

*Collection de notes internes  
de la Direction  
des Etudes et Recherches*

DIAGNOSTIC PAR COURANTS DE FOUCAULT.  
SEPARATION ET CARACTERISATION DES TRANSITOIRES  
D'UN SIGNAL PAR UNE METHODE  
NUMERIQUE/SYMBOLIQUE

*EDDY CURRENTS NON-DESTRUCTIVE TESTING. USE OF A  
NUMERIC/SYMBOLIC METHOD TO SEPARATE AND  
CHARACTERIZE THE TRANSITIONS OF A SIGNAL*

**EDF**

**Direction des Etudes et Recherches**

IPN  
J+D

**Electricité  
de France**

SERVICE ENSEMBLES DE PRODUCTION  
Département Surveillance Diagnostic Maintenance

**Gestion INRS**  
Doc. enreg. le : 6/6/96  
N° TRN : FR 9602953  
Destination : I.I+D.D

1995

BENAS J.-C.  
LEFEVRE F.  
GAILLARD P.  
GEORGEL B.

**DIAGNOSTIC PAR COURANTS DE FOUCAULT.  
SEPARATION ET CARACTERISATION DES  
TRANSITOIRES D'UN SIGNAL PAR UNE  
METHODE NUMERIQUE/SYMBOLIQUE**

***EDDY CURRENTS NON-DESTRUCTIVE  
TESTING. USE OF A NUMERIC/SYMBOLIC  
METHOD TO SEPARATE AND CHARACTERIZE  
THE TRANSITIONS OF A SIGNAL***

Pages : 26

96NB00055

Diffusion : J.-M. Lecœuvre  
EDF-DER  
Service IPN, Département SID  
1, avenue du Général-de-Gaulle  
92141 Clamart Cedex

© Copyright EDF 1996

ISSN 1161-0611

## **SYNTHÈSE :**

Cette note présente une méthode numérique/symbolique originale qui résout un problème inverse en contrôle non-destructif. Son but est de caractériser les transitions d'un signal même lorsqu'elles sont superposées et se somment.

La méthode proposée résout autant de problèmes directs que nécessaire pour approcher la solution, ce qui nécessite des hypothèses pour gérer le raisonnement. Nous résolvons le problème direct en calculant un "signal modèle" à partir des descripteurs des transitoires, et la solution est atteinte lorsque le signal modèle est proche du signal mesuré. Une originalité de la méthode est que les directions de minimisation sont calculées symboliquement à partir des pics du signal résidu. Les résultats de cette méthode sont bons et elle semble donc prometteuse.

Jean-Christophe Benas, Francis Lefevre, Bruno Georgel : Electricité de France/DER/EP/SDM

Paul Gaillard : Laboratoire de modélisation et de sûreté des systèmes, Université de technologie de Troyes

## **EXECUTIVE SUMMARY :**

This paper presents an original numeric/symbolic method for solving an inverse problem in the field of non-destructive testing.

The purpose of this method is to characterize the transitions of a signal even when they are superimposed. Its principle is to solve as many direct problems as necessary to obtain the solution, and to use some hypothesis to manage the reasoning of the process. The direct problem calculation yields to a "model signal", and the solution is reached when the model signal is close to the measured one. This method calculates the directions of minimisation thanks to a symbolic reasoning based on the peaks of the residual signal. The results of the method are good and seem very promising.

## **1. Introduction**

### **1.1. Principes généraux**

Les méthodes regroupant des traitements numériques et symboliques arrivent maintenant à maturité, comme le montrent plusieurs publications [BEL 91], [BRO 92], [DAW 91], [LEF 90] et [ZOR 91]. Nous proposons ci-dessous une telle méthode dont le but est de séparer et caractériser les différents transitoires présents dans un signal, lorsqu'ils se somment.

Dans notre problème, le signal mesuré résulte en effet -en première approximation- de la somme vectorielle des signaux complexes de plusieurs transitoires. Nous cherchons donc à remonter aux paramètres caractéristiques de ces transitoires, ce qui constitue un problème inverse. Or nous savons résoudre le problème direct puisque nous savons faire varier les signaux de chaque transitoire en fonction des valeurs de ses paramètres.

L'originalité de la méthode proposée est alors de résoudre autant de problèmes directs que nécessaire pour que le signal modèle (qui est la somme des signaux de chaque transitoire) soit suffisamment proche du signal mesuré. Cette approche itérative utilise des techniques symboliques pour décider des modifications à apporter aux paramètres des transitoires, et donc au signal-modèle. Ces techniques symboliques sont également utilisées pour gérer les hypothèses et la progression du raisonnement vers la solution.

D'un autre point de vue, la méthode proposée est une optimisation puisque nous cherchons à minimiser itérativement le résidu entre un signal-modèle et le signal mesuré. L'espace de représentation utilisé est alors constitué de l'ensemble des paramètres des transitions.

Un dernier point, secondaire vis à vis du traitement du signal, mais capital en pratique est que nous voulons remonter aux caractéristiques géométriques du défaut qui est à l'origine du signal (ici une fissure). Nous devons donc être capables de transformer les paramètres décrivant les transitoires du signal, en descripteurs caractéristiques des transitions géométriques d'une fissure.

Les caractéristiques générales des signaux traités par cette méthode sont les suivantes :

- le signal est complexe ( $a + ib$ ),
- le rapport signal/bruit doit être au moins égal à 3 pour ne pas être perturbé par un pic dû au bruit. La majorité du bruit a donc été filtré [POU 88] pour que le signal soit principalement composé de transitoires entre événements,
- la forme des transitoires peut être très variable. Il suffit de savoir faire varier correctement la forme du signal d'un transitoire en fonction de ses paramètres,
- les différents transitoires se somment entre eux, ce qui a été vérifié physiquement dans notre cas avec une modélisation par éléments finis [ROS 91] et par des essais réels. Cette sommation des signaux, jointe à la variabilité de leur forme, constituent les deux difficultés majeures de la méthode car les signaux peuvent avoir des formes très diverses,

- les transitoires sont monopics et les largeurs temporelles de ces pics sont du même ordre de grandeur. Dans notre cas, seule la mesure différentielle du signal (cf ci-dessous) crée des pics et est donc utilisable,
- la fréquence d'échantillonnage est d'au moins cinq fois la fréquence de Shannon, pour que les erreurs dues aux décalages temporels restent faibles. Ceci engendre dans notre cas des transitoires dont la largeur varie de quinze à vingt-cinq échantillons,
- et enfin, sans être absolument nécessaire, le comportement de la méthode est amélioré si le signal contient plusieurs voies de mesure (pour apporter des informations complémentaires), et si certains transitoires sont contraints entre eux (même amplitude,...).

### ***1.2. Physique du phénomène***

En pratique, la méthode présentée analyse les signaux de contrôle par courants de Foucault des tubes de générateur de vapeur dans les centrales nucléaires. Le contrôle d'un tube est réalisé en y déplaçant (aller/retour) une sonde axiale dans laquelle sont injectées conjointement plusieurs tensions alternatives de fréquences différentes (cf figure 0, [COM 87], [LIB 71] et [GEO 91]). Ces tensions induisent des courants de Foucault dans l'épaisseur du tube, et leurs différentes profondeurs de peau -en fonction de chaque fréquence- permettent d'étudier le tube à différentes profondeurs. Les courants de Foucault sont en retour couplés à la sonde dont l'impédance complexe devient caractéristique de l'ensemble sonde-tube.

Tout événement (évolution du diamètre du tube, existence d'une plaque de soutènement ou d'une fissure) qui modifie la répartition des courants de Foucault dans le tube, modifie aussi l'impédance caractéristique de la sonde. Cette impédance est mesurée pour chaque fréquence d'injection ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ) au fur et à mesure de la progression de la sonde, ce qui constitue les différentes voies de mesure du signal à analyser. La mesure de l'impédance est faite de deux manières : en absolue où elle est sensible aux événements longs (être sous une plaque de soutènement par exemple) ; et en différentiel où elle n'est sensible qu'aux transitions entre événements (entrée ou sortie d'une plaque de soutènement par exemple).

La longueur totale du signal mesuré sur tout un tube est de 100.000 échantillons. Le signal mesuré est donc segmenté pour aboutir aux différentes zones caractéristiques du tube, qui contiennent chacune environ 200 échantillons. Une zone de plaque est ainsi une des zones caractéristiques du signal ; elle peut contenir une fissure (cf figure 1) et nous sert d'exemple dans cet article. La figure 1 présente les signaux d'une zone de plaque sur deux voies de mesure, avec leurs représentations temporelles polaires et de Lissajous.

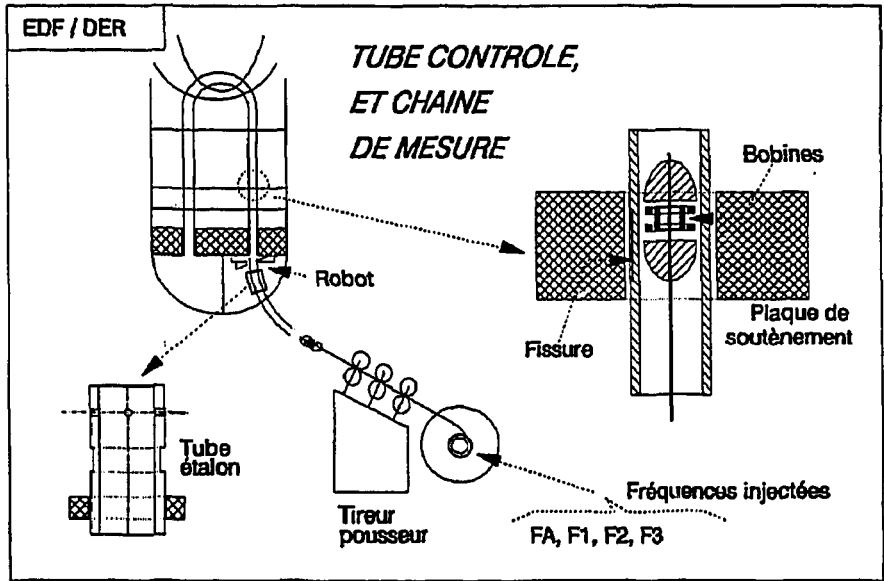


Figure 0. Tube contrôlé et chaîne de mesure.

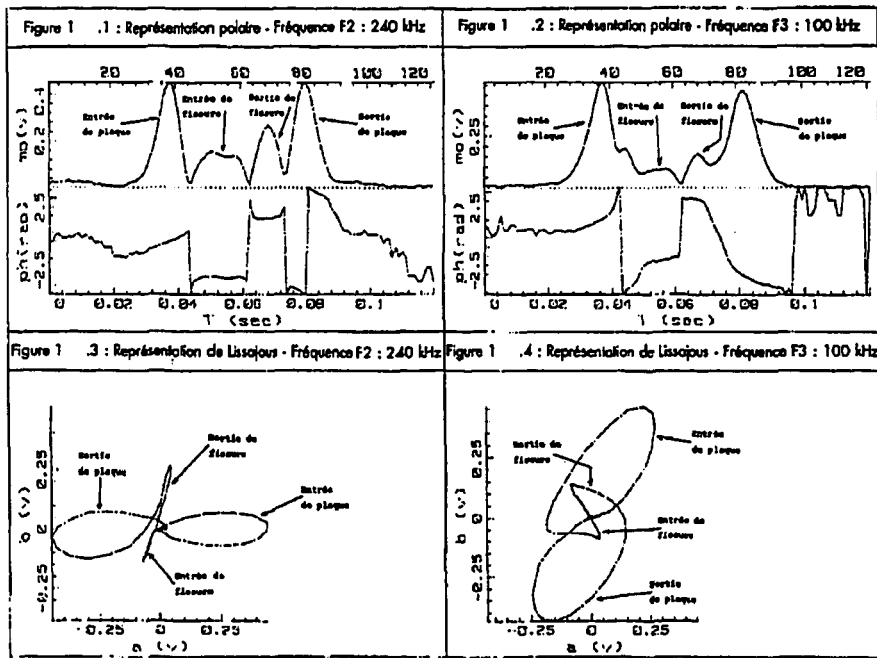


Figure 1. Signal de fissure sous plaque de soutènement.

## 2. Présentation

### 2.1. Présentation générale de la méthode

- Les conditions d'utilisation de la méthode impliquent de savoir :
- l'initialiser, c'est-à-dire décider de l'existence des transitoires, et estimer des valeurs initiales suffisamment correctes pour leurs paramètres caractéristiques. Cette initialisation nécessite elle-même une pré-segmentation du signal de tout le tube et la connaissance d'informations a priori sur chaque zone à caractériser,
  - calculer les signaux modèles des transitoires à partir de leurs paramètres caractéristiques. Il faut ainsi calculer des signaux de formes différentes selon les différents types de transitions.

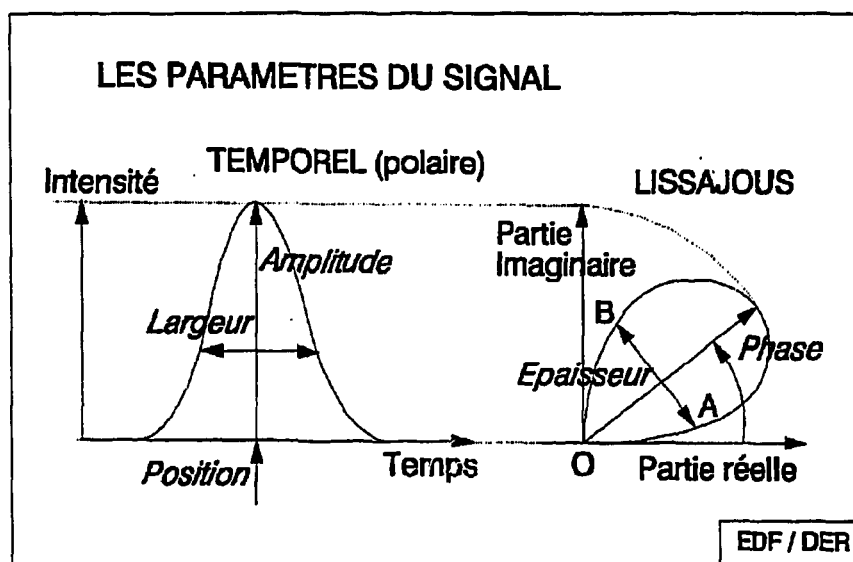


Figure 2. Les paramètres du signal.

Nous définissons le signal-modèle comme étant la somme de plusieurs transitoires monopics dont chacun est caractérisé par cinq paramètres (en italique dans la figure 2) :

- en temporel : sa position, sa largeur et son amplitude,
- en polaire : sa phase et l'épaisseur de son lobe en Lissajous, mesurée par l'angle AOB de la figure 2.

Les paramètres de chaque transitoire sont modifiés au fur et à mesure des itérations, ce qui entraîne la modification des paramètres géométriques



correspondants (cf 2.4.4.). Nous avons développé la méthode dans le cas de signaux complexes où ces cinq paramètres sont nécessaires, mais elle peut être également appliquée aux signaux réels et les deux paramètres polaires sont alors inutiles.

## 2.2. Cycle d'itération

La méthode utilise un formalisme symbolique pour calculer les directions de minimisation du résidu. Ce formalisme sert aussi à gérer les hypothèses créées par le raisonnement au fur et à mesure de sa progression vers la solution. Les fonctionnalités de la méthode sont les suivantes (cf [BEN 92] et figure 3) :

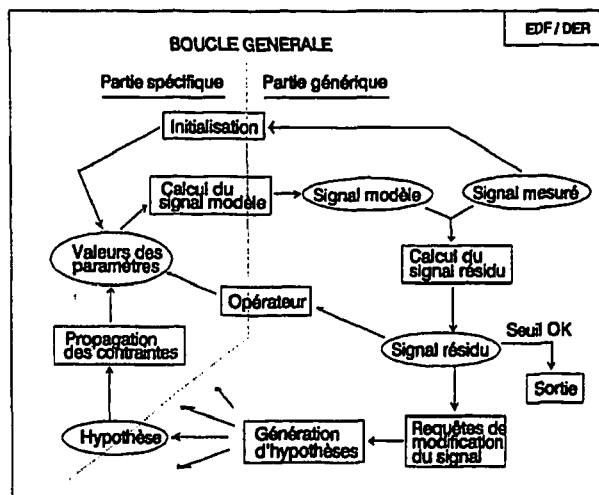


Figure 3. Boucle générale

- Initialisation : elle est spécifique à chaque application et se fait à partir du signal mesuré. En pratique, l'initialisation résout de façon approchée le problème inverse que nous voulons résoudre de façon précise par l'ensemble de la méthode. L'initialisation décide tout d'abord du nombre de transitoires qui sont présents dans le signal, en fonction du nombre de pics détectés et de contraintes connues a priori. Les différents agencements qui sont combinatoirement possibles entre ces transitoires sont ensuite évalués grâce à des intervalles flous. Ceux-ci modélisent les contraintes de positionnement (connues a priori) entre les différentes transitions, ce qui permet d'évaluer la cohérence de chacun des agencements. La configuration initiale qui est ensuite choisie est celle qui optimise au mieux l'ensemble de ces contraintes.
- Calcul du signal-modèle : le signal-modèle est calculé à partir des paramètres caractéristiques des transitoires. Ce calcul résout donc de façon précise le problème direct. Cette fonctionnalité est également spécifique à chaque application.
- Calcul du signal résidu : le signal résidu est un signal complexe qui résulte de la différence entre les signaux complexes modèles et mesurés. Nous définissons les "pics-résidus" comme étant les pics du signal résidu à minimiser.

- Choix de la voie de mesure qui va être minimisée par la boucle d'itération. Cette fonctionnalité n'est mise en place que s'il y a plusieurs voies de mesure.
- Requêtes de modification du signal : cette fonctionnalité étudie les causes possibles de l'existence des pics résidus et cherche ensuite à diminuer leur intensité. En pratique, cela impose de savoir quels signaux-modèles peuvent être la cause des pics du signal-résidu. Il n'y a plus ensuite qu'à engendrer les requêtes adéquates de modification du signal, en fonction des positions et phases respectives des pics résidus et modèles.
- Génération d'hypothèses : un pic résidu provient de la mauvaise valuation de certains paramètres dans un ou plusieurs transitoires. Il faut donc étudier en parallèle chaque cause de l'existence d'un pic résidu donné pour ne pas risquer d'étudier ensemble des causes antagonistes. Ceci impose de gérer en parallèle des hypothèses où ne sont étudiées que des requêtes indépendantes (cf 2.5.1.) de modification du signal. Nous devons alors gérer la combinatoire de ces hypothèses et maîtriser la minimisation itérative du résidu.

Les deux points suivants sont nécessaires pour caractériser géométriquement les fissures, mais ils ne sont pas nécessaires en tant que tel dans la méthode :

- Transformation en commandes géométriques : par exemple, chaque requête de modification de la phase d'un signal de transition de fissure est transformée en une commande géométrique de modification de profondeur de cette fissure.
- Propagation des contraintes : des contraintes spécifiques à l'application sont possibles entre les transitoires (par exemple, égalité de la profondeur entre l'entrée et la sortie de fissure,...). Ces contraintes sont propagées et les conflits qui en découlent sont gérés aux différents niveaux de modélisation.

Une fois que les valeurs des paramètres ont été décidées dans chaque hypothèse, le système reboucle sur le calcul des signaux-modèles.

### 2.3. Calcul du signal modèle

Les signaux modèles sont calculés sur chaque voie de mesure à partir des descripteurs de chaque événement. En ce qui concerne la fissure, nous cherchons à remonter aux descripteurs géométriques, et les signaux modèles sont donc calculés à partir de ces descripteurs géométriques. Le signal de fissure pourrait alors être calculé par éléments finis, ce qui aurait l'avantage d'engendrer des signaux de très bonne qualité [BEN 92]. Mais cette méthode est coûteuse en temps calcul, d'autant plus que le pas de quantification des descripteurs imposerait de calculer près de 2000 signaux.

Nous avons donc développé une procédure un peu moins précise mais ne nécessitant que 15 signaux initiaux, ce qui la rend beaucoup plus évolutive. Ces signaux initiaux sont 5 par voie de mesure, répartis sur 5 profondeurs du tube (0, 25, 50, 75 et 100% de profondeur). Les transitions géométriques d'entrée et de sortie de fissure sont alors décomposées en autant d'échelons géométriques (cf Figure 4 et [BEN 92]) qu'il y a de pas d'échantillonnage sur la transition. Chaque échelon géométrique a donc des bornes minimum et maximum de profondeur, ce qui permet de calculer son signal en fonction des différents signaux initiaux. Les signaux des différents échelons géométriques sont ensuite sommés selon leurs différentes positions. Il est à noter que d'autres études [DEL 92] somment également des signaux élémentaires pour engendrer un signal modèle.

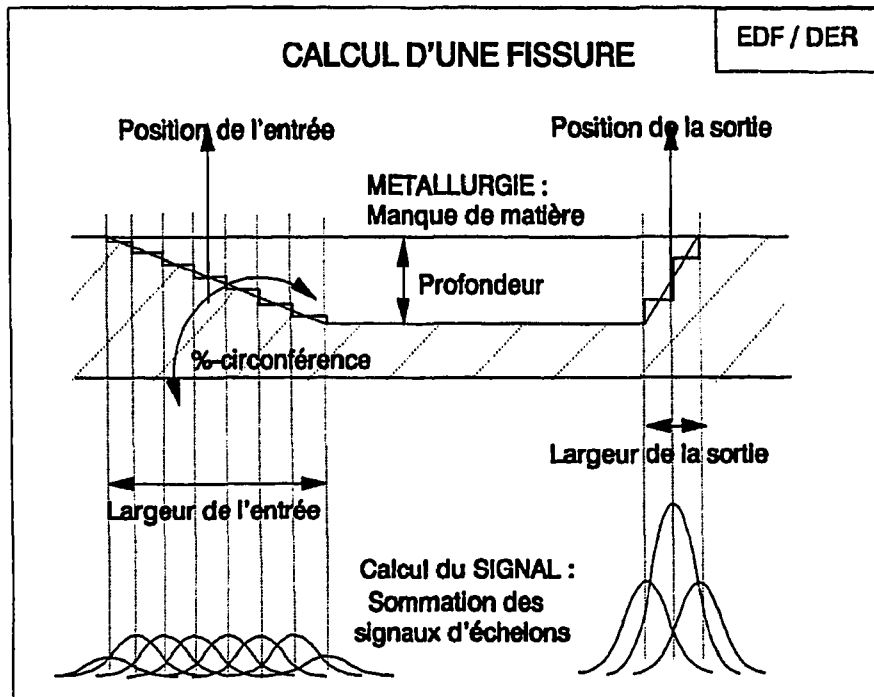


Figure 4. Calcul d'une fissure

La plaque n'est pas un défaut, il est donc inutile de remonter à ses paramètres géométriques. Les paramètres caractéristiques des transitions de plaque sont donc les paramètres des transitoires du signal (cf 2.1. et figure 2). Des procédures simples de traitement du signal modifient les signaux modèles en fonction des requêtes qui leur sont adressées.

#### 2.4. Requêtes de modification du signal

Ces requêtes demandent la modification des descripteurs des transitoires modèles monopics (cf 2.1.) dans le but de minimiser les pics du signal résidu, qui représente l'erreur de modélisation. Les différentes requêtes sont engendrées en fonction de la proximité relative entre les transitoires modèles monopics et les pics du signal résidu. Ces requêtes sont ensuite adressées aux transitoires modèles monopics qui sont potentiellement cause d'un pic résidu.

##### 2.4.1. Extraction des pics, calcul des intervalles et mise en relation des signaux résidus et modèle

Pour comparer les signaux résidus et les transitoires modèles monopics, la méthode proposée utilise des pics maximums et "d'extrémité" (cf Figure 5) qui sont ainsi définis :

- un **pic maximum**, à la position où l'amplitude est maximale, est caractérisé par l'amplitude et la phase du signal,
- les deux pics "**d'extrémités**", aux positions où l'amplitude est à 40 % du maximum, sont chacun caractérisés par l'amplitude à 40% et la dérivée de la phase du transitoire à cette amplitude. Il est à noter que le terme "**pic d'extrémité**" a été choisi par souci de cohérence avec les "**pics maximums**".

Seul le pic maximum peut être calculé sur le signal résidu, alors que le pic maximum et les deux pics d'extrémités sont calculés pour les transitoires modèles monopics. La proximité entre les pics résidus et modèles doit ensuite être établie alors qu'ils n'ont jamais les mêmes positions et phases. Nous définissons donc dans quelle mesure deux pics modèle et résidu sont suffisamment proches, en position et en phase, pour qu'il soit utile de les faire interagir. Des intervalles de proximités sont donc définis (cf figure 5) :

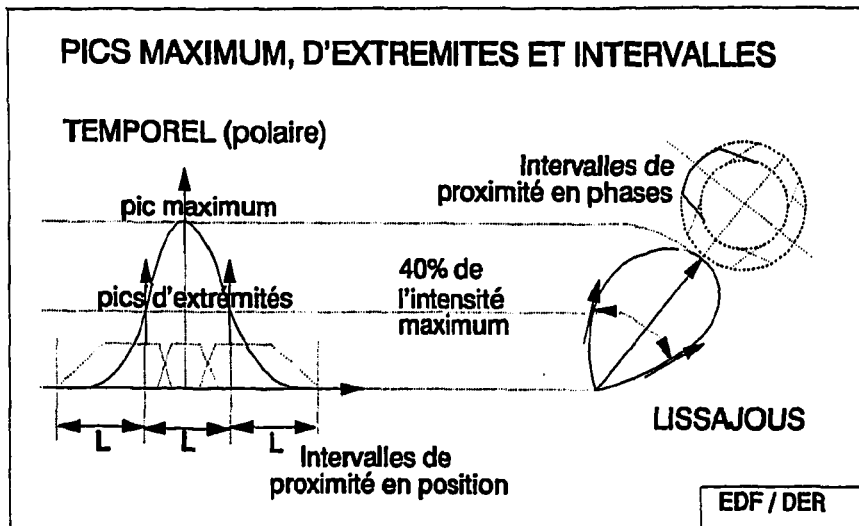


Figure 5. *Pics maximum, d'extrémités et intervalles*

- **Intervalles de position** : les intervalles de position des pics maximums et d'extrémités dépendent de la largeur des transitoires et sont donc recalculés après chaque itération.
- **Intervalles de phase** : les intervalles de phase sont en revanche constants, et nous utilisons les notations de phases proches, opposées, droites et gauche, lorsque l'écart de phase entre les pics modèle et résidu est proche de  $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $-90^\circ$  et  $90^\circ$ .

Des relations peuvent alors être établies entre les pics modèles et résidus lorsque leurs positions et phases respectives sont à l'intérieur des intervalles définis ci-dessus. L'intérêt majeur de ces relations est de focaliser l'attention de la méthode sur les seules situations qui peuvent engendrer des requêtes intéressantes.

#### 2.4.2. Génération des requêtes

Il suffit ensuite d'appliquer une base de règles sur ces relations pour reconnaître les situations à partir desquelles sont engendrées les requêtes de modification du signal :

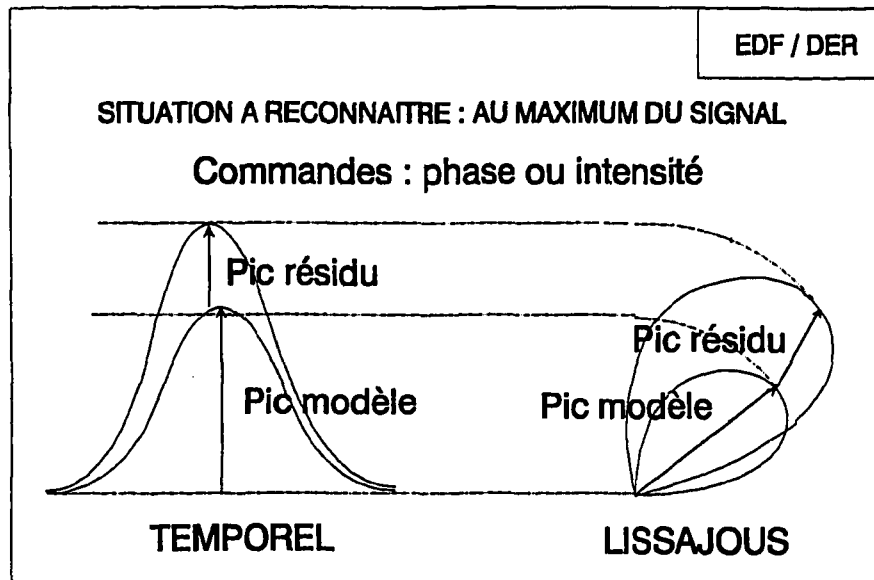


Figure 6. Situation à reconnaître : au maximum du signal

- Première situation : Lorsque la position d'un pic résidu est proche de celle du pic maximum d'un signal modèle, les requêtes adressées au signal modèle doivent agir principalement sur son maximum pour que le pic résidu diminue (cf Figure 6). Les seules requêtes qui ont cette action modifient la phase et/ou l'intensité du signal modèle :
  - \* si les phases de ces deux pics sont proches ou opposées, les requêtes concernent l'intensité du signal : (augmenter-intensité), ou (diminuer-intensité),
  - \* si les phases de ces deux pics sont à droite ou à gauche, les requêtes concernent la phase du signal : (augmenter-phase), ou (diminuer-phase).
- Seconde situation : lorsque la position d'un pic résidu est proche de celle d'un pic d'extrémité du signal modèle, les requêtes adressées au signal modèle doivent agir principalement sur ses extrémités (cf Figure 7). Les seules requêtes qui ont cette action modifient la position, la largeur et/ou l'épaisseur de lobe du signal modèle :
  - \* Si les phases de ces deux pics sont proches ou opposées, les requêtes concernent la position et la largeur du signal : (avancer-élargir), (avancer-rétrécir), (reculer-élargir) ou (reculer-rétrécir). Une simple modification de largeur ou de position aurait en effet des conséquences sur les deux extrémités

du signal, alors que la combinaison des modifications de largeur et de position permet de n'agir que sur une seule extrémité.

\* Si les phases de ces deux pics sont à droite ou à gauche, les requêtes concernent l'épaisseur du signal : (épaissir) ou (affiner).

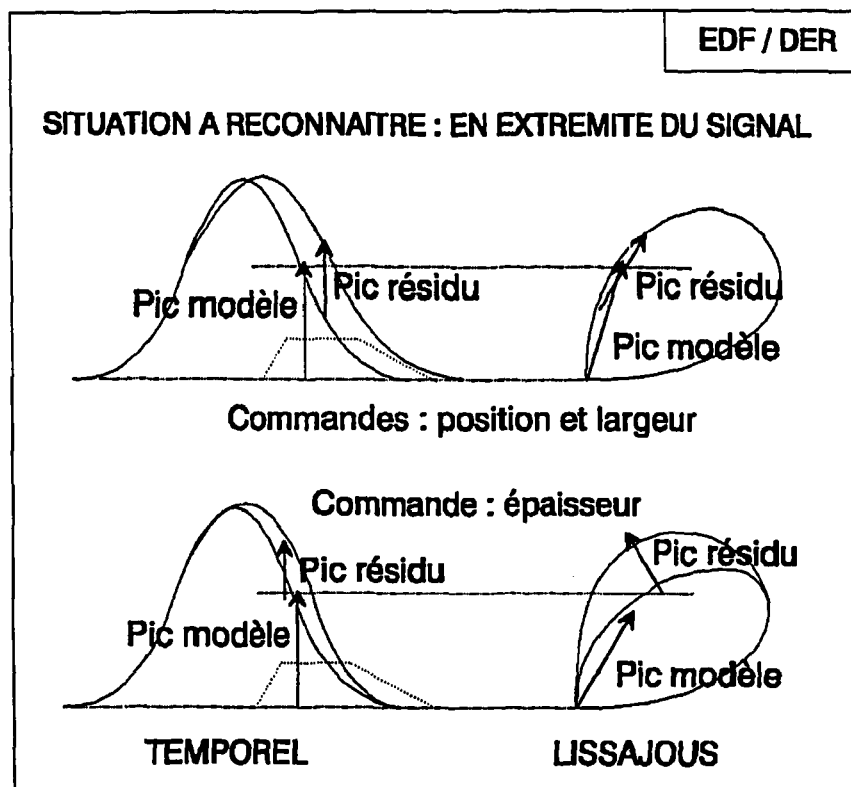


Figure 7. Situation à reconnaître : en extrémité du signal

#### 2.4.3. Quantification des requêtes

Les requêtes de modification du signal indiquent les descripteurs qui doivent être modifiés, et dans quelle direction de minimisation. En revanche, les requêtes ne sont pas quantifiées (selon l'intensité des pics-résidus par exemple) lors de leur génération par la base de règles. Elles sont quantifiées arbitrairement en fonction d'échelles extérieures et spécifiques à chaque descripteur pour les raisons suivantes :

- une quantification extérieure permet au système de sauter les différentes barrières de potentiel de la fonction de coût (cf 2.6.) en cas de minimum local. La méthode proposée ressemble ainsi aux méthodes de recuit simulé ; nous avons également mis en place une diminution du pas de quantification des descripteurs au fil des itérations.

- il est inutile de quantifier les requêtes de modifications à partir des caractéristiques des pics résidus. Ces quantifications ne seraient en effet valables que si tous les pics étaient isolés les uns des autres. Or, nous cherchons ici à résoudre le cas où les signaux sont proches, se somment, et où chaque pic résidu intègre les effets de plusieurs signaux.
- nous aurons enfin à comparer entre elles les hypothèses (cf 2.5.) qui sont engendrées au cours du raisonnement, de façon à ne pas réétudier une hypothèse qui aurait été déjà traitée par ailleurs. Or, deux hypothèses ne sont équivalentes que si tous les descripteurs de tous les transitoires sont égaux. Ceci nécessite une quantification externe des descripteurs pour que deux hypothèses issues de chemins différents puissent avoir des descripteurs exactement égaux.

#### 2.4.4. Transformation des requêtes signal en commandes géométriques et propagation des contraintes

Pour caractériser géométriquement les fissures, les requêtes engendrées au niveau du signal sont ensuite transformées en commandes géométriques. La physique du phénomène indique que la phase du signal mesuré est reliée à la profondeur de la fissure, et que l'intensité du signal mesuré dépend linéairement du pourcentage de circonférence occupé par la fissure dans le tube (cf figures 2 et 4).

Tableau 1 : Paramètres du signal et descripteurs utilisés

SIGNAL ←		→ TUBE	
Paramètres signal, sur toutes les transitions	Descripteurs des Fissure (descript. géom.)	transitions de : Plaque (paramètres signal)	
Position au maximum	Position	Position	
Largeur à 40% d'intensité	Largeur géom. de la fissure	Largeur du signal (pas de signification physique)	
Épaisseur du lobe à 40% d'intensité	Rien	Épaisseur du signal (pas de signification physique)	
Intensité au maximum	%-circonférence de la fissure	Intensité du signal (pas de signification physique)	
Phase au maximum	Profondeur de la fissure	Phase du signal (pas de signification physique)	

Les contraintes sont ensuite propagées, ce qui impose principalement l'égalité de certains descripteurs. Ainsi, les transitions d'entrée et de sortie d'une fissure doivent avoir la même profondeur et le même pourcentage-de-circonférence.

### 2.5. Génération d'hypothèses

Une hypothèse est un état du système où les descripteurs des transitoires ont une valeur donnée.

#### 2.5.1. Requêtes indépendantes et hypothèses

Les requêtes adressées à chaque transitoire modèle monopole demandent la modification de certains de ses descripteurs, et certaines de ces requêtes sont de plus potentiellement contradictoires. Ceci implique la création de plusieurs hypothèses-

filles qui regroupent adéquatement les diverses requêtes indépendantes (cf ci-dessous). Dans chaque hypothèse fille, les descripteurs sont modifiés en fonction des requêtes, ce qui permet de relancer une nouvelle itération et de créer ainsi progressivement l'arbre des hypothèses (cf Figure 9).

Toutes les requêtes qui sont issues d'un même pic résidu examinent une cause potentielle de l'existence de ce pic ; elles doivent donc être étudiées séparément puisqu'elles peuvent être contradictoires. En revanche, il est licite d'étudier ensemble les requêtes qui sont issues de pics résidus différents (les requêtes indépendantes) puisqu'elles cherchent à minimiser des pics résidus différents. Nous créons donc des hypothèses dont chacune regroupe autant de requêtes indépendantes qu'il y a de pics résidus utilisés. Les interactions, conflits et doublons qui peuvent cependant apparaître entre ces requêtes sont gérés lors de la propagation des contraintes. Nous présentons l'effet de la combinatoire entre ces requêtes indépendantes par un exemple (cf Figure 8) :

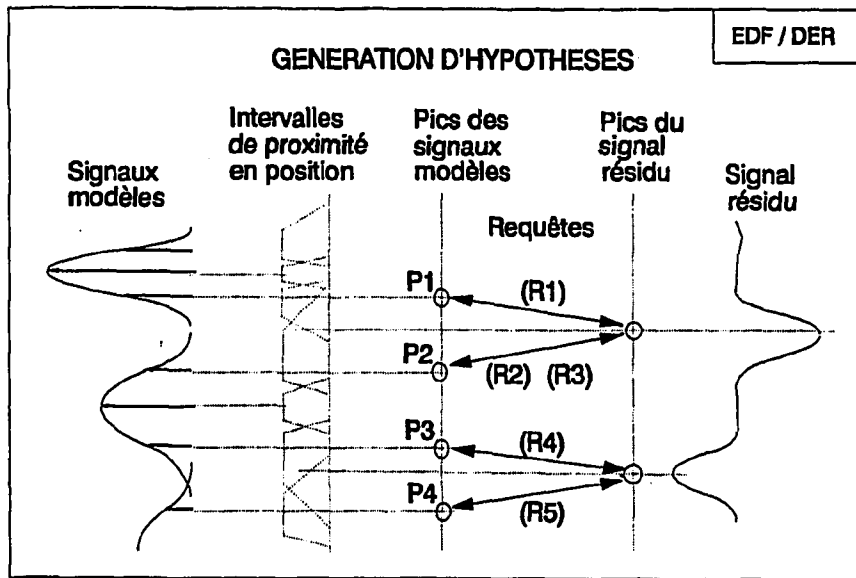


Figure 8. Génération d'hypothèses

Tableau 2 : Regroupement des requêtes indépendantes et génération d'hypothèses.

Chacune des requêtes (R1, R2, R3) est indépendante des requêtes (R4,R5). Six hypothèses sont donc créées (H1 -> H6), dont chacune reçoit deux des requêtes indépendantes		H1	H2	H3	H4	H5	H6
	Pic1	R1		R1			
	Pic2		R2		R2	R3	R3
	Pic3	R4	R4			R4	
	Pic4			R5	R5		R5

Chaque hypothèse regroupe donc plusieurs requêtes à partir desquelles sont calculés les nouveaux signaux modèles, puis le signal résidu. La méthode utilise ensuite la valeur de chaque hypothèse, qui correspond à la fonction de coût des méthodes d'optimisation, pour piloter le raisonnement (cf 2.6.3.). Cette valeur doit



donc dépendre à la fois du signal mesuré et des descripteurs de chaque transitoire ; nous utilisons pour cela la somme des énergies du résidu sur chaque voie de mesure.

### *2.5.2. Arbre des hypothèses : Réduction de la combinatoire*

L'arbre des hypothèses (cf figure 9) est créé en étudiant à chaque cycle d'itération l'hypothèse qui a la plus petite valeur d'hypothèse et en engendrant ses hypothèses-filles. La méthode enchaîne donc les hypothèses-filles les unes aux autres pour tester progressivement différentes configurations de descripteurs. Elle doit alors gérer au mieux la combinatoire des hypothèses et la forme de l'arbre des hypothèses pour aboutir le plus rapidement possible à une solution correcte :

- Il faut tout d'abord réduire le nombre total d'hypothèses potentielles. Ceci implique de réduire la combinatoire possible entre les descripteurs, et donc de réduire le nombre de leurs valeurs possibles. Les pas de quantification des descripteurs sont donc initialement importants, ce qui permet également de s'approcher plus efficacement de la solution. Il est ensuite nécessaire de retrouver progressivement une quantification plus fine des descripteurs pour s'approcher de la solution (cf 2.6.3.).
- Il faut ensuite réduire le nombre d'hypothèses créées à chaque noeud du raisonnement : nous n'avons utilisé dans notre application que les deux pics résidus les plus intenses, ce qui a créé en moyenne une dizaine d'hypothèses-filles par hypothèse-mère. Cela revient de plus à focaliser le raisonnement sur les situations les plus intéressantes.
- La forme de l'arbre doit enfin être la plus linéaire possible : le parcours vers la solution doit être optimal, ce qui permet de négliger de nombreuses hypothèses inutiles. Cette forme d'arbre est en pratique gérée par le calcul des valeurs d'hypothèses, puisque l'hypothèse étudiée est celle qui a la plus faible valeur.

## *2.6. Minimisation du résidu*

Le premier intérêt d'une mémorisation complète de l'arbre des hypothèses, au lieu de ne conserver que l'hypothèse courante, est d'éviter les bouclages en ne réétudiant pas les hypothèses déjà étudiées. L'autre intérêt est de pouvoir changer de chemin de raisonnement quand le chemin courant aboutit à une impasse. Par ailleurs, la minimisation du résidu peut être vue comme un problème d'optimisation numérique avec fonction de coût, que nous cherchons à résoudre par des moyens symboliques. L'espace de représentation de la fonction de coût étant défini par les différents descripteurs des transitoires.

### *2.6.1. Comparaison numérique / symbolique*

La différence avec les fonctions de coût habituelles des problèmes d'optimisation est que les signaux mesurés et modèles qui interviennent dans le signal résidu ne sont pas modélisables mathématiquement. Le signal résidu n'est alors qu'une simple fonction tabulée dont il serait particulièrement lourd de calculer numériquement la bonne direction de minimisation.

En revanche, les "requêtes de modification du signal" que nous avons étudiées précédemment calculent symboliquement les meilleures directions de minimisation.

Chacune des hypothèses contient en effet plusieurs requêtes concernant plusieurs descripteurs, qui concrétisent une direction de minimisation particulière dans l'espace de représentation de la fonction de coût.

De plus, à chaque itération, les méthodes classiques ne testent qu'une seule direction de minimisation, ce qui leur permet d'affiner au mieux cette direction et de quantifier au mieux les valeurs à donner aux descripteurs. En revanche, notre méthode teste en parallèle, à chaque itération, plusieurs directions de minimisation, mais avec une quantification extérieure (cf 2.4.3.) des descripteurs pour éviter toute explosion combinatoire.

L'intérêt de tester en parallèle plusieurs directions de minimisation est que le système acquiert ainsi une certaine visibilité sur l'allure de la fonction de coût dans les différentes directions de l'espace de représentation. En d'autres termes, le système construit progressivement une représentation tabulée et locale de la fonction de coût. Cette représentation est constamment en mémoire et lui permet, à chaque itération, de repartir de la meilleure hypothèse.

#### 2.6.2. Critères de solution

L'existence et la variabilité du bruit, qui reste toujours présent dans le signal mesuré, empêchent d'employer un seuil absolu sur le résidu comme critère de solution. Nous devons donc utiliser un critère indépendant de la valeur du bruit. Nous vérifions donc que les valeurs d'hypothèses sont devenues stables de mères en filles, quelles que soient les modifications de descripteurs qui leur sont demandées.

Le critère de solution est alors (cf Figure 9) : Si la valeur d'hypothèse est au-dessus d'une droite de pente X% sur une "Profondeur Autorisée" (PrA) de l'arbre d'hypothèses, alors :

- \* Si le "Pas de Quantification" (PaQ) n'est pas minimum, prendre le PaQ inférieur et poursuivre le raisonnement.
- \* Si PaQ est minimum, alors la solution est atteinte.

En pratique PrA dépend de la valeur de PaQ. En effet, les produits (PrA \* PaQ \* échelle-de-quantification-de-chaque-descripteur) indiquent les domaines de variation maximal pour chaque descripteur. Si ces domaines sont trop importants, cela impose à la méthode d'étudier des hypothèses qui se trouvent sur les bords du puits de potentiel, ce qui crée de nombreuses branches d'hypothèses inutiles. En sens contraire, si ces domaines sont trop petits, la méthode s'arrête avant d'avoir pu tester suffisamment d'hypothèses assez différentes.

De plus, les échelles de quantification des différents descripteurs doivent être cohérentes. Ainsi, par exemple, l'intensité des pics résidus engendrés par le déplacement d'un signal ou par la modification de son intensité doivent être du même ordre de grandeur. La fonction de coût prend alors en compte les effets de modifications comparables, ce qui permet de prendre en compte tous les descripteur de façon équivalente.

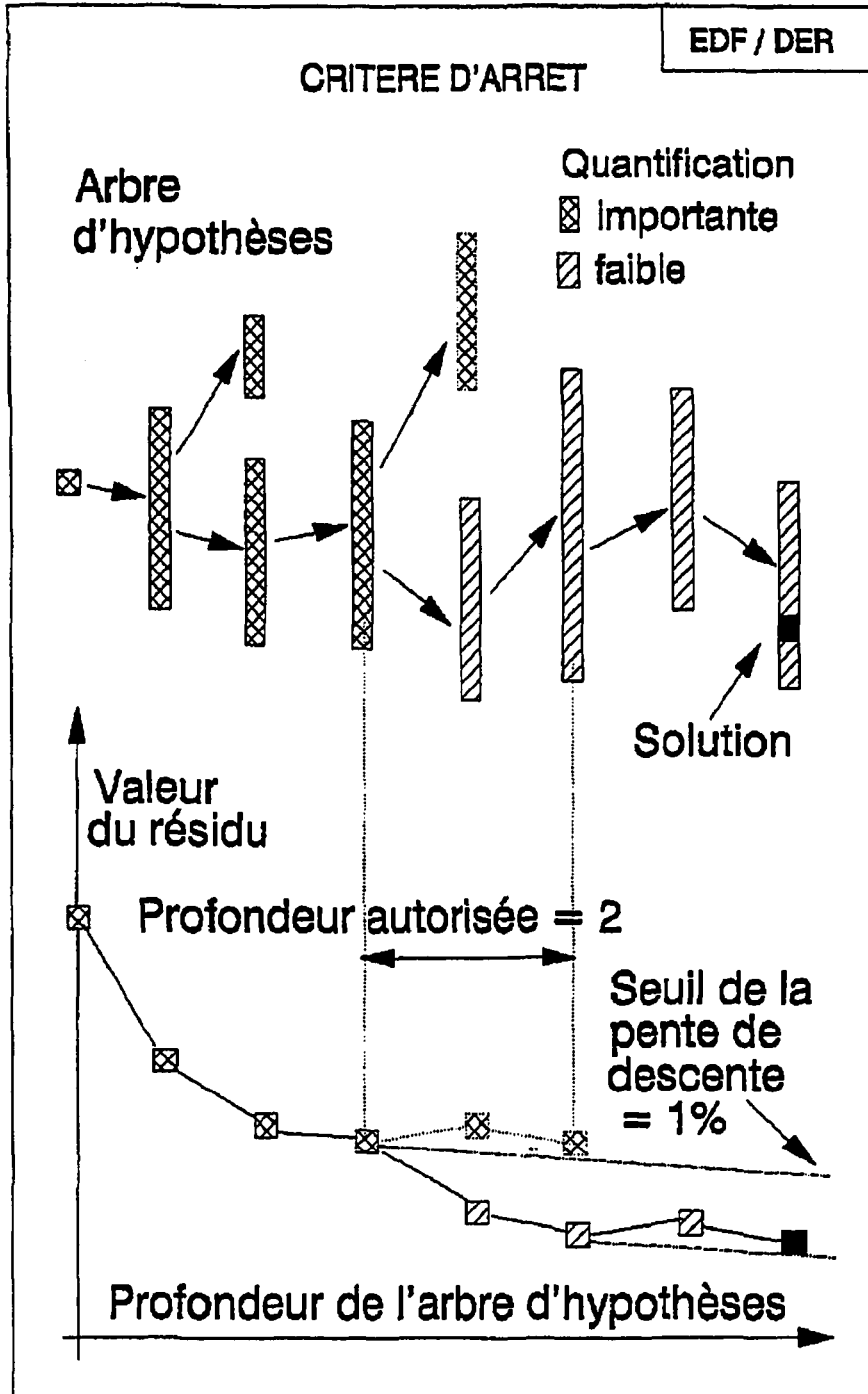


Figure 9. Critère d'arrêt

En pratique, les paramètres de réglage du raisonnement sont les suivants :

Tableau 3 : Paramètres de réglage du raisonnement.

	Descripteurs	Type	Unité	Valeur du pas de quantification		
				Important	Moyen	Faible
DESCRIPTEURS DE TRANSITION DE FISSURE CF1.2/	Profondeur	Additif	% de profondeur	18		
	%-circonférence	Multiplicatif	%-circonférence	1.18	1.06	1.02
	Position	Additif	Pas d'échantillonnage	4	2	1
	Largeur	Additif	Pas d'échantillonnage	16	8	4
DESCRIPTEURS DE RAISONNEMENT	Nombre pics résidus			3	2	2
	Profond. raisonmt.			1	2	2
	Pente descente			9 %	3 %	1 %
	Val.abs. descente		Energie	20	6	1

Dans les descripteurs de raisonnement, le "nombre pics résidu" est le nombre de pics résidu qui est utilisé par le raisonnement à chaque boucle d'itération ; la "profond. raisonmt." est le nombre de boucles d'itération (c'est-à-dire de pas de profondeur dans l'arbre des hypothèses) qui est autorisé lorsque le résidu ne baisse pas suffisamment, pour un pas de quantification donné ; la "pente descente" et la "val. abs. descente" sont les pente et valeur absolue en dessous (resp. dessus) desquelles le résidu doit descendre (resp. rester) pour ne pas faire intervenir la "profond. raisonmt.".

### 2.6.3. Convergence de la méthode, unicité et validité de la solution

Le critère proposé assure une convergence, en pratique assez rapide, de la méthode. En revanche, ce critère n'assure pas que le système a atteint la meilleure solution puisque le raisonnement peut être bloqué dans un minimum local. Cette méthode nécessite donc, comme la plupart des méthodes d'optimisation, une initialisation correcte. Le pas de quantification des descripteurs est cependant important en début de raisonnement, pour éviter de rester dans un minimum local. La propagation des contraintes entre les transitions est également un point-clé pour l'obtention d'une bonne solution. En effet, la méthode progresse beaucoup plus rapidement et efficacement lorsqu'un descripteur peut être estimé correctement sur une transition donnée (ou sur une autre voie de mesure), et qu'il est ensuite propagé vers les autres transitions où il est plus difficile à estimer (cas de plusieurs signaux qui se somment).

### 3. Résultats

Nous avons appliqué la méthode décrite ci-dessus aux signaux courants de Foucault d'un tube fissuré sous plaque de soutènement. Ces signaux comprennent donc quatre transitoires (Entrée/Sortie de fissure et E/S de plaque) de formes différentes et qui se somment.

### 3.1. Simulation

Nous avons construit un "signal mesuré" en choisissant nous-mêmes les descripteurs de la fissure et de la plaque. Ce "signal mesuré" contient un signal de sortie de plaque superposé au signal de sortie de fissure, lui-même élargi, ce qui constitue un cas très difficile à analyser en pratique. Nous cherchons à savoir dans quelle mesure la méthode d'analyse réussit :

- à déterminer au mieux les descripteurs de chaque transition,
- ou, au moins, à créer un signal modèle qui s'approche au plus près du signal connu.

Nous ne présentons que les descripteurs géométriques de la fissure puisque la plaque n'a que des paramètres signal. La configuration étudiée fournit les résultats suivants :

Tableau 4 : Descripteurs de la fissure pour la simulation

Descripteurs	Position entrée de fissure	Position sortie de fissure	Largeur entrée de fissure	Largeur sortie de fissure	Profondeur fissure	Pourcentage circonférence fissure	Valeur fonction de coût
Unités	Pas d'échantillonnage				Pourcentage d'épaisseur dans le tube	Pourcentage circonférence pris par fissure	Energie du résidu
Initialisation	35	50	4	4	99	4.24	23967
Fin du raisonnement	35	58	4	16	39	39.8	1049
Valeurs attendues	35	58	0	16	35	40	0

Les figures 10 et 11 présentent les signaux de cette configuration. Les valeurs initiales des descripteurs sont assez loin des valeurs attendues car les deux signaux de sortie de plaque et de fissure sont très mélangés. La solution aboutit cependant à un signal modèle très correct, avec des valeurs de descripteurs proches de celles attendues. La méthode n'atteint cependant pas les bonnes valeurs pour tous les descripteurs. Certaines commandes sont en effet toujours doubles ([recule-rétrécit] par exemple, cf 2.4.2.) alors qu'elles devraient pouvoir être simples dans certains cas ([rétrécit], sur l'entrée de fissure, cf figure 11). Nous précisons en 3.3. comment améliorer ce point.

### 3.2. Signal mesuré

Les figures 12 et 13 présentent les signaux de cette configuration. Ce signal mesuré est de nouveau un cas déjà difficile puisque l'entrée de la fissure est plus large que sa sortie, que son amplitude est assez faible par rapport à l'amplitude du signal de plaque et qu'il reste du bruit résiduel après filtrage. Les résultats sont les suivants :

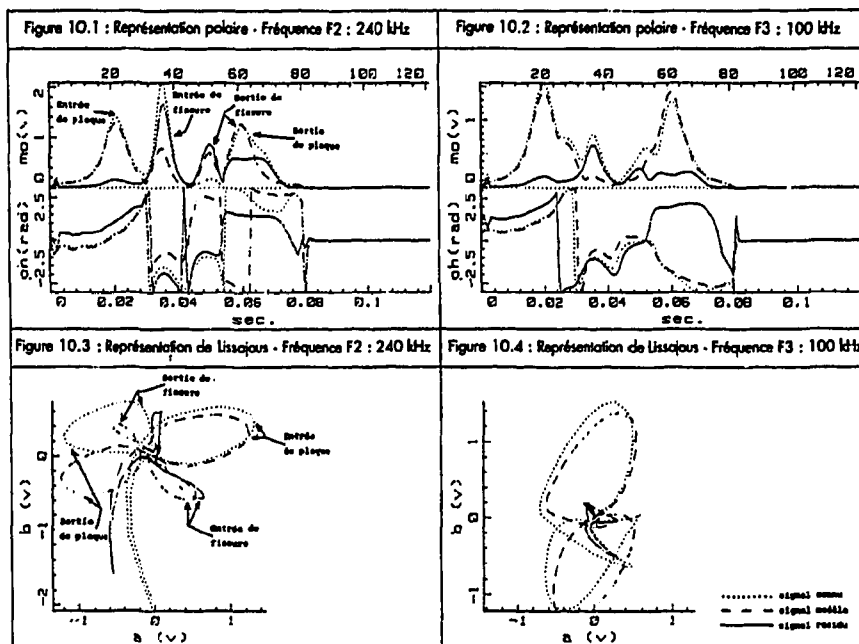


Figure 10. Signal connu : initialisation

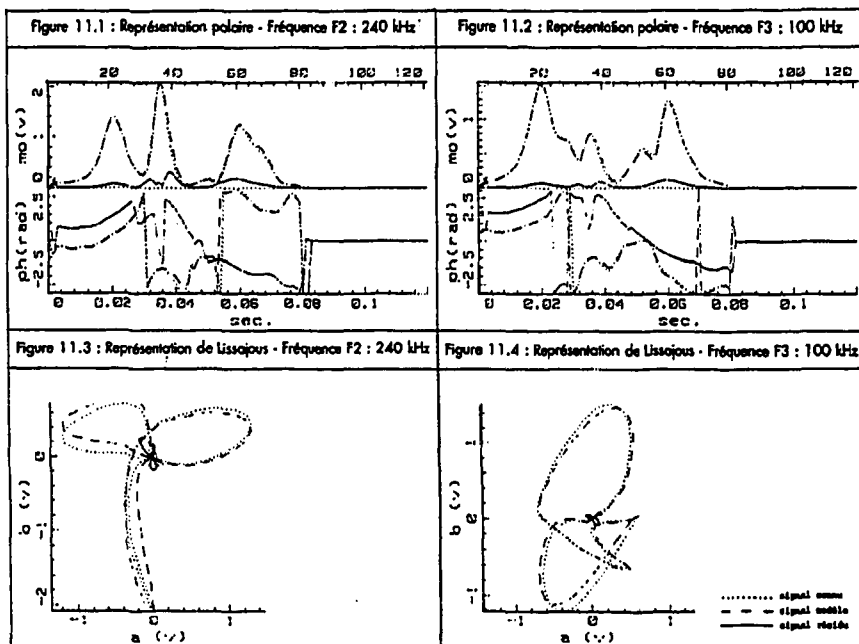


Figure 11. Signal connu : solution

Tableau 5 : Descripteurs de la fissure avec un signal mesuré

Descripteurs	Position entrée de fissure	Position sortie de fissure	Largeur entrée de fissure	Largeur sortie de fissure	Profondeur fissure	Pourcentage circonférence fissure	Valeur fonction de coût
Initialisation	50	68	4	4	3	23.7	538
Fin du raisonnement	52	68	16	4	27	3.03	277
Valeurs attendues	Néant	Néant	Néant	Néant	15	Néant	0

On peut constater une erreur sur l'estimation de la profondeur, qui est tout à fait acceptable en absolu (12 % de la profondeur). Cette erreur provient principalement de la procédure de construction des signaux de fissure (cf 2.3.) qui aboutit à un épaississement du lobe et à une augmentation de la profondeur estimée lorsque la transition est large (ici 16 échantillons). Les pics du signal résidu qui restent en 60 et entre 70 et 80 (cf Figures 12 et 13) sont dus au bruit résiduel et ne peuvent donc être éliminés. Nous constatons également (cf figure 13.1) que le signal modèle de sortie de plaque sur F2 est décalé sur la droite alors que ce n'est pas le cas sur F3 (cf Figure 13.2). Le système impose en effet une valeur unique à chaque descripteur et la répercute sur toutes les voies de mesure. Or cette valeur n'est souvent correcte que pour une seule voie, car il y a toujours des erreurs de modélisation. Une certaine souplesse entre les voies de mesure sur la valeur des descripteurs doit donc être mise en place.

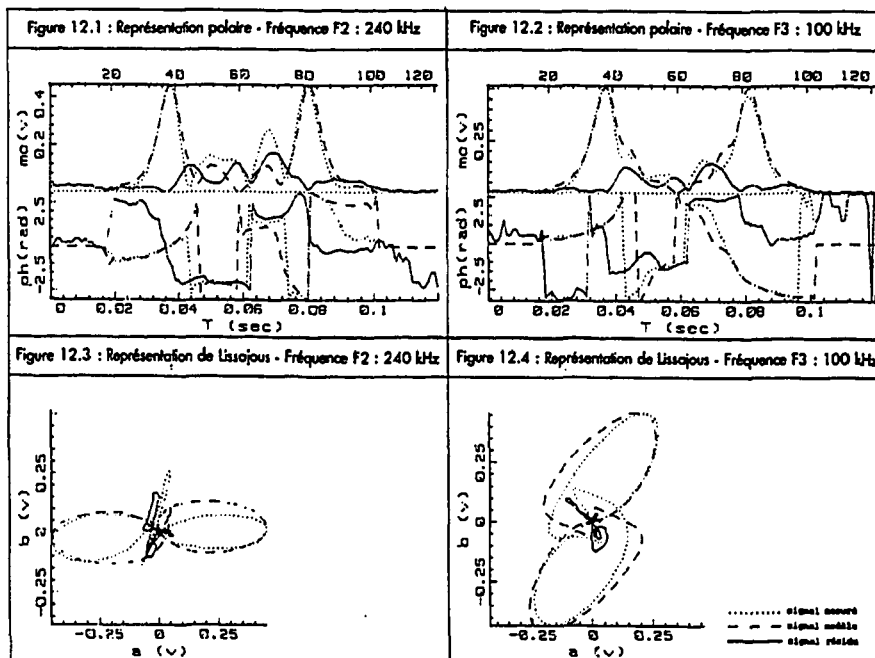


Figure 12. Signal mesuré : initialisation

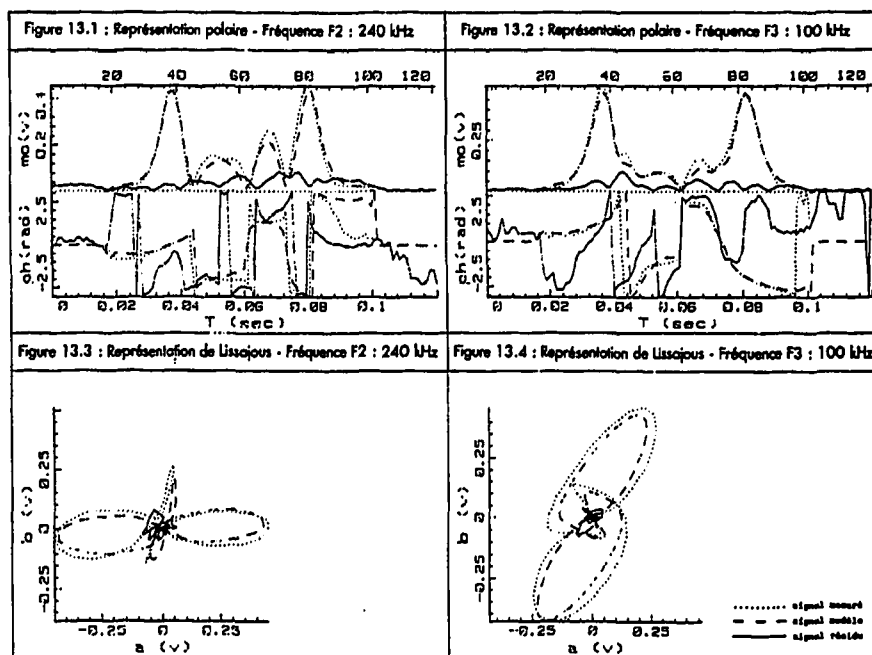


Figure 13. Signal mesuré : solution

### 3.3. Récapitulation et améliorations possibles

Les résultats obtenus nous permettent de dire que :

- l'aspect général du signal mesuré est toujours bien reproduit, même s'il y a du bruit. Ce bruit aurait pourtant pu gêner le raisonnement puisque son poids relatif dans le résidu croît au fur et à mesure que le signal modèle s'approche du signal mesuré.
- la profondeur et la forme géométrique de la fissure sont corrects, ce qui est primordial puisque nous cherchons principalement à caractériser les fissures.
- tous les raisonnements ont créé des arbres d'hypothèses très linéaires, ce qui permet d'obtenir rapidement une solution correcte.

Plusieurs améliorations peuvent être néanmoins apportées à la méthode :

- une certaine souplesse devra être autorisée pour la valeur de chaque descripteur, de façon à ce qu'elle puisse être légèrement différente d'une voie de mesure à l'autre (cf 3.2.). Les signaux modèles reconstruits s'approcheront alors mieux des signaux mesurés sur chaque voie de mesure, ce qui évitera des bouclages lors du raisonnement. La mise en place d'une hystérésis répondrait à ce besoin.
- un plus grand nombre de requêtes de modification du signal devra être engendrée dans chaque situation (cf 2.4.2.). Par exemple, au lieu de n'engendrer que [rétrécir-avancer], le système engendrera ([rétrécir-avancer], [avancer] et [rétrécir]). De même,



- au lieu de n'engendrer que [augmenter-intensité], il engendrera ([augmenter-intensité] et [rétrécir])... Ce point améliorera de plus la gestion des contraintes.
- les deux points précédents auront des conséquences sur la combinatoire des hypothèses. En effet, si un plus grand nombre de requêtes est engendré dans chaque situation, il sera peut-être intéressant de ne plus combiner entre elles les requêtes issues de pics résidus différents (cf 2.5.1.).

#### 4. Conclusion

Nous avons présenté une méthode qui caractérise les transitoires d'un signal court, (multi-voies) complexes, lorsque ces transitoires se somment vectoriellement. Cette méthode transforme donc le signal numérique, où les signaux sont mélangés, en sa représentation symbolique, où les transitions sont séparées et caractérisées.

Pour cela, une importante modélisation des connaissances est nécessaire, et nous avons utilisé une modélisation par objets couplée à des bases de règles. Cette méthode s'adapte de plus facilement aux nouveaux événements : il suffit d'en faire la description au niveau objet ; ou à une modification des signaux mesurés : il suffit de changer le mode de calcul des signaux modèles.

La méthode est fondée sur un raisonnement symbolique original qui modifie itérativement les paramètres des transitions à partir des pics du signal résidu. Elle peut être considérée comme une méthode d'optimisation symbolique, dont nous avons présenté les particularités (directions de minimisation, gestion d'hypothèses,...) vis-à-vis des méthodes plus classiques d'optimisation numérique. Une certaine imprécision apparaît dans les résultats mais elle reste admissible (5 à 10 % en général, maximum de 15%). Nous avons présenté les améliorations qui rendront la méthode moins sensible à certains effets de bord et aux événements non modélisés tels que le bruit.

Cette méthode a également un intérêt ergonomique : l'utilisateur peut en effet remplacer la base de règles et engendrer manuellement, à partir des signaux affichés, différentes requêtes de modification du signal (cf Figure 3). Il constate alors visuellement les effets de la propagation des contraintes, en parallèle sur toutes les voies de mesure, ce qui est très intéressant pour la formation des utilisateurs.

#### Remerciements

Nous remercions particulièrement M. Riadh Zorgati pour ses remarques pertinentes lors de nombreuses et fructueuses discussions.

#### 7. Bibliographie

- [BEL 91] BELLANGER J.J, GARREAU M., "Décomposition du signal EMG par génération d'hypothèses de localisation temporelle des constituants", GRETSI. Juan les pins . Sept 1991.
- [BRO 92] BROWN M.N., STEWART R.W., DURRANI T.S., "DSP subsystem for knowledge based Health monitoring of gas turbine engine." ICASSP 92 . 1992 .
- [DAW 91] : DAWANT B. JANSEN BH., "Coupling numerical and symbolic

- method for signal interpretation" IEEE Transaction on system, man, cybernetics, vol 21. No 1. Jan/Feb 1991.
- [LEF 90]: LEFEVRE F., BENAS J-C., GAILLARD P., "Le projet EXTRACSION : Système expert et modélisation objet pour le diagnostic en contrôle non-destructif." COFREND. Nice. 1990.
- [ZOR 91]: ZORGATI R., PONTHEIU L., GEORGEL B., "Specifications générales du logiciel EXTRACSION." EDF/DER . HP-21/91-05. 05/91.
- [POU 88]: POUPEAU Y., "Amélioration du rapport signal/bruit des signaux courants de Foucault", Thèse Université P. et M. Curie. Paris. Octobre 1988.
- [ROS 91]: ROSE C., BENAS J-C., "Interprétation des signaux de contrôle par courants de Foucault : utilisation d'un modèle numérique bidimensionnel." EDF/DER . HP21/91-14 . HI72/74-96 . 08/1991.
- [COM 87]: COMBY R., "Le contrôle des tubes de générateur de vapeur." EDF/SPT/GdL . 1987.
- [LIB 71]: LIBBY H.L., "Introduction to Electro-magnetic Non-destructive Testing Methods." New-York . Wiley . 1971.
- [GEO 91]: GEORGEL B., "Traitement des signaux courants de Foucault pour le contrôle des tubes de générateur de vapeur dans les centrales REP. Traitement du signal" . Vol 8. N°5 1991 (Spécial mécanique).
- [BEN 92]: BENAS J-C., "Système à base de connaissance et traitement numérique pour l'analyse automatique des signaux de tubes de générateur de vapeur contrôlés par courants de Foucault". Thèse UTC. Compiègne. Juin 1992.
- [BEN 92]: BENAS J-C., "Évaluation de la méthode des résidus." EDF/DER . HP-21/92-37 . Septembre 1992 .
- [DEL 92]: DELSARTE G, LEVY R., "MASCOTTE, an analytical model for eddy current signals Proc. non destructive testing 92". WCNDT. Sao Paulo . Oct 1992 .