



DEUXIÈME COLLOQUE
SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL
ET SES APPLICATIONS
NICE - 5 AU 10 MAI 1969

36/1

ENREGISTREMENT NUMERIQUE DES SIGNAUX

A. CASTANET

RESUME

Quand les signaux ne peuvent pas être traités en temps réel sur les lieux mêmes des essais, ils doivent être enregistrés. Les défauts de l'enregistrement analogique (dynamique réduite, imprécision de la base de temps) peuvent être éliminés en enregistrant les signaux directement sous forme digitale. Un appareillage spécial a été construit au Saclant ASWR Centre pour permettre l'enregistrement simultané de 5 canaux de 16 kilohertz de largeur de bande et 84 décibels de dynamique. Les signaux ainsi enregistrés peuvent être transférés au cours de la lecture du ruban dans un calculateur numérique, afin d'y subir un traitement élaboré. L'enregistreur utilisé est d'un type analogique standard à 14 canaux. 2 pistes libres peuvent être utilisées pour enregistrement analogique.



DEUXIÈME COLLOQUE
SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL
ET SES APPLICATIONS
NICE - 5 AU 10 MAI 1969

36/3

SIGNAL DIGITAL RECORDING

A. CASTANET

SUMMARY

Whenever the signals cannot be processed in real time during the experiments, they must be recorded. The defects of analogue recording (limited dynamic range, instability of the time base) may be eliminated by recording the signals directly in digital form. A special equipment has been constructed at the Saclant ASWR Centre, which permits the simultaneous recording in digital form of 5 channels, 16 kilohertz bandwidth each with a dynamic range of 84 decibels. The recorded signals can be replayed into a digital computer for detailed processing. A 14 channel analogue tape-recorder of a standard type is used. Two channels are left available for analogue recording.



ENREGISTREMENT NUMERIQUE DES SIGNAUX

Le traitement du signal peut être effectué soit en temps réel, soit en temps différé. La première méthode est évidemment la plus rapide. Mais elle ne peut pas toujours être appliquée : certains traitements, par exemple, sont trop longs pour pouvoir être effectués en temps réel ; d'autres nécessitent l'emploi d'un appareillage complexe, qui n'est pas mis en œuvre sur les lieux mêmes de l'acquisition. Dans de nombreux cas, il faut donc travailler en temps différé ; ceci signifie que le signal doit être enregistré.

Cet enregistrement se fait en général sur ruban magnétique. Dans l'état présent de la technique, c'est certainement là la meilleure solution, c'est-à-dire le meilleur compromis entre le prix de revient, la facilité de mise en œuvre, les nécessités du traitement, la fréquence des signaux et la fiabilité de l'appareillage. On pourrait évidemment envisager d'autres systèmes, par exemple emmagasinement dans des mémoires à tores magnétiques ; ce serait certainement plus fiable, mais beaucoup plus cher. On peut aussi faire de l'enregistrement sur papier ; dans de nombreux cas, c'est un moyen suffisant ; mais, dès que l'on veut une analyse fine des signaux ou un traitement nécessitant des transformations plus ou moins complexes, l'enregistrement sur papier se révèle tout à fait inadéquat.

L'enregistrement magnétique peut se faire, soit sous forme analogique, soit sous forme numérique. L'enregistrement analogique a été longtemps la seule méthode employée, et est encore très largement utilisé ; malheureusement, il présente des défauts sérieux, il dégrade dans des proportions sensibles la qualité des signaux enregistrés. Sa dynamique est limitée, en général inférieure à 45 décibels pour une bande de fréquence d'une dizaine de kilohertz : des dispositifs spéciaux et coûteux permettent d'étendre cette dynamique dans certains cas jusqu'à 60 décibels ; mais il semble difficile d'envisager une extension supplémentaire. Cette dynamique est souvent insuffisante, notamment en acoustique sous-marine, pour des analyses fines de signaux.



ENREGISTREMENT NUMERIQUE DES SIGNAUX

La base de temps n'est pas précise, parce que la vitesse de défilement du ruban n'est jamais constante : le phénomène de pleurage déforme de façon aléatoire l'échelle des fréquences. Il y a des fluctuations relatives de vitesse, et donc de temps, entre les différentes pistes du ruban, ce qui empêche les mesures de corrélation précises entre signaux à large bande enregistrés sur des pistes différentes.

L'enregistrement numérique permet de s'affranchir de tous ces défauts. La dynamique n'y est limitée que par le nombre de bits par échantillon fournis par le convertisseur analogique-numérique, et les instruments modernes donnent jusqu'à 15 bits, c'est-à-dire une dynamique supérieure à 80 décibels. La précision de la base de temps n'est limitée que par la précision de l'horloge qui pilote les opérations de conversion ; elle peut être pratiquement aussi élevée que l'on désire. Enfin, des mots de synchronisation enregistrés simultanément sur les différentes pistes permettent d'éliminer l'effet des fluctuations angulaires du ruban. Il semble donc que l'enregistrement numérique soit la meilleure solution à ce problème de l'enregistrement des signaux, dès que l'on envisage une analyse fine et que l'on doit éviter dans toute la mesure du possible la dégradation du signal.

Cependant, les enregistreurs numériques standards ne sont pas les instruments idéaux pour ce genre d'application. La densité d'information qu'ils permettent est souvent trop faible. Prenons un exemple : en acoustique sous-marine, on désire dans de nombreux cas enregistrer plusieurs signaux sur le même ruban, avec une dynamique aussi grande que possible. L'enregistrement de 10 signaux de 15 kilohertz et 80 décibels nécessite une cadence d'information de l'ordre de 8 millions de bits par seconde. Autant que nous puissions le savoir, aucun enregistreur numérique actuellement sur le marché n'est capable d'une telle performance.

Par contre, bien que cela semble paradoxal, on pourra enregistrer une telle densité de bits sur un enregistreur analogique normal. Prenons par exemple l'Ampex



ENREGISTREMENT NUMERIQUE DES SIGNAUX

FR 1600 (ou AR 1600), qui a une bande de fréquence de 2 MHz à la vitesse de ruban de 120 pouces par seconde en enregistrement direct : il serait théoriquement capable d'enregistrer à cette vitesse 4 millions de bits par seconde et par trace en NRZ (Non Return to Zero Mode), ce qui signifie 56 millions de bits par seconde pour l'ensemble des 14 traces. En pratique, pour conserver une fiabilité convenable, il sera préférable de maintenir la densité en deçà du chiffre ci-dessus. Néanmoins, il est possible d'atteindre un débit d'information très élevé avec une technique de ce genre.

Avec une telle densité, les fluctuations angulaires du ruban peuvent atteindre une amplitude de l'ordre de plusieurs bits ; ce qui rendrait très difficile la reconstruction des échantillons numériques s'ils avaient été enregistrés en parallèle en travers du ruban. Il est plus commode d'enregistrer les bits des échantillons numériques en série le long de chaque piste. Cependant, même en opérant de cette façon, on n'obtient pas une fiabilité parfaite, au moment où l'on relit l'information enregistrée, des erreurs apparaissent ; elles sont inévitables. Notons toutefois qu'il n'est pas indispensable d'atteindre une fiabilité presque parfaite, quand on se propose tout simplement d'enregistrer des signaux, comme en acoustique sous-marine par exemple ; il suffit que les échantillons numériques ou les groupes d'échantillons contenant des erreurs puissent être détectés et éliminés de l'analyse. Un taux d'élimination de l'ordre de 1 sur 10.000 serait parfaitement acceptable : la machine effectuant le traitement doit être programmée de façon à choisir la conduite à tenir lorsque des erreurs sont détectées.

Il faut tout de même noter qu'un enregistrement digital selon les techniques esquissées ci-dessus ne répondrait qu'assez mal aux besoins des mémoires séquentielles d'ordinateurs : la fiabilité serait insuffisante, les temps de démarrage et d'arrêt de l'enregistreur analogique seraient beaucoup trop longs, l'interface enregistreur - ordinateur ne serait pas d'un type standard. Cette technique d'enregistrement numérique à très haute densité sur enregistreur analogique normal avec échantillons en série piste



ENREGISTREMENT NUMERIQUE DES SIGNAUX

par piste convient par contre fort bien à l'acquisition des signaux, chaque fois qu'il est nécessaire d'emmagasiner une grande quantité d'informations sur le même ruban.

Un équipement complet a été construit suivant ces principes au Saclant ASWR Centre. Cette unité permet :

1. - L'enregistrement sur ruban magnétique in situ de 240.000 échantillons de signaux par seconde, chacun d'eux ayant une dynamique de 80 décibels,
2. - La lecture de l'information ainsi enregistrée et son transfert, après resynchronisation des différents échantillons et à la vitesse de l'enregistrement, dans le dispositif prévu pour le traitement.

L'appareil comporte :

- a. - un ensemble de sélecteurs de voies et de convertisseurs analogique-numérique,
- b. - un tiroir de préparation des échantillons qui met l'information sous une forme convenable pour permettre son enregistrement,
- c. - un enregistreur magnétique analogique d'un type standard,
- d. - un tiroir de lecture dont le rôle est de reformer les bits et les échantillons, de rétablir leur synchronisation et de mettre l'ensemble sous une forme appropriée pour son transfert dans le dispositif de traitement des signaux.

Tout cet appareillage est construit selon une technologie moderne à base de circuits intégrés.

Les organes d'entrée sont cinq unités sélecteur de voies - échantillonneur - bloqueur - convertisseur analogique/numérique. Chaque sélecteur peut avoir jusqu'à 4 entrées. Un amplificateur analogique placé à l'entrée de chaque voie adapte les niveaux et les impédances ; son amplification peut être réglée par sauts de 6 décibels.



ENREGISTREMENT NUMERIQUE DES SIGNAUX

Chaque convertisseur fonctionne à la cadence de 48.000 conversions par seconde. L'échantillon numérique comporte 15 bits, signe compris, ce qui signifie une dynamique de 84 décibels. Ces cinq unités d'entrée produisent donc 240.000 échantillons par seconde. Selon le théorème de Shannon, 240.000 échantillons par seconde suffisent à représenter une bande de fréquences de 120 kilohertz, pourvu que l'énergie des signaux correspondants soit tout entière comprise dans la bande des 120 kilohertz. En pratique, cela ne peut jamais être tout à fait vérifié. Mais, avec une atténuation suffisamment rapide dans le domaine des hautes fréquences, on peut raisonnablement poser que les 240.000 échantillons suffisent à représenter une bande de fréquences de 80 kilohertz avec une très bonne précision. Dans le cas qui nous occupe ici, des filtres passe-bas spéciaux ont été combinés avec les amplificateurs analogiques d'entrée, et l'hypothèse ci-dessus est pleinement vérifiée dans la mesure de la précision recherchée.

Le nombre de voies utilisables sur chaque sélecteur est ajustable entre 1 et 4, indépendamment pour chacun d'eux. Ceci signifie que le dispositif en question pourra numériser :

- soit : 5 signaux de 16 kilohertz
- soit : 10 signaux de 8 kilohertz
- soit : 20 signaux de 4 kilohertz
- soit une combinaison de signaux de 16,8 et 4 kilohertz ; par exemple :
 - 1 signal de 16 kilohertz
 - + 4 signaux de 8 "
 - + 8 signaux de 4 "

Avant enregistrement sur ruban, les données ainsi numérisées subissent un certain nombre de transformations : conversion en virgule flottante, addition de mots de parité et de séquences de synchronisation, répartition de l'ensemble sur les pistes de l'enregistreur.

Les échantillons produits par les convertisseurs ont 15 bits, ceci correspond à une précision de 1 part sur 16.000.



ENREGISTREMENT NUMERIQUE DES SIGNAUX

Il est bien évident que, dans de nombreux domaines de la recherche appliquée et en particulier en acoustique sous-marine, une précision relative de 1 % sur l'amplitude de chaque échantillon est beaucoup plus réaliste et correspond beaucoup mieux aux conditions pratiques de l'acquisition des signaux. Les échantillons sont donc convertis en virgule flottante, c'est-à-dire exprimés sous la forme

$$A = \pm a 2^b$$

Chaque échantillon devient un mot de 12 bits :

- le premier bit représente le signe
- les 7 suivants la mantisse a définie donc à 0,8%
- les 4 derniers un exposant b

Cet exposant b permet de couvrir une dynamique de 90 décibels tout au long de laquelle l'échantillon peut être défini à la précision de 0,8%. En bas de l'échelle, pour les valeurs de b égales à 0, l'échantillon continue à être décrit, avec une précision moindre sur 42 décibels correspondant à la dynamique de la mantisse. Ceci donne une dynamique totale de 132 décibels, supérieure de 48 décibels à la dynamique de l'échantillon initial de 15 bits. Ces 48 décibels sont couverts par les possibilités de réglage de l'étage d'amplification analogique placé sur chaque voie avant la conversion numérique : la valeur du gain correspondant est injectée dans le dispositif en virgule flottante.

En résumé, la précision de chaque échantillon enregistré est de 0,8% ; la dynamique totale du nombre représentant l'échantillon sur le ruban est de 132 décibels ; mais la dynamique du convertisseur d'entrée reste 84 décibels ; c'est ce chiffre-là qui représente le rapport signal sur bruit intéressant pour chaque événement isolé enregistré.

Après cette conversion en virgule flottante, l'information subit encore un certain nombre de transformations.



ENREGISTREMENT NUMERIQUE DES SIGNAUX

Les échantillons issus d'un même convertisseur numérique sont répartis sur 2 voies, qui correspondent chacune à 1 piste de l'enregistreur. Les échantillons de rang impair sont envoyés en série sur 1 piste et les échantillons de rang pair en série sur l'autre piste.

Sur chacune de ces voies, les échantillons sont répartis en groupes. Chaque groupe comporte en série 12 mots normaux, 1 mot de parité et 1 séquence de synchronisation.

La séquence de synchronisation est une suite de bits spécifiée unique générée par le système lui-même. Ces séquences sont enregistrées simultanément sur toutes les pistes.

Le mot de parité est fait de 12 bits. Le bit numéro n de ce mot de parité donne la parité des 12 bits numéro n des 12 mots normaux précédents enregistrés sur la même piste. Il est généré dans le même dispositif.

Les signaux numérisés et transformés de cette manière sont ensuite convertis en format NRZ (1 changement de polarité signifiant un bit "1" et l'absence de changement de polarité pendant une période d'horloge signifiant un bit "0") et enregistrés.

Les échantillons issus des 5 convertisseurs analogique - numérique sont enregistrés sur 10 pistes. Une onzième piste est utilisée comme piste de parité, chaque bit de cette piste donnant la parité des 10 bits des 10 autres pistes enregistrés simultanément : ce système permettra avant traitement une vérification en croix, c'est-à-dire une détection et une correction de la plupart des erreurs. Une douzième piste est utilisée comme piste compteur ; un numéro d'ordre, qui part de zéro au début du ruban et qui s'accroît d'une unité à chaque milliseconde, est enregistré en code binaire sur cette piste auxiliaire. Elle fournit un moyen de mesure et de repérage très précis le long du ruban.



ENREGISTREMENT NUMERIQUE DES SIGNAUX

2 pistes de l'enregistreur restent libres et peuvent être utilisées pour l'enregistrement de signaux en analogique.

L'enregistreur utilisé est un AR 1600 AMPEX à une vitesse de défilement du ruban de 30 pouces par seconde. La densité des bits est de 12.000 bits par pouce et par trace, ce qui est assez éloigné de la densité maximum théorique de 33.000 : cette marge de sécurité permet de conserver une fiabilité satisfaisante.

Le rôle du tiroir de lecture est de reconstituer l'information telle qu'elle avait été enregistrée sur les 12 traces. Il s'agit de reformer l'onde carrée à partir de l'onde profondément perturbée qui est récupérée au cours de la lecture, de rétablir une succession correcte de "0" et de "1" trace par trace, de découper les échantillons et les mots de parité sur chaque voie, et enfin de resynchroniser grâce aux séquences de synchronisation les échantillons enregistrés sur les différentes traces. A la sortie de ce tiroir de lecture, tous les défauts introduits par l'enregistreur et dus aux variations de sa base de temps et aux fluctuations angulaires du ruban sont éliminés. L'information est prête à être transférée dans le dispositif prévu pour le traitement du signal.

Au Saclant ASWR Centre, ce dispositif est un ordinateur à usage général. L'ordinateur est en effet capable d'entreprendre n'importe quel type d'analyse une fois les échantillons des signaux emmagasinés dans ses mémoires ; il peut procéder à toutes les opérations qui seraient possibles dans une machine analogique, pourvu que chaque étape de l'analyse puisse être traduite en opérations arithmétiques sur les valeurs des échantillons ; il est en outre capable de mener à bien des traitements difficilement imaginables par des méthodes analogiques, par exemple des études statistiques.



ENREGISTREMENT NUMERIQUE DES SIGNAUX

On peut toutefois envisager des dispositifs de traitement de signaux complètement différents, des corrélateurs, des analyseurs de spectres, etc. : ces dispositifs peuvent travailler en numérique ou en analogique ; rien n'empêche en effet de reconvertir les signaux en analogique. Le système d'enregistrement et de lecture décrit ci-dessus a permis de retrouver en temps différé les signaux dans l'état où ils avaient été enregistrés, dynamique élevée, pas d'erreur sur la base de temps, pas de fluctuations relatives de temps entre les différents canaux : c'est là l'essentiel si l'on veut procéder à une analyse fine.

Le système d'enregistrement et de lecture décrit ici n'est tout de même pas parfait. Des erreurs sont possibles à tout moment, c'est-à-dire que des bits ne sont pas relus comme ils avaient été enregistrés du fait des imperfections du ruban et de son système d'entraînement. Mais la fréquence de ces erreurs reste assez faible, de l'ordre de grandeur de 1 sur 10.000.000, malgré la densité nettement plus élevée que pour un enregistreur numérique standard. Les mots de parité enregistrés sur chaque piste et la onzième piste de parité permettent une détection et une correction de ces erreurs, pourvu que la machine utilisée pour le traitement du signal soit capable d'effectuer les opérations correspondantes : c'est le cas lorsque cette machine est un ordinateur à usage général. Le taux des erreurs non détectables et non corrigeables n'est pas supérieur à 1 sur 100.000.000 : ceci signifie une fiabilité très satisfaisante pour une acquisition de signaux.

Ce système d'enregistrement et de lecture sur ruban magnétique a été conçu et réalisé au Saclant ASWR Centre pour permettre des mesures de cohérence de propagation acoustique en milieu marin. Il s'agissait d'enregistrer les signaux issus d'un réseau d'hydrophones après production d'une explosion dans le milieu. Il fallait conserver de façon rigoureuse les différences de phase entre les réponses des différents hydrophones, de façon à pouvoir en déduire

ENREGISTREMENT NUMERIQUE DES SIGNAUX

les déformations des fronts d'onde. D'autre part, le signal produit par une explosion se compose d'un pic à grande amplitude, suivi d'une longue réverbération à niveau beaucoup plus faible ; une représentation correcte de ce phénomène demande une très grande dynamique. Seul le système d'enregistrement décrit ici était en mesure de répondre aux besoins. Le même système s'impose de lui-même chaque fois que la qualité d'enregistrement requise oblige à éliminer l'analogique, et qu'il est nécessaire d'enregistrer sur le même ruban une grande quantité d'informations.

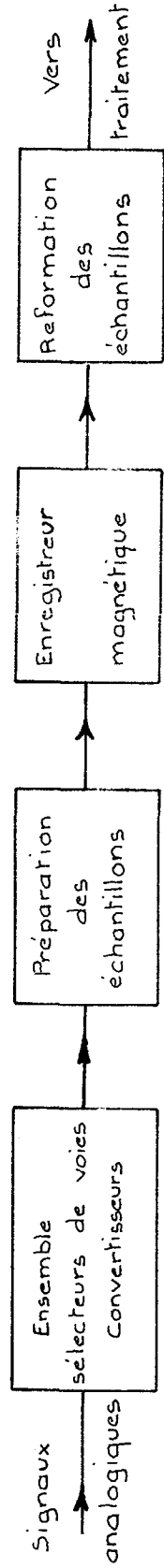


Fig. 1 : Schéma de l'ensemble

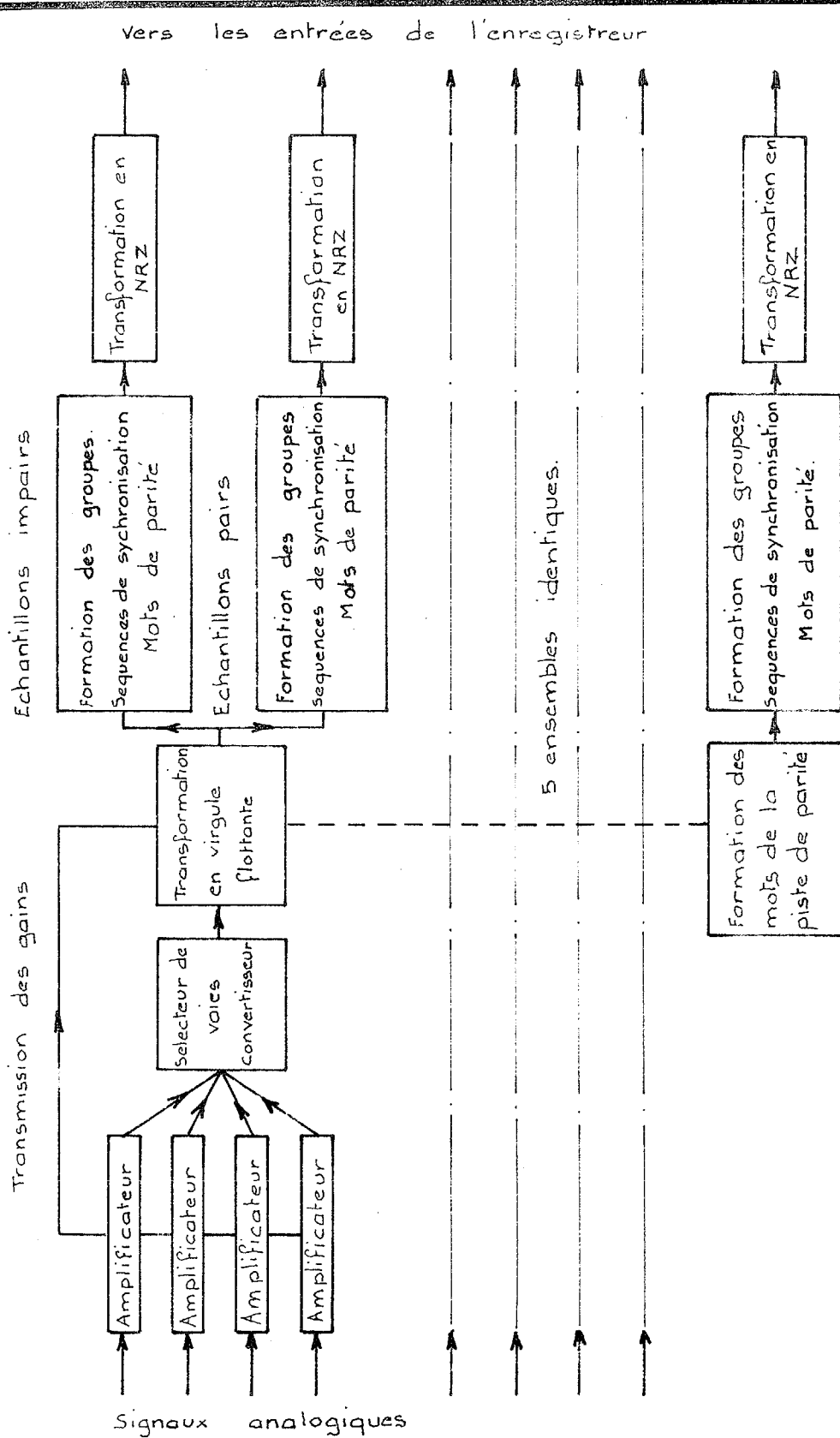


Fig. 2 : Schema de l'enregistrement

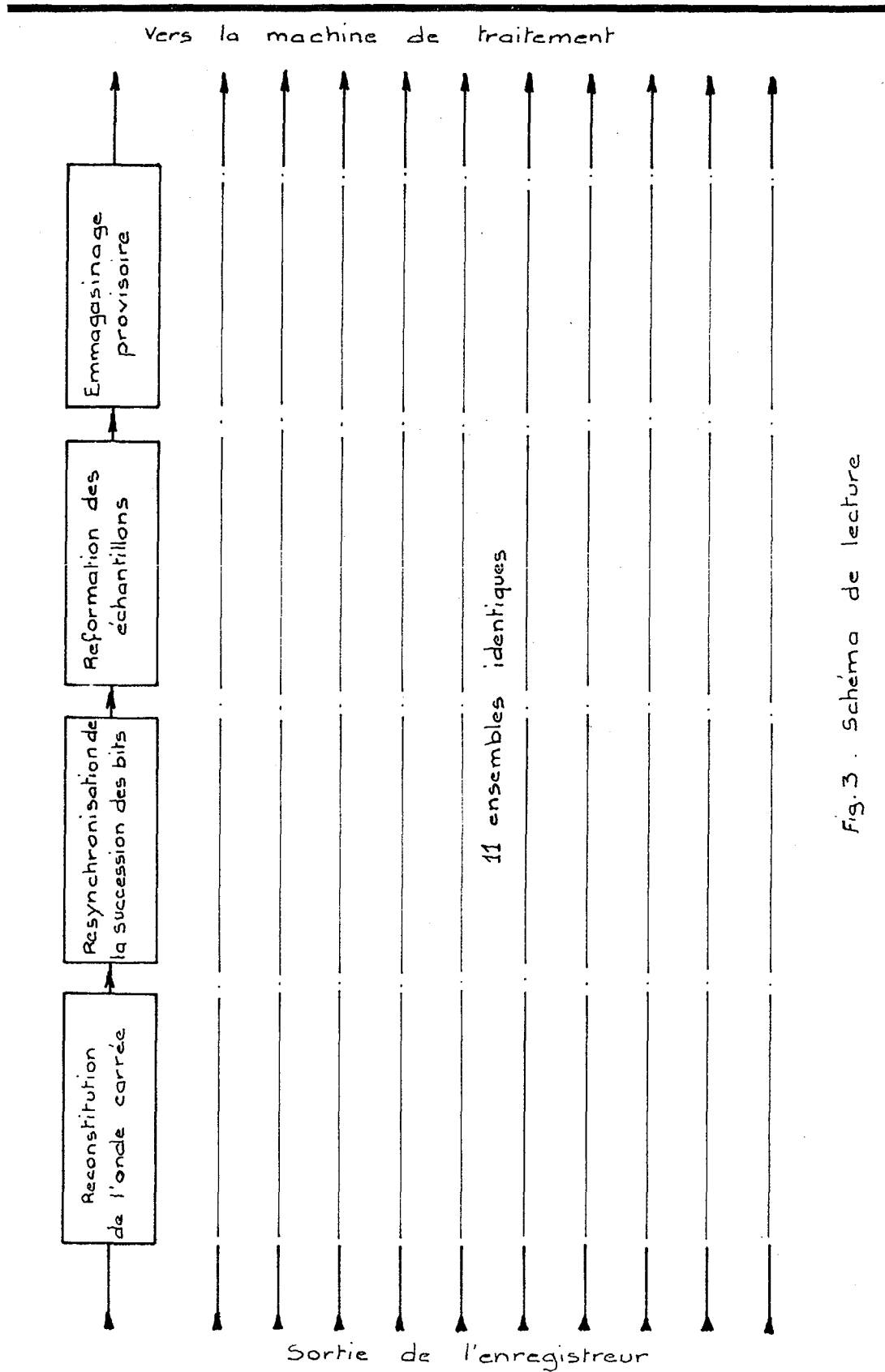


Fig. 3 . Schéma de lecture