

# NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 20 MAI 1983

TRAITEMENT DE SIGNAUX D'EMISSION ACOUSTIQUE PAR DES METHODES D'ANALYSE  
DE DONNEES MULTIDIMENSIONNELLE

F. LEFEVRE - P. GAILLARD

Université de Technologie de Compiègne - Département de Mathématiques Appliquées et Informatique  
B.P. 233 - 60206 COMPIEGNE Cedex - France

## RESUME

Le traitement des signaux d'émission acoustique émis par les métaux placés sous contraintes sert à l'étude des matériaux et au suivi de structure en service.

La nature de ces signaux et l'environnement dans lequel ils sont recueillis ne permet pas une discrimination aisée des sources d'émission. Il n'existe pas de connaissance bien formulée des caractéristiques des signaux de sorte qu'il faut construire des mécanismes élémentaires de reconnaissance pour les extraire. L'extraction et la sélection de ces caractéristiques sont effectuées avec des méthodes statistiques d'analyse de données.

Deux types de signaux sont rencontrés en Emission Acoustique, ils conditionnent l'extraction des caractéristiques :

- Enveloppe et densité spectrale pour les signaux de type salve,
- Moments statistiques et densité spectrale pour l'émission acoustique continue.

La sélection des caractères a pour but de compresser le nombre des caractéristiques tout en conservant les plus discriminantes. Des exemples de traitement par l'analyse en composante principale sont présentés. La validation de la représentation de l'information est facilitée par l'utilisation de méthodes de projection non linéaire.

Le traitement a été conçu de façon modulaire pour permettre de prendre en compte d'une part la nature spécifique de chaque problème et d'autre part l'évolution de la connaissance que l'on en a.

## SUMMARY

The processing of acoustic emission signal occurring during a material evaluation test is very useful for the material studies and monitoring in service structure.

Due to the nature of these signal and the operating environment it is very difficult to discriminate the different kinds of signals. We don't know exactly the features of the signals so we must find some elementary recognition mechanisms.

Multivariate statistical methods are used to get and select the main feature of the signals.

Different types of features are used to describe the signal depending on the nature of the acoustic emission : continuous emission or by burst.

- For the first one, we use the power spectral density or the envelop of the time representation of the signal ;
- For the second one the power spectral density and the statistical moments of the time representation of the signal.

The main goal of the selection of the feature is to reduce feature without reducing the information included in the signal. Some examples of processing with the principal component analysis are presented. The use of non linear mapping method make easier the validation of representation of the signals.

The processing have been done in a modular way, in order to take into account the specific part of each problem and the development of the knowledge.



## I. CADRE DE L'ETUDE

L'analyse des signaux émis par les métaux placés sous contrainte sert à l'étude des matériaux et au suivi de structure en service. Deux voies ont été suivies dans ce domaine :

- caractérisation de chaque métal pour un type d'essai mécanique donné par le comptage (taux et cumul) des événements acoustiques recueillis par des capteurs piézoélectriques résonnants ;
- localisation des défauts, ou fissures dans des structures mécaniques en service par un mouillage de capteurs permettant de dresser une carte des événements acoustiques.

Jusqu'à présent, la discrimination entre les signaux d'émission acoustique et les signaux parasites se fait difficilement en laboratoire par des experts. Ces signaux parasites sont d'origines très diverses :

- machine de traction, secteur, électronique... pour les essais en laboratoire ;
- ambiance industrielle, bruits de houle... pour le suivi des plates-formes off-shore par exemple.

Le nombre important des sources d'émission, l'hétérogénéité des matériaux contrôlés, les difficultés de mesure des fonctions de transfert du système métal-couplant-capteur, montrent que des méthodes d'analyse statistique multidimensionnelle sont indiquées pour traiter ce genre de problème.

Le but de notre recherche est de donner à l'expert métallurgiste un outil suffisamment complet pour étudier toutes les sources d'émission acoustique et suffisamment souple pour s'adapter à chaque expérience, c'est-à-dire pour des matériels et des types d'essais mécaniques différents. Comme il n'existe pas de connaissance bien formulée des caractéristiques des signaux, nous sommes obligés de travailler par approches successives en construisant des mécanismes élémentaires de reconnaissance pour extraire des caractéristiques. L'organisation des caractéristiques s'effectue de façon à :

- obtenir des caractéristiques plus discriminantes
- comprimer le nombre d'opérations à effectuer.

A ce stade, il est illusoire de rechercher une solution en dehors d'un contexte expérimental, pour des problèmes de cette complexité. En d'autres termes, le problème est général et les solutions sont particulières. Les solutions sont donc adaptées à des applications particulières : métaux différents, essais de traction, essais de fatigue, etc...

Pour de telles applications, le traitement doit être conçu de façon modulaire pour permettre de prendre en compte l'évolution de la connaissance que l'on a du problème.

De récents travaux 1 à 6 ont montré qu'il est possible de mettre en évidence des mécanismes physiques au sein des matériaux par leur signature acoustique. Mais, bien qu'opérant sur des caractéristiques voisines des signaux d'Emission Acoustique, P.G. Doctor et T.P. Harrington 3, 4, 5 utilisent un apprentissage des classes de signaux (il s'agit essentiellement de bruits d'origine mécanique dont on connaît les sources), alors que P. Bae procède par classification sans maître (ici, il n'y a pas d'apprentissage possible, les sources n'étant pas connues de l'expert).

C'est ce dernier type de méthode que nous mettons en oeuvre parmi les modules de traitements pour reconnaître les diverses formes.

## II. LES METHODES UTILISEES

Pour analyser les signaux d'Emission Acoustique et les corréler aux sources physiques, nous utilisons une chaîne de modules de traitement présentés figure 1.

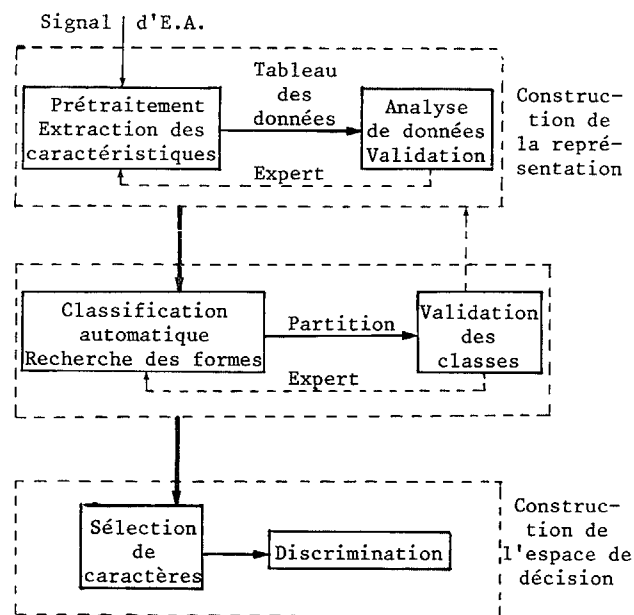


Figure 1 : Méthodologie

La construction de l'espace de représentation apparaît comme une étape importante de l'analyse, dans la mesure où elle conditionne la reconnaissance des formes. Cette phase de traitement ne peut être entièrement automatique car elle nécessite la connaissance de l'expert sur le signal (nature, information,...) pour la mise en oeuvre de modules élémentaires de traitement du signal :

- filtrage, estimation de densité spectrale de puissance, calcul d'enveloppe, extraction de primitives (valeurs crêtes, pentes...)

et de statistique :

- estimation des moments, tests d'adéquation, tests d'hypothèses...

La validation de la représentation est faite à partir de l'analyse de données multidimensionnelle par l'étude des relations linéaires entre les caractères et la mise en évidence de structures dans les données.

A ce stade, dans le cas de structures simples, il se peut que l'expert identifie des classes de formes en observant leurs projections dans les plans factoriels, mais lorsque le nombre de caractères est important, la structure des données n'est conservée que dans des espaces de dimension supérieure à trois. La projection non linéaire peut alors permettre de visualiser les données dans un plan.

La recherche de l'espace de représentation se présente donc comme une mise en forme du signal compte tenu de la connaissance de l'expert.

### Prétraitement - Paramétrisation

Cette phase du traitement consiste à extraire du signal d'E.A. certains caractères ou primitives susceptibles de représenter les formes significatives des sources émettrices.

Les paramètres à extraire du signal vont être très différents suivant la nature de celui-ci. Les signaux d'E.A. peuvent être classés en deux types (Fig. 2) :

- les signaux de type "burst" (salve), rencontrés fréquemment au cours des essais de fatigue ;
- les signaux de type continu, présents dans toutes les expériences.

S'il est naturel d'essayer de représenter des signaux par leur enveloppe lorsqu'il s'agit de salves, il paraît plus intéressant de caractériser des signaux d'E.A. continus par leur contenu fréquentiel.

Les caractéristiques utilisées sont des énergies relatives par bande de fréquence : les spectres sont découpés en bandes pour chacune desquelles l'énergie est calculée et réduite par l'énergie totale.

Avant cette phase de paramétrisation, les signaux ont été au préalable traités :

- acquisition, qui donne une première compression des données, dûe aux limites du matériel employé (fréquence d'échantillonnage élevée, temps d'accès aux disques...)
- filtrage passe-haut (suppression des bruits d'origine mécanique)
- calcul des moments statistiques
- calcul d'enveloppe
- estimation de la densité spectrale de puissance.

C'est donc sur une suite de portions de signal (fichiers) que se fait la paramétrisation.

L'utilisation des énergies relatives permet de comparer les fichiers entre eux et de mettre en évidence d'éventuelles évolutions dans certaines bandes de fréquences. Le nombre de bandes de fréquences est fixé en tenant compte de la résolution des spectres et de la puissance du calculateur utilisé.

### III. L'EXPERIMENTATION

L'ensemble des travaux s'est effectué sur 12 éprouvettes cylindriques en alliage d'aluminium 2618, soumises à des essais de tractions. Les caractéristiques générales de la chaîne de mesure étaient les suivantes :

- capteurs piézoélectriques résonnants à environ 200 kHz
- gain de 90 dB
- filtrage passe-haut à 50 kHz (suppression de l'essentiel des bruits mécaniques)
- échantillonnage sur 12 bits à 750 kHz.

Chaque expérience d'environ 3 à 4 minutes est représentée par 300 fichiers de 2048 points soit environ 0.003 % du signal d'E.A. La densité spectrale de puissance est estimée avec une résolution de 790 Hz (pondération de Hamming).

#### III.1 - Analyse en composantes principales

La méthode consiste à rechercher par combinaisons

linéaires des composantes dans l'espace  $R_n$  un repère orthonormal dans lequel les axes (factoriels) discriminent au mieux les observations. Le programme développé effectue une analyse statistique élémentaire des variables qui montre une forte corrélation entre l'écart-type et l'énergie totale ; ce résultat, conforme à la théorie, est un moyen de vérifier la validité des traitements précédents.

Le calcul des valeurs propres de la matrice des corrélations montre que les neuf premiers axes factoriels portent 80 % de l'information ; 26.8 % de l'information est déterminée par le premier axe, il est expliqué par l'énergie totale et l'écart-type. Le second axe est expliqué par l'énergie relative dans la bande centrale du spectre. La représentation des points dans le plan 1-2 qui contient 35 % de l'information montre sur le premier axe une structure correspondant à la répartition de l'énergie dans les bandes de fréquence.

Considérant que l'information principale dûe aux composantes énergie totale et écart-type est répartie sur les composantes énergies relatives, et que les composantes "skewness" et "kurtosis" ont un apport négligeable, nous n'avons retenu que les caractéristiques fréquentielles pour la suite de l'analyse.

Dans l'espace de travail ainsi réduit à 13 composantes, le premier axe factoriel est caractérisé par l'énergie totale et l'énergie dans la première bande de fréquence. Ces deux composantes varient en opposition. Les axes 2 et 3 sont expliqués par les deux bandes de fréquence voisines de la fréquence de résonance du capteur.

La projection des points sur le premier plan factoriel (Fig. 5) montre la structure du nuage ainsi obtenu. Il est nécessaire de caractériser les points par leur position au cours de l'essai de traction :

- déformation élastique (faibles valeurs sur l'axe 1)
- limite élastique (valeurs importantes sur l'axe 1)
- déformation plastique (répartis uniformément autour de l'origine)
- rupture (faibles valeurs sur l'axe 2).

Bien qu'une structure apparaisse dans le plan, il n'est pas possible de caractériser les différentes zones (classes) par des caractères spécifiques à cause de leurs recouvrements partiels. Ce résultat n'exclut pas toute interprétation à partir de cette représentation (i.e. à partir des caractères sélectionnés) ; en effet, la méthode étant basée sur l'inertie des axes, elle masque les caractéristiques des ensembles d'individus de faible cardinal comme par exemple ceux correspondants à la limite élastique et à la rupture.

Il a donc été envisagé d'employer une méthode de projection non linéaire dans laquelle la distance originale inter-point est conservée.

#### III.2 - Projection non linéaire (cf Annexe)

Cette méthode permet de calculer les coordonnées des points dans un espace de dimension plus faible (ici 2) à celle de l'espace de départ en conservant les distances inter-points.

La technique utilisée étant très sensible au nombre d'individus, ceux-ci ont été regroupés 20 par 20 et remplacés par leurs centres de gravité. La projection obtenue (Fig. 6) montre une structure plus "claire" du nuage :



- 0-1 déformation élastique
- 2 limite élastique
- 3-13 déformation plastique
- 14 rupture

Les caractères sélectionnés discriminent donc les points dans un espace de dimension 13.

IV. CONCLUSION

Cette étude a permis de montrer que le signal d'E.A. est porteur d'informations et que ces informations sont suffisantes pour discriminer les différentes zones de l'essai de traction. Compte-tenu d'un apprentissage, il est possible de comparer différentes expériences avec divers capteurs (mais de même fréquence de résonance).

L'outil développé est suffisamment général et modulaire pour s'adapter à des applications diverses de contrôle non destructif. Son emploi devrait permettre d'étudier de façon systématique les caractéristiques des signaux d'E.A., en particulier en explorant un spectre plus large des signaux avec des capteurs large bande.

La caractérisation des phénomènes physiques par leur signature acoustique ne pourra être obtenue que lorsque une masse importante de données provenant d'applications particulières aura été analysée et aura permis l'évolution de l'outil de traitement vers une machine experte dans la reconnaissance du signal d'E.A.. L'absence de validation au niveau microscopique par un expert fait que la recherche par "tâtonnement", la manipulation de bases de données représentent les seules voies de progression dans l'évaluation des caractéristiques des signaux d'E.A.

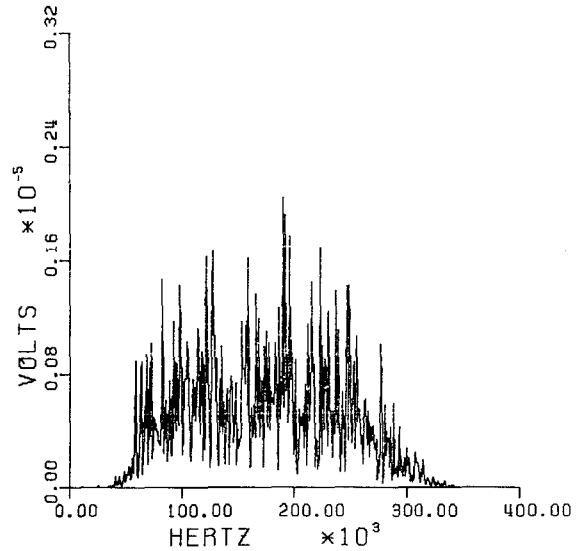


Figure 3 : Densités spectrales de puissance

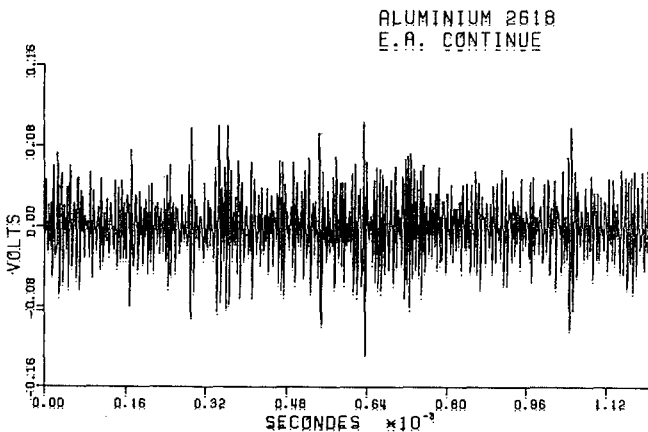
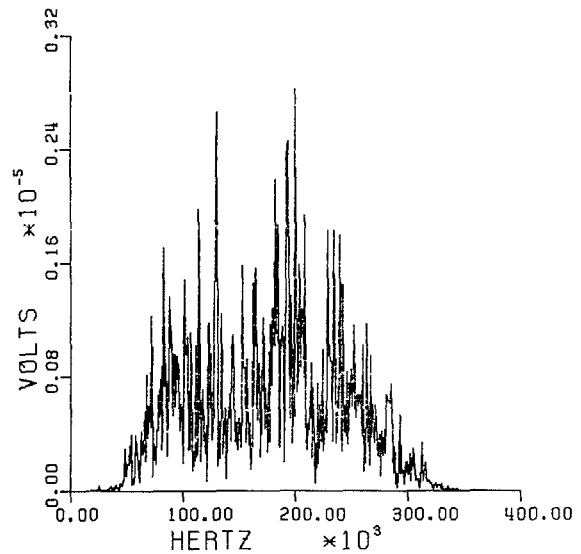
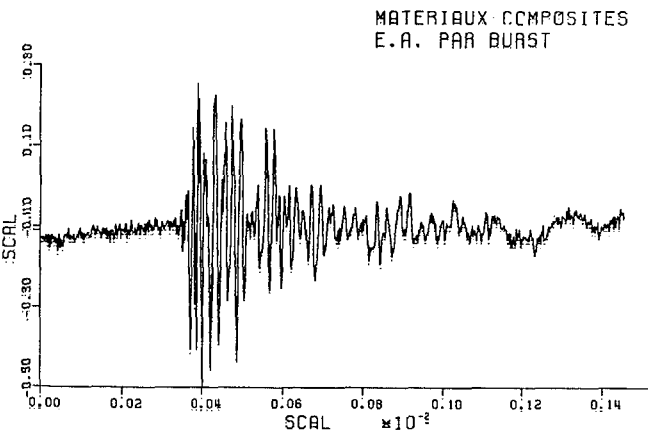


Figure 4 : Signaux d'émission acoustique



TRAITEMENT DE SIGNAUX D'EMISSION ACOUSTIQUE PAR DES METHODES D'ANALYSE DE DONNEES MULTIDIMENSIONNELLE

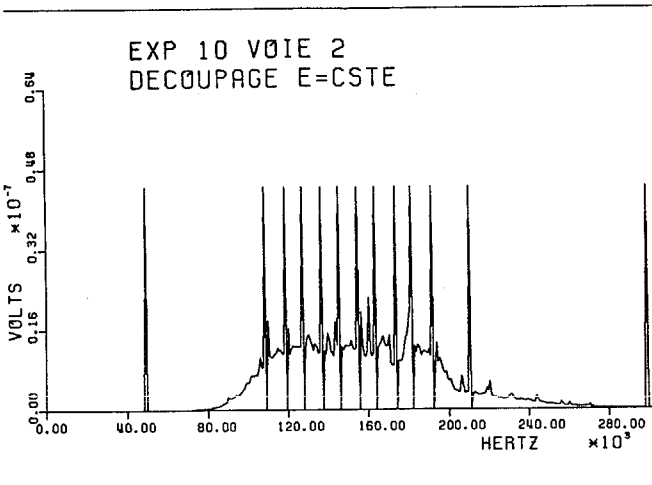


Figure 4 : Découpage des spectres à énergie constante

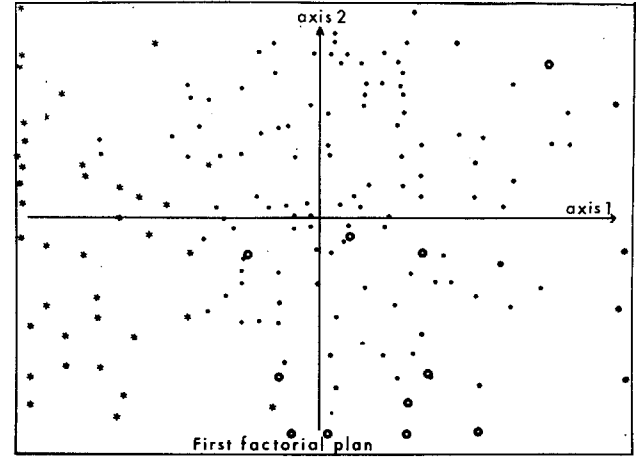
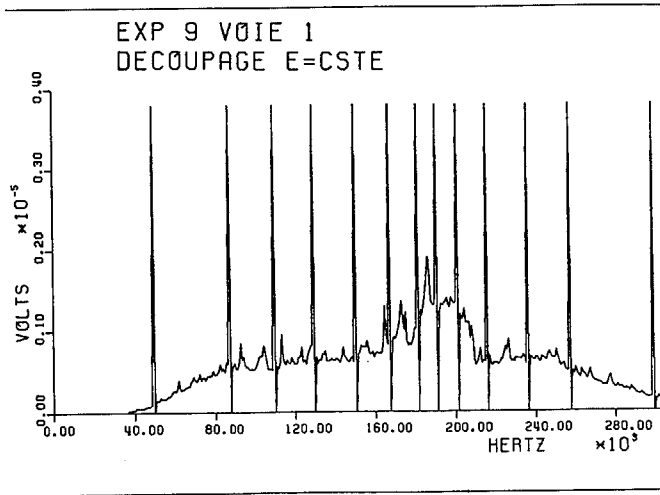


Figure 5

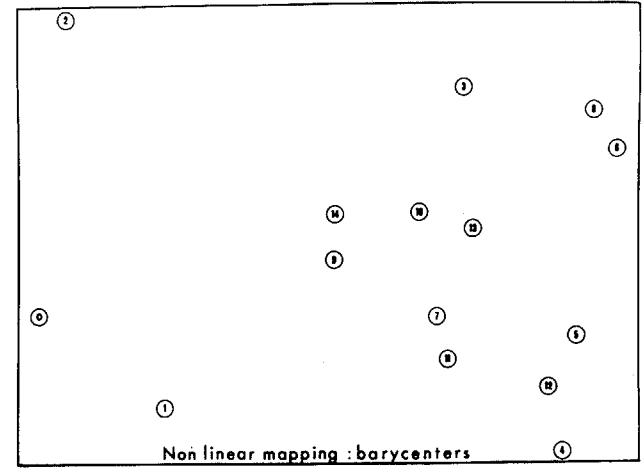


Figure 6



ANNEXE : Algorithme de projection non linéaire

Etape 1

- Choix de la dimension de l'espace d'arrivée  
 $d = 1, 2, \dots, n$  ( $n = \text{dim. espace de départ}$ )
- Choix des individus de cet espace d'arrivée
  - . tirage au hasard (parmi les  $N$  de l'ensemble)
  - . choix des composantes par la distance de Minkowski
- Choix du facteur de correction ( $\alpha = \text{Magic Factor}$ ) et de l'erreur minimum ( $E_{\min}$ ) à atteindre sur les distances entre individus

Etape 2

- Calcul des distances entre les individus dans l'espace de départ ( $d_{ij}^*$ )
- Calcul des distances entre les individus dans l'espace d'arrivée ( $d_{ij}$ )

Etape 3

- Calcul d'une fonction d'erreur sur les distances :

$$E_1 = f(d_{ij}^*, d_{ij})$$

avec

$$f(d_{ij}^*) = \frac{1}{N \sum_{i < j} d_{ij}^*} \sum_{i < j} \frac{(d_{ij}^* - d_{ij})^2}{d_{ij}^*}$$

- Test sur  $E$  : si  $E < E_{\min}$  choisie alors arrêt de l'algorithme.

Etape 4

- Correction des composantes des individus de l'espace d'arrivée :

$$Y'_p = Y_p - \alpha \left( \frac{\partial E / \partial Y_p}{|\partial^2 E / \partial Y_p^2|} \right)$$

avec

$$\frac{\partial E}{\partial Y_p} = - \frac{2}{C} \sum_{j=1}^N \frac{d_{pj}^* - d_{pj}}{d_{pj}^* d_{pj}} (Y_p - Y_j)$$

et

$$\frac{\partial^2 E}{\partial Y_p^2} = - \frac{2}{C} \sum_{j=1}^N \frac{1}{d_{pj}^* d_{pj}} (d_{pj}^* - d_{pj}) - \frac{||Y_p - Y_j||^2}{2 d_{pj}^2} \frac{d_{pj}^*}{d_{pj}}$$

avec

$$C = \sum_{i < j}^N d_{ij}^* \quad (\text{constante})$$

$$p = 1, 2, \dots, N$$

Etape 5

- Calcul des distances entre les individus "corrigés" dans l'espace de sortie

$$E_2 = f(d_{ij}^*, d_{ij})$$

Etape 6

- Vérification de la convergence de l'algorithme :

$$\text{Pente} = \frac{E_1 - E_2}{E_1}$$

- . Si pente  $< 0$ , on diverge ; va à l'étape 7
- . Si pente = 0, on a atteint un maximum ; va à l'étape 7
- . Si pente  $> 0$ ,  
Si pente  $> 1/\infty$ , va à l'étape 4  
Sinon, va à l'étape 7

Etape 7

- Impression du résultat
- Arrêt de l'algorithme

REFERENCES

- 1 - W.Y. CHAN, D.R. HAY, C.Y. GUEN and O. SCHWELB, "Application of Pattern Recognition Techniques in the Identification of Acoustic Emission Signals", 5th international conference on Pattern Recognition, Miami, Déc. 1980
- 2 - P. BAE, A. CHAARI, P. GAILLARD, J.F. CHRETIEN, "Pattern Recognition technique for characterization and classification of acoustic emission signal", 5th international conference on Pattern Recognition, Miami, Déc. 1980
- 3 - P.G. DOCTOR and T.P. HARRINGTON, "Analysis of eddy current data using Pattern Recognition Methods", 5th international conference on Pattern Recognition, Miami, Déc. 1980
- 4 - T.P. HARRINGTON and P.G. DOCTOR, "Acoustic Emission Analysis using Pattern Recognition", 5th international conference on Pattern Recognition, Miami, Déc. 1980
- 5 - P.G. DOCTOR, T.P. HARRINGTON and P.H. HUTTON, "Pattern Recognition Methods for Acoustic Emission Analysis", technical report Battelle, July 1979
- 6 - F. LEFEVRE, P. GAILLARD and J.F. CHRETIEN, "Analysis of Acoustic Emission datas using Pattern Recognition methods", international conference on Non Destructive Testing, Moscou, Déc. 1982
- 7 - SAMMON, "A non linear mapping for data structure analysis", IEEE Trans. on Computer, vol. C-18, May 1969
- 8 - N. EMANN, "Linear and non linear mapping of Patterns", Pattern Recognition, vol. 12, p.83-87, 1980
- 9 - L. LEBART, A. MORINEAU, J.P. FENELON, "Traitement des données statistiques", Dunod, 1979