leur objet lui-même constitue un couple antagoniste :

*codes cycliques/codage convolutif.*

Dans le contexte fini des codes en blocs ( $n, k$ ), l'invariance de l'ensemble des mots d'un code vis-à-vis des décalages circulaires de  $n$  symboles apparaît comme une contrainte raisonnable. Si au contraire on accepte un contexte illimité et des suites de symboles semi-infinies, c'est plutôt l'invariance par rapport aux translations (c'est-à-dire par rapport au temps) qui apparaît comme une contrainte qu'il est naturel de s'imposer. Pour des codes linéaires, on définit respectivement ainsi la classe des codes *cycliques* et celle des codes *convolutifs*, ces derniers étant simplement caractérisés par un effet de mémoire au codage.

Ces prémisses différentes ont servi de point de départ à des études qui ont évolué à peu près indépendamment (fig. 2). Les concepts et surtout les résultats obtenus selon ces deux axes sont étonnamment contrastés. Les codes cycliques ont bénéficié d'une représentation par des classes résiduelles de polynômes, qui a permis d'exploiter des méthodes algébriques préexistantes. Les résultats les plus importants obtenus dans cette voie sont des familles des codes dotés de bonnes propriétés de distance, notamment les codes BCH et leur sous-famille de Reed-Solomon. Leurs propriétés découlent de leur structure algébrique et doivent être exploitées au décodage. Cela exige donc de traiter les symboles reçus comme des éléments de l'alphabet

## L'ÉVOLUTION DU CODAGE VUE PAR UN INGÉNIEUR

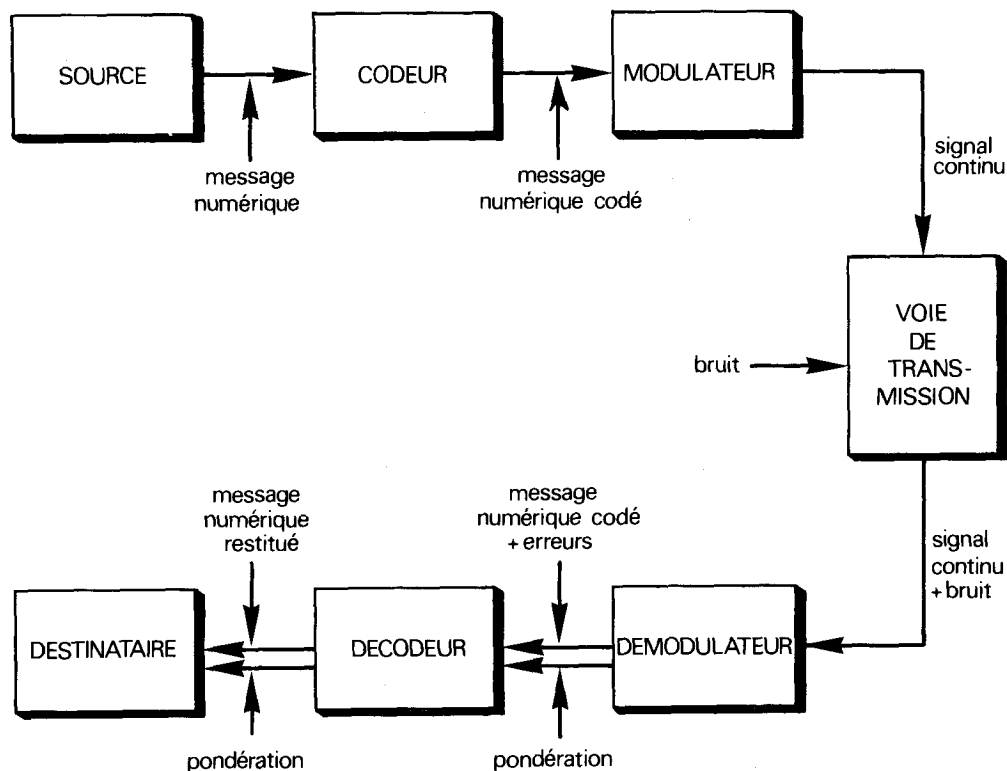


**Fig. 2.** - Schéma de l'évolution comparée des deux grandes familles de codes linéaires.

employé au codage (muni de la structure de corps fini), c'est-à-dire de prendre à la réception des décisions fermes. La théorie de l'information nous enseigne (et l'expérience confirme) qu'une dégradation en

résulte. Dans le cas de bruit additif, gaussien et blanc, cela équivaut dans le cas binaire à une diminution de près de 2 dB du rapport signal à bruit [2], et davantage encore pour un alphabet non binaire si le système de modulation est orthogonal ou apparenté [3]. Partant au contraire de représentations graphiques, l'étude des codes convolutifs a surtout abouti à des algorithmes de décodage (séquentiels, de Viterbi, ...). Ces algorithmes peuvent exploiter des décisions « souples », c'est-à-dire pondérées en fonction de leur fiabilité (que mesure la sortie analogique du démodulateur optimal; fig. 3). Cette étude n'a par contre pas fourni de moyens explicites pour construire de bons codes, mais une recherche sur ordinateur y supplée en pratique.

Si l'évolution initiale des études selon ces deux grands axes a été effectivement indépendante, des tentatives pour appliquer à l'un des domaines des méthodes ayant réussi dans l'autre ont eu lieu dans les années 70. Ainsi, Forney [4] a étudié la structure algébrique des codes convolutifs, mais il ne semble pas qu'elle ait pour ceux-ci la même importance que pour les codes cycliques; elle n'a en tout cas pas eu jusqu'ici une fécondité comparable. Dans l'autre sens, il est possible de définir des représentations graphiques des codes linéaires en blocs, notamment le diagramme du treillis (fig. 4), et d'en déduire des algorithmes de décodage pondéré (l'algorithme de Viterbi se transpose [5], mais on peut exploiter le contexte fini de ces codes pour concevoir des algorithmes optimaux



**Fig. 3.** - Schéma d'une chaîne de transmission numérique avec codage. La pondération émanant des organes de réception (démodulateur, décodeur) est une mesure de la fiabilité de chacune des décisions qu'ils prennent; le démodulateur optimal et certains schémas de décodeur calculent les grandeurs nécessaires à cette évaluation.

## SYNTHÈSES

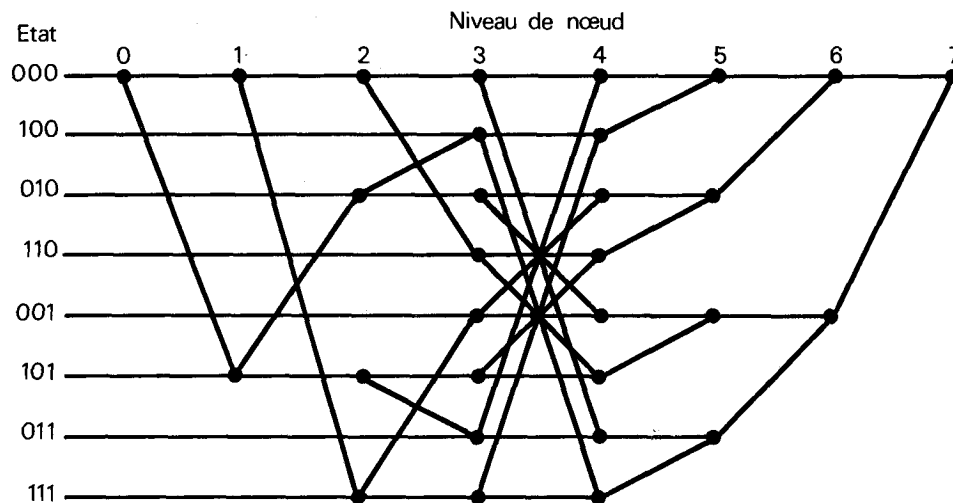


Fig. 4. — Diagramme du treillis pour le code de Hamming (7,4). Pour un code linéaire  $(n, k)$  sur l'alphabet  $q$ -aire, le nombre des états est  $q^{n-k}$ . Chacun des chemins dans le treillis, de l'origine (niveau de nœud 0, état 0) à l'extrémité (niveau de nœud  $n$ , état 0), représente un mot du code. Pour un code binaire comme celui de la figure, les branches horizontales correspondent au symbole 0 et les obliques au symbole 1.

ou presque optimaux plus simples [6]). L'hybridation apparaît ici comme bénéfique dans l'art de l'ingénieur, à l'instar de celui de l'horticulteur.

### 3. Applications : résultats, promesses et difficultés

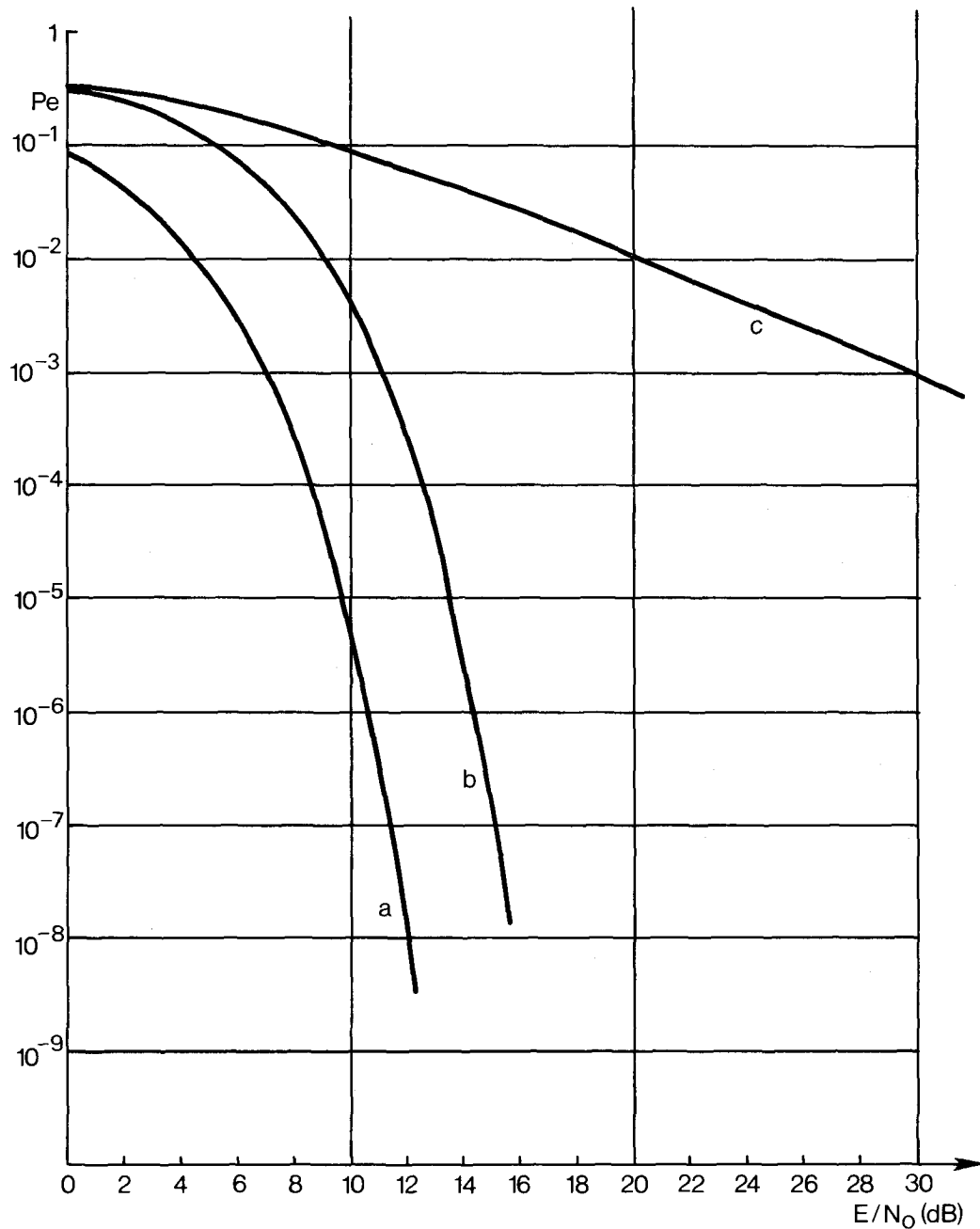
#### 3.1. CODES CONVOLUTIFS, CANAL GAUSSIEN ADDITIF ET COMMUNICATIONS SPATIALES

Avec ses algorithmes de décodage généraux, en continuité avec la théorie de la détection, l'étude des codes convolutifs apportait une solution au problème le plus difficile : le décodage. Acceptant des décisions « souples » plus économiques en rapport signal à bruit, elle a trouvé un champ d'application privilégié avec les communications spatiales à leur début (années 60). Le canal y est alors bien modélisé par l'addition de bruit stationnaire, gaussien et blanc; la pondération est directement fournie par le récepteur optimal, à corrélation ou filtrage adapté. Le codage est apparu alors comme un maillon essentiel d'une chaîne de transmission et il y fait la preuve expérimentale de son utilité.

Le canal additif, gaussien et blanc est cependant frustrant pour l'ingénieur en codage, car l'amélioration apportée, exprimée par une diminution du taux d'erreurs, peut aussi être obtenue par une augmentation modeste du rapport signal à bruit (pour les ordres de grandeur usuels de la probabilité d'erreur, un facteur 10 correspond à environ 1 dB; fig. 5). Une légère amélioration des paramètres du système (gain d'antenne, facteur de bruit...) a donc le même résultat et le codage se trouve en concurrence difficile avec les techniques traditionnelles.

#### 3.2. LES PROMESSES DU CODAGE POUR LES VOIES RADIOÉLECTRIQUES

Pour d'autres voies de transmission, notamment radioélectriques, la diminution du taux d'erreurs en fonction du rapport signal à bruit est beaucoup moins rapide. Ainsi, pour un signal dont l'amplitude varie lentement avec une distribution de Rayleigh en présence de bruit gaussien additif stationnaire, 10 dB sont nécessaires pour gagner un ordre de grandeur sur le taux d'erreur moyen (fig. 5). Le codage est alors apparemment en situation beaucoup plus favorable par rapport aux autres techniques. Tel est le cas des liaisons radioélectriques perturbées par un trajet multiple, des parasites impulsifs ou des brouilleurs, c'est-à-dire de la presque totalité des liaisons terrestres (parasites atmosphériques prédominants dans le bas du spectre radioélectrique, phénomènes de trajet multiple et de fluctuation de niveau liés à la propagation ionosphérique en ondes décamétriques, aux masques et aux réflecteurs pour les ondes métriques ou décimétriques en milieu urbain, pour ne citer que quelques exemples particulièrement difficiles). Les voies radioélectriques paraissent donc devoir constituer pour le codage un terrain d'application de choix. Mais la situation très favorable du codage n'est exprimée qu'en fonction d'un taux d'erreurs moyen; la difficulté survient des fortes variations des caractéristiques du canal en fonction du temps et/ou de la fréquence, de sorte que les erreurs se présentent groupées. Si un mot du code est tout entier contenu dans une zone peu affectée par les erreurs, la redondance du code est inutile parce qu'il n'y a rien à corriger; s'il l'est au contraire dans une zone fortement perturbée, elle l'est aussi, mais pour la raison inverse : la densité des erreurs dépasse alors les possibilités de correction du code (fig. 6). Un autre couple d'antagonistes apparaît ainsi :



**Fig. 5.** — Probabilité d'erreur moyenne en fonction du rapport signal (moyen) à bruit pour : (a) signal de puissance constante, avec modulation binaire antipodale et démodulation cohérente optimale; (b) signal de puissance constante, avec modulation binaire orthogonale et démodulation non cohérente; (c) signal de puissance lentement variable avec une distribution de Rayleigh, modulation binaire orthogonale et démodulation non cohérente.  $E$  est l'énergie moyenne reçue par symbole binaire,  $N_0$  est la densité spectrale unilatérale du bruit,  $p_e$  la probabilité d'erreur. On a : (a)  $p_e = (1/2) \operatorname{erfc} (E/N_0)^{1/2}$ ; (b)  $p_e = (1/2) \exp (-E/2N_0)$ ; (c)  $p_e = 1/(2 + E/N_0)$ .

# SYNTHÈSES

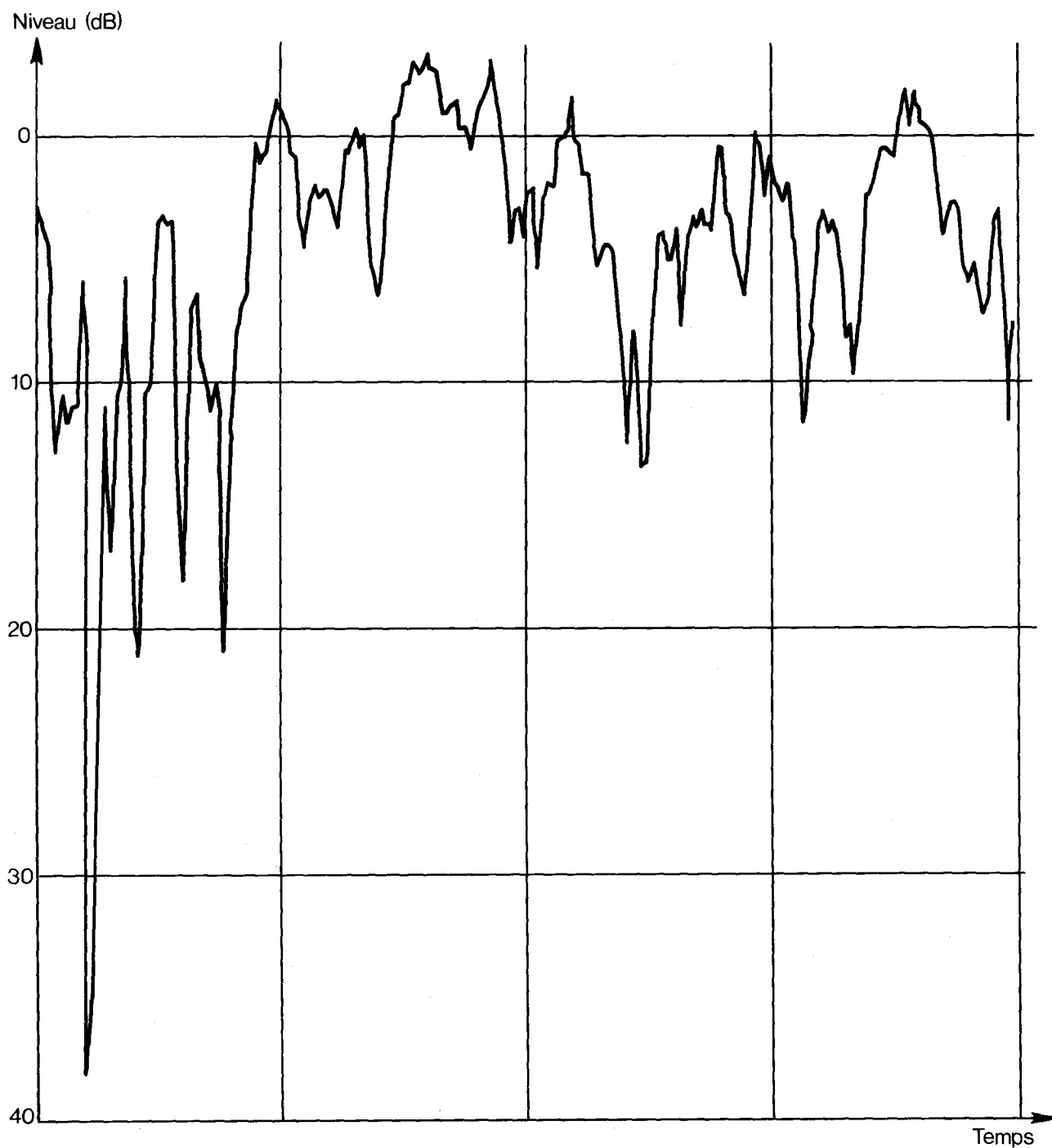


Fig. 6. — Échantillon (simulé) de la variation de l'amplitude d'un signal à distribution de Rayleigh.

canal supposé stationnaire/canal réel très souvent variable.

3.3. CODAGE ET ENTRELACEMENT POUR LE CANAL « A PAQUETS D'ERREURS »

Certes, la protection contre les « paquets d'erreurs » a reçu des solutions très satisfaisantes en principe, mais il s'agit aussi d'un canal idéalisé que la réalité ignore.

Son étude a cependant un intérêt qui est loin d'être négligeable, car elle aboutit à des schémas très simples qui peuvent servir de référence et suggérer des solutions utiles (sinon optimales) aux problèmes posés par les voies réelles [7]. Son étude amène à distinguer la correction de paquets d'erreurs ou d'effacements, la seconde étant beaucoup plus avantageuse. Or, si les paquets d'erreurs sont assez longs, on peut presque sûrement les détecter et les traiter comme des effacements : c'est à la fois plus facile et plus efficace. Enfin, des schémas optimaux sont connus, qui combinent entrelacement et codage (cyclique dans le cas d'effacements, de distance minimale optimale  $d = n - k + 1$ , par exemple de Reed-Solomon, dans le cas d'erreurs) (fig. 7).

3.4. COMMENT MODÉLISER LES VOIES DE TRANSMISSION ?

Pour concevoir des moyens de protection efficaces sur les canaux réels, il faudrait en principe disposer d'un modèle satisfaisant du canal utilisé puis concevoir des moyens qui lui soient adaptés, ou du moins y adapter des moyens connus. Mais la connaissance des voies réelles est le plus souvent très insuffisante (la raison en est probablement que l'évolution technologique ne donne que depuis peu les moyens d'appliquer les techniques de codage, de sorte que la nécessité de connaître les voies n'est apparue que récemment). En outre, les canaux rencontrés en pratique sont souvent variables, de sorte que le choix d'un tel modèle et la valeur donnée à ses paramètres devraient être déduits d'observations et de mesures constamment réactualisées. Il paraît donc utopique, même à long terme, d'espérer disposer d'un modèle de canal en bon accord avec la réalité. Faute de cette connaissance, l'ingénieur cherchera au contraire à n'exploiter qu'un minimum d'hypothèses sur le canal : seulement celles qui traduisent des propriétés générales, indépendantes des structures et des grandeurs les plus variables. Ainsi, l'entrelacement postule seulement que la mémoire du canal est finie. La détection d'erreurs

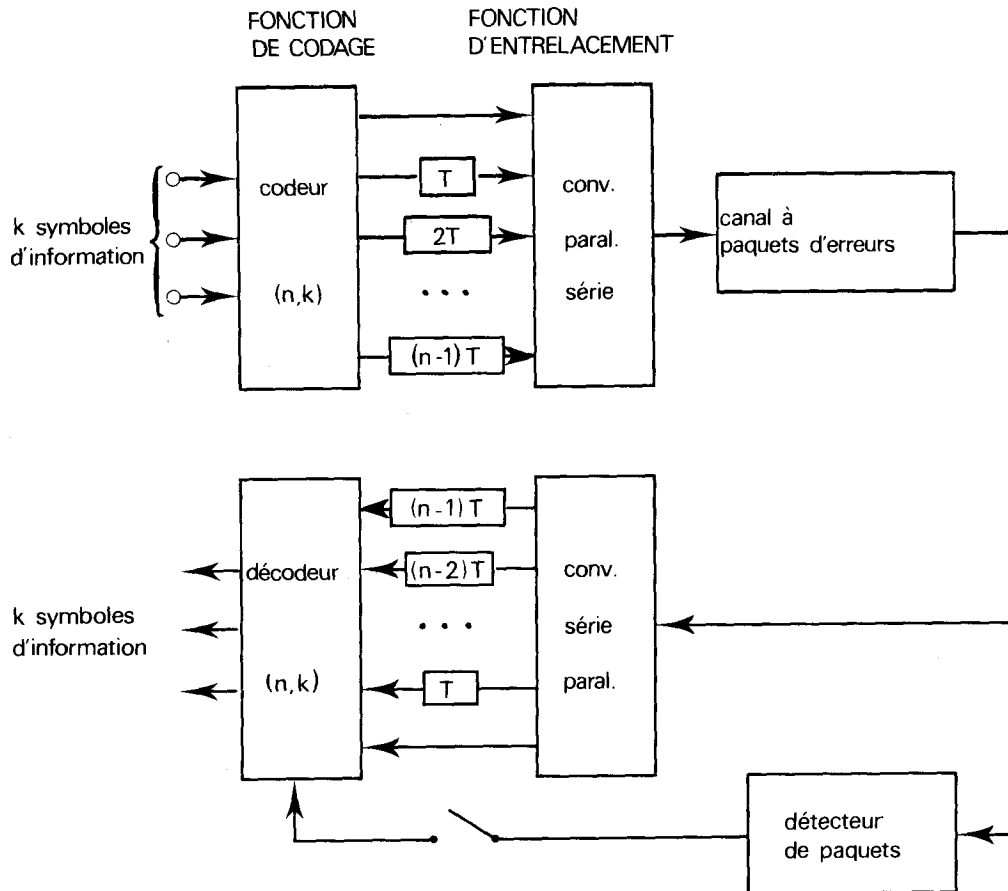
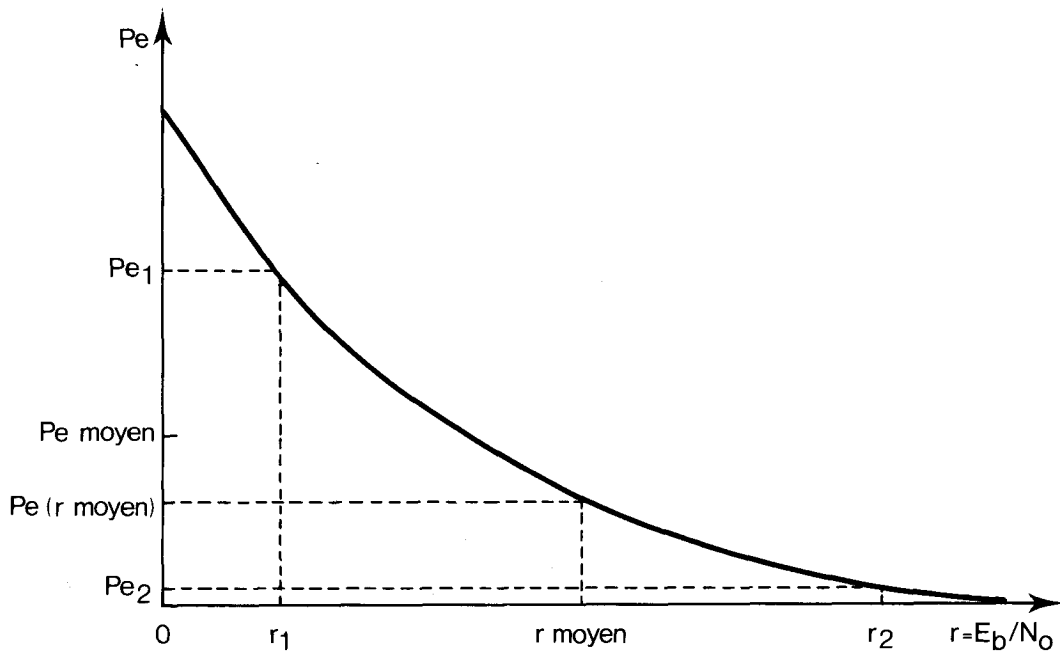


Fig. 7. — Schéma d'un dispositif de correction de paquets d'erreurs combinant codage et entrelacement. Si l'interrupteur K est fermé, le système fonctionne en correcteur d'effacements et un code cyclique est optimal; si K est ouvert, il fonctionne en correcteur d'erreurs et les codes de distance minimale  $d = n - k + 1$  sont optimaux. Le retard unitaire T sert à adapter la longueur des paquets d'erreurs aux paramètres n et k du code.

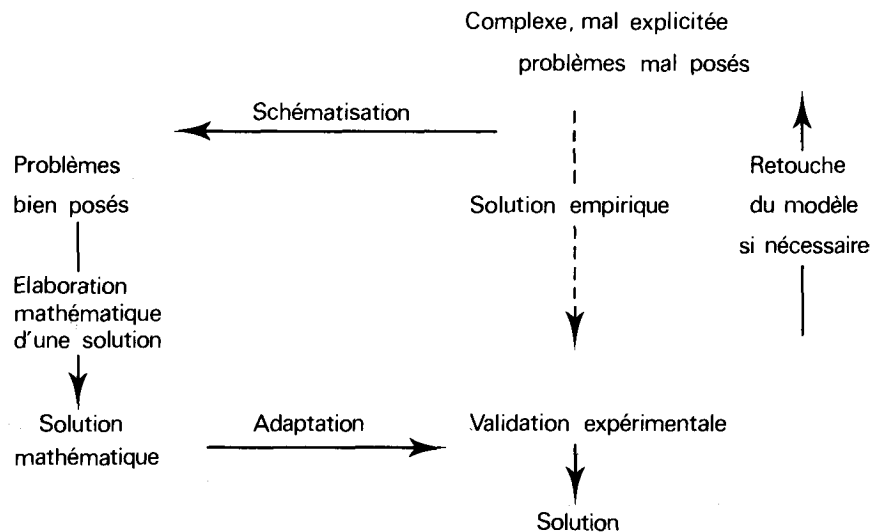




**Fig. 8.** — Amélioration de la probabilité d'erreur par effet de moyenne sur le rapport signal à bruit, due à la convexité de la fonction  $p_e(E_b/N_0)$ . On a par exemple :  $p_e = (1/2) \exp(-E_b/N_0)$ , probabilité d'erreur par symbole pour une modulation binaire orthogonale avec démodulation non cohérente;  $p_e < 2^{-n E(R)}$ , borne de Gallager de la probabilité d'erreur par mot pour un codage par blocs de longueur  $n$  et de taux d'émission  $R = k/n$ , où  $E(R)$  est une fonction croissante du rapport signal à bruit.

Théorie mathématique

Réalité physique



**Fig. 9.** — Schéma illustrant les rapports de la réalité physique et de la théorie mathématique pour la résolution d'un problème concret.

avec demande de répétition sur une voie de retour n'exige aucune hypothèse sur le canal (sinon la connaissance d'un ordre de grandeur de la fréquence des mots erronés en fonction de leur longueur, afin de la calibrer pour optimiser le débit moyen) et s'adapte en fait, en ralentissant le débit moyen si le

canal se dégrade, à sa qualité réelle. Il maintient ainsi une qualité minimale garantie, au détriment du débit. Ce procédé est d'une efficacité aussi remarquable que sa simplicité; il est très employé, en fait toutes les fois qu'il peut l'être, dans de nombreuses variantes de réalisation.

## 3. 5. UNE SOLUTION ÉPROUVÉE : LA DIVERSITÉ

Confrontée depuis ses origines à des canaux variables et mal connus, la radioélectricité sait de longue date tirer parti de canaux individuellement peu fiables (ou d'un unique canal variable employé à des instants différents) avec la technique dite « de diversité », qui consiste à utiliser conjointement plusieurs de ces canaux (ou de ces instants) pour transmettre un même message. En combinant les signaux ainsi reçus d'une manière qui favorise les plus fiables à chaque instant, on obtient une transmission globalement plus fiable qu'à travers chacun des canaux séparément. Le succès de la méthode est d'autant plus grand que les perturbations des canaux combinés sont moins corrélées. Pour la combinaison optimale des signaux reçus, tout se passe comme si le récepteur effectuait, préalablement à la démodulation, une moyenne des rapports signal à bruit des voies individuelles. Or, j'ai proposé voici plusieurs années, sous le nom de « décodage par répliques », une interprétation du codage comme une forme de diversité, « par calcul » [8, 9]. Plusieurs répliques d'un même symbole à décoder sont calculées en fonction de symboles reçus. En l'absence d'erreurs, ces répliques seraient identiques au symbole à décoder, cela traduisant les contraintes du code. Ainsi, l'utilité du codage est de même nature que celle de la diversité; le rôle de l'entrelacement est alors de réduire autant que possible la corrélation des erreurs affectant les répliques. Ayant subi codage et entrelacement, l'information à transmettre est répartie dans le temps (on généraliserait à la fréquence avec « l'étalement de spectre »), sur un intervalle long à l'échelle des variations du rapport signal à bruit. Le décodeur opère alors sur un rapport signal à bruit rendu par effet de moyenne beaucoup moins variable. La probabilité d'erreur étant fonction convexe du rapport signal à bruit, sa moyenne diminue d'une façon souvent considérable (fig. 8). Le codage apporte alors effectivement le bénéfice que l'on pouvait en attendre au vu de la courbe représentant la probabilité d'erreur moyenne en fonction du rapport signal à bruit.

### Conclusion

Ayant ainsi esquissé comment l'adaptation des moyens existants à des propriétés peu variables des canaux réels peut s'opérer, je voudrais en conclusion évoquer un dernier couple antagoniste qui dépasse le domaine simplement technique :

*concepts de la théorie/contraintes du réel.*

Si les études de codage ont abouti à tout un arsenal de moyens, dont j'ai essayé d'évoquer quelques uns, il reste dans une large mesure 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 nécessaire pour devenir peut-être la connaissance insuffisante des voies réelles.

Plus généralement, la mise en œuvre des codes suppose une compréhension des contraintes pratiques et des adaptations nécessaires d'une part, des possibilités et des limites des procédés de codage et décodage d'autre part. Il exige donc une communication effective entre les ingénieurs confrontés à des problèmes d'application et les spécialistes de la théorie des codes. Si les seconds apportent à des problèmes simplifiés (outrancièrement, diront quelquefois les premiers, mais ne doivent-ils pas être bien posés?) des solutions parfois compliquées (car la contrainte de réalisabilité ne s'impose pas à eux), les premiers recherchent des solutions simples (parfois simplistes, diront les seconds) à des problèmes intrinsèquement complexes et mal posés (fig. 9). Ainsi formulée, l'application des techniques de codage pose un problème plus humain que technique, de sorte que la vitesse de son évolution risque de s'évaluer en générations plutôt qu'en années. Il est vrai que la conscience croissante de la nécessité de cette communication est de nature à beaucoup l'accélérer : l'efficacité exige à l'évidence que le langage et les méthodes des uns soient compris des autres. L'enseignement y contribue à long terme ainsi, bien entendu, que des journées d'études comme celles-ci. Il faut donc reconnaître dans l'initiative qui nous réunit aujourd'hui un pas dans la bonne direction et en féliciter ses auteurs.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. E. SHANNON, *The mathematical theory of communication*, University of Illinois Press, 1949.
- [2] J. M. WOZENCRAFT et I. M. JACOBS, *Principles of communication engineering*, Wiley, 1965.
- [3] G. BATAIL, Débits critiques en transmission non binaire orthogonale, avec décisions fermes ou pondérées, *Ann. Téléc.* 39, n° 3-4, mars-avril 1984, p. 99-112.
- [4] G. D. FORNEY Jr, Convolutional codes I: algebraic structure, *IEEE Trans. on Information Theory*, IT-26, n° 6, novembre 1970, p. 720-738; corrections dans le IT-27, n° 3, mai 1971, p. 360.
- [5] J. K. WOLF, Efficient maximum likelihood decoding of linear block codes using a trellis, *IEEE Trans. on Information Theory*, 24, n° 1, p. 76-80.
- [6] G. BATAIL, Décodage pondéré optimal des codes linéaires en blocs I. Emploi simplifié du diagramme du treillis, *Ann. Téléc.*, 38, n° 11-12, novembre-décembre 1983, p. 443-459.
- [7] G. D. FORNEY Jr, Burst-correcting codes for the classic bursty channel, *IEEE Trans. on Communication Technology*, COM-19, n° 5, 2<sup>e</sup> partie, octobre 1971, p. 772-781.
- [8] G. BATAIL et M. DECOUVELAERE, Décodage par répliques, *Ann. Téléc.*, 31, n° 11-12, novembre-décembre 1976, p. 387-404.
- [9] G. BATAIL et A. H. M. EL-SHERBINI, Coding for radio channels, *Ann. Téléc.*, 37, n° 1-2, janvier-février 1982, p. 75-96.