

LIVRE BLANC

**dB Vib**

*INSTRUMENTATION*

LA DÉTECTION  
ULTRASONORE  
DE DÉFAUTS

Entendre ce que l'on ne peut  
pas voir  
en maintenance conditionnelle

[www.dbvib-instrumentation.com](http://www.dbvib-instrumentation.com).





Par Henri CAMPAGNA, pdg de dB Vib Groupe,

La détection ultrasonore de défauts est devenue un véritable descripteur de la maintenance conditionnelle tout comme l'analyse vibratoire, l'analyse d'huile et la thermographie infrarouge. À cet égard, elle permet aux industriels d'améliorer leur production, de réduire les coûts de maintenance et de diminuer les consommations énergétiques. Cet article est consacré, d'une part, aux applications en recherche de fuite et en électricité. D'autre part, à la complémentarité du diagnostic ultrasonore et vibratoire pour le contrôle des machines tournantes.

## NOTRE GROUPE



Expert du bruit, des vibrations, de la maintenance conditionnelle et du traitement de l'air



Ces dernières années, les responsables maintenance ont le plus souvent utilisé les détecteurs de défauts ultrasonores pour la chasse aux fuites d'air comprimé et de gaz, et en complément d'autres descripteurs comme l'analyse vibratoire et la thermographie infrarouge.

De nos jours, de plus en plus d'experts en thermographie infrarouge réalisent l'inspection des équipements électriques fermés HTA et HTB grâce à la détection ultrasonore de défauts sur les cellules HT fermées. Des sociétés de services en analyse vibratoire utilisent cette technologie en complément pour la détection précoce de défauts sur des organes mécaniques. D'autres prestataires proposent la détection des fuites d'air comprimé ainsi que des audits complets de réseau dans le cadre des économies d'énergie financées en partie par l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie). Dans ce même cadre, les plus gros fabricants de purgeurs à vapeur proposent également une prestation de services consistant à repérer des purgeurs "fuyards".

### **La localisation des défauts**

En fonctionnement, la plupart des équipements industriels génèrent un spectre large bande couvrant aussi bien le domaine audible que celui des ultrasons. La composante ultrasonore (haute fréquence) de ces bruits possède une longueur d'onde petite extrêmement directionnelle.

Cette caractéristique permet aux défauts ultrasonores émis d'être facilement localisables. L'oreille humaine détecte les sons dans une bande de fréquence comprise entre 20 Hz et 20 kHz. Habituellement, les hommes en vieillissant n'entendent les sons que jusqu'à 16,5 kHz. Les longueurs d'onde audibles se situent entre 1,9 cm et 17 m tandis que celles détectées par les appareils à ultrasons se situent entre 0,3 et 1,6 cm. L'amplitude du signal décroît exponentiellement depuis sa source. Par conséquent, il est très facile pour un opérateur de localiser l'origine d'un défaut et d'analyser sa nature sans être trop perturbé par les diffractions.

### **Les détecteurs de défauts ultrasonores**

Certains instruments ultrasonores sont sensibles à la détection d'émissions sonores de très hautes fréquences comprises entre 20 kHz et 100 kHz. Cette large bande de détection accroît la pertinence du diagnostic. Les signaux sont alors transformés par hétérodynage en fréquences audibles (cf. figure 1).

Ces appareils sont portables et dotés d'un afficheur permettant de lire le niveau acoustique en décibels. D'autres appareils low-cost amplifient le signal à 40 kHz uniquement sur la fréquence de résonance de leur capteur sans pouvoir filtrer les bruits parasites générés par les autres machines. Ce principe de l'hétérodynage est aussi appelé "modulation d'amplitude". On le retrouve dans les autoradios pour la réception des grandes ondes ; en effet, l'auditeur peut écouter la voix de l'animateur radio suivant une porteuse d'ondes radioélectrique démodulée de plusieurs kilohertz.

## HÉTÉRODYNAGE

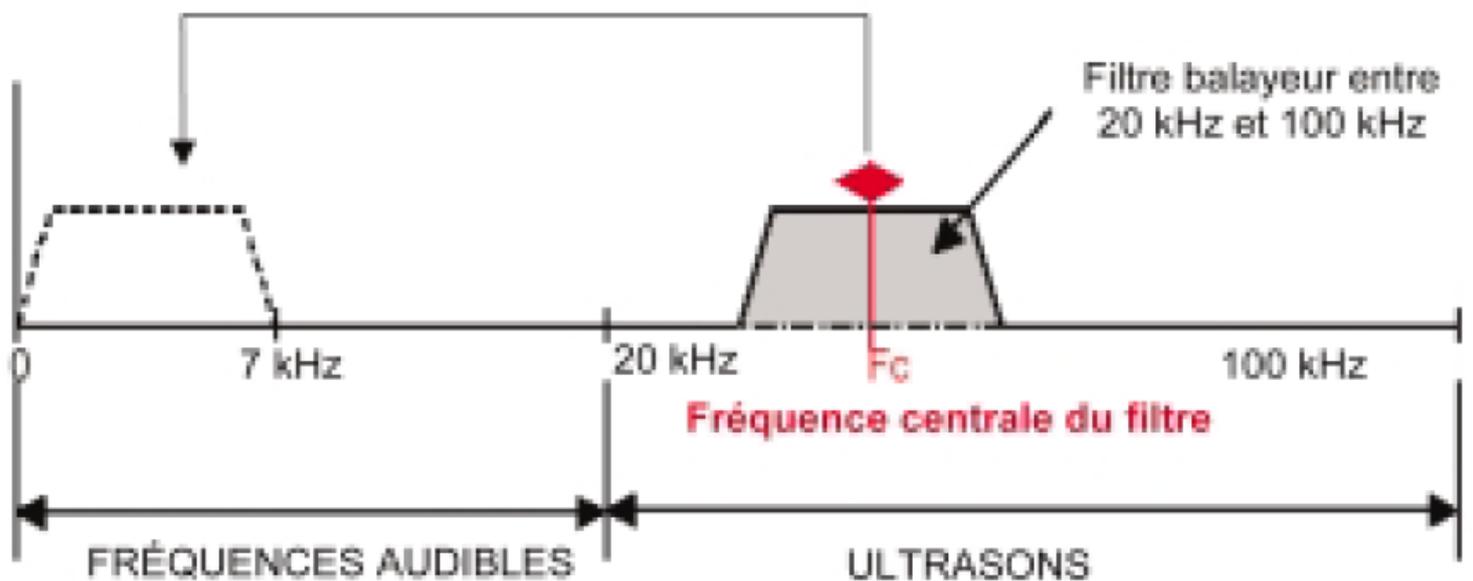


Figure 1 : le principe de l'hétérodynage.

### La chasse aux fuites et la maîtrise en demande d'énergie

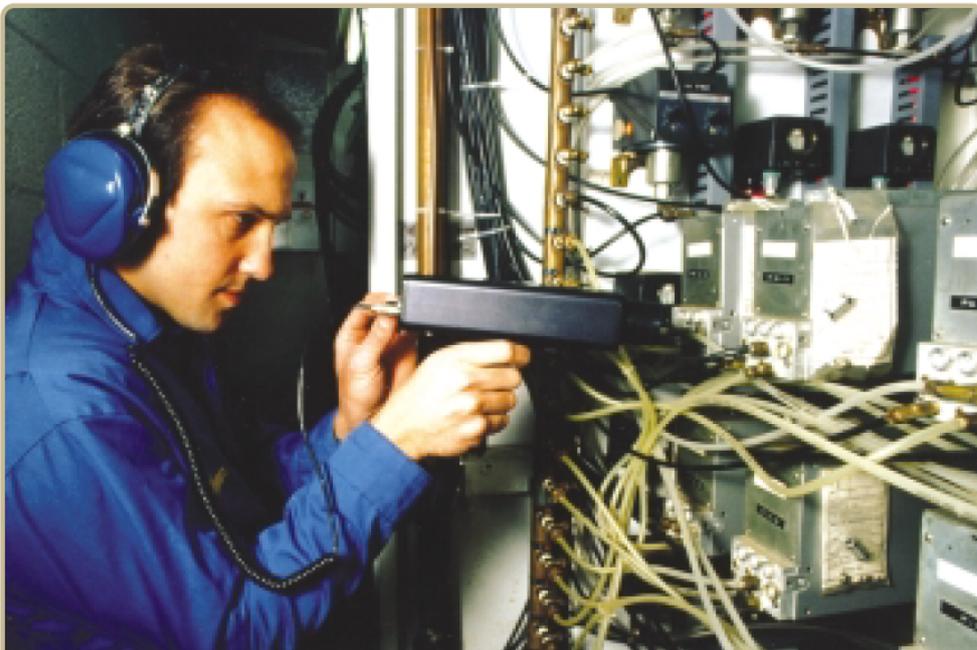


Figure 2 : l'air comprimé est l'une des énergies les plus chères à produire. L'opérateur peut détecter rapidement les fuites sur des installations en service. Le responsable maintenance pourra planifier les réparations durant les arrêts. L'avantage des ultrasons réside dans la détection par l'opérateur des fuites dans un environnement audible très bruyant.

Un vortex se crée suivant un certain différentiel de pression lorsqu'un gaz passe, à travers un orifice, d'un état de haute pression à un état de basse pression. Cette turbulence génère des ultrasons liés aux frictions des molécules. Parce que l'intensité du signal haute fréquence diminue très rapidement depuis sa source, il est facile pour l'opérateur de localiser une fuite avec un détecteur d'ultrasons (cf. figure 2). En revanche, il est vivement recommandé d'utiliser un appareil de détection permettant de filtrer en partie les ultrasons parasites provenant des autres machines en fonctionnement.

## La recherche de fuites sur les purgeurs à vapeur

Distinguer la vapeur du condensat, retenir parfaitement la première et évacuer intégralement et rapidement le second, telle est la fonction principale du purgeur à vapeur dans une installation.

Les plus gros fabricants de purgeurs à vapeur préconisent l'inspection ultrasonique de ces appareils comme l'une des méthodes les plus fiables. Les éléments ultrasoniques générés par le fonctionnement du purgeur à vapeur sont ainsi convertis dans une gamme audible. Les détecteurs permettent aux utilisateurs d'entendre, au moyen d'écouteurs, et de voir sur un afficheur l'état exact du fonctionnement d'un purgeur en ligne.

Ce principe de détection permet d'identifier les problèmes suivants :

- fuites ;
- purgeurs sous-dimensionnés, surdimensionnés ou bloqués ;
- il est même possible de faire la différence entre l'eau de condensation et la vapeur pour certains appareils dotés de filtres suiveurs entre 20 kHz et 100 kHz (cf. figure 3).

Dans un système à vapeur de 690 kPa (100 psi), un seul purgeur défectueux de 3,2 mm (1/8 po) peut entraîner une surconsommation de gaz naturel correspondant à 11 600 m<sup>3</sup>/an et équivalant à 1 500 euros.



*Figure 3 : dans les mains d'un technicien expérimenté, ces appareils apportent une analyse fine du fonctionnement des purgeurs.*

## La recherche de fuites sur les vannes

La technologie de détection de défauts ultrasonores peut aussi être appliquée à la recherche de vannes fuyardes sur les réseaux gaz et vapeur haute pression (cf. figure 4).



*Figure 4 : les ultrasons permettent de localiser facilement les turbulences générées par la fuite sur le côté aval de la vanne. L'intensité ultrasonore est comparée de chaque côté de la vanne. Pour les fuites très faibles, il est recommandé d'utiliser un appareil doté d'un filtre suiveur permettant d'écouter les signaux ultrasonores émis au alentours de 20 kHz.*

## La détection précoce de défauts électriques par ultrasons

Pourquoi l'inspection thermographique infrarouge et la détection de défauts ultrasonores sont-elles si complémentaires ?

La réponse est simple, il suffit de regarder comment nos sens de la perception fonctionnent. La thermographie infrarouge est l'extension de notre vue et la détection ultrasonore est celle de notre ouïe.

Il en est de même pour les sociétés de services utilisant la thermographie infrarouge. Les inspecteurs qui effectuent une détection de défauts électriques avec la méthode ultrasonore apportent une plus grande pertinence dans l'analyse et ont davantage de chances de localiser plus de défauts.

À cet égard, concernant les équipements stratégiques comme les transformateurs secs, les cellules fermées hautes tensions sont ignorées lors de certaines inspections car il n'est pas possible de les contrôler avec des méthodes conventionnelles comme l'infrarouge. Dans le cas de cellules fermées par exemple, la détection de défauts électriques par imagerie infrarouge n'est pas possible (sauf avec la pose de hublots transparents aux IR). Pourtant, une défaillance entraîne des arrêts de production et des pertes d'exploitation dans certains cas colossales. La détection de problèmes sur les appareillages électriques commence à être connue en France.

### Quelques éléments de l'ADEME sur la gestion de l'air comprimé

L'air comprimé est un fluide industriel largement utilisé en entreprise. Cependant, c'est sans doute l'un des fluides énergétiques les plus chers...

Représentant de 10 à 40 % de l'électricité consommée par une entreprise, l'air comprimé est un fluide aux enjeux multiples dont une mauvaise gestion peut non seulement engendrer un surcoût important, mais également une faible disponibilité et une fiabilité réduite avec des conséquences néfastes sur la production.

Un trou de 1 mm de diamètre sous 7 bars occasionne une perte de 5 m<sup>3</sup>/h d'air comprimé, soit une dépense annuelle moyenne de 300 euros HT (à 0,061 euros du kWh).

Il est courant de trouver une entreprise sur deux comportant un taux de fuite supérieur à 40 % de sa consommation en air comprimé et, bien souvent, sans le savoir.

Le prix d'1 nm<sup>3</sup> d'air comprimé pour une utilisation à 7 bars peut varier, compte tenu des déperditions, de 0,7 centime d'euros HT (130 Wh/nm<sup>3</sup>) à 6 centimes d'euros HT (1 000 Wh/nm<sup>3</sup>).

### À savoir

Une norme américaine ASTM E1002-96 sur la détection des fuites par ultrasons a été mise en place pour la validation des détecteurs ultrasonores. Les appareils répondant à cette norme doivent détecter une fuite de 0,127 mm de diamètre sous une pression de 0,34 bar à une distance de 15,25 m.

L'agitation moléculaire provoquée par des décharges partielles au niveau des têtes de câbles, des isolateurs, des supports des jeux de barres ou d'autres éléments haute tension des cellules préfabriquées fermées ou ouvertes génère des ultrasons.

Ainsi, les effets couronnes ont causé de nombreuses casses d'équipements électriques ces dernières décennies, notamment dans :

- les transformateurs ;
- les jeux de barre ;
- les isolateurs ;
- les têtes de câble ;
- les alternateurs.

Ce phénomène n'est apparemment pas bien assimilé par les fabricants, les installateurs et les responsables maintenance. Il n'est pas souvent identifié comme étant la source de défauts.

Les microamorçages générés par les effets corona (lire encadré "Que produit l'effet corona dans l'air ?") engendrent des détériorations sur les isolants, de sérieuses avaries, des arrêts de production et parfois même des morts (cf. figure 5).

### Inspection mécanique

La NASA, au début des années 1970, a fiabilisé la prévention des défauts des roulements grâce à la technologie des ultrasons. Suivant les études menées, la surveillance ultrasonore des roulements a permis de détecter les débuts d'usures précoces. Une augmentation du niveau initial de 12 à 50 dB indique clairement une dégradation du palier ou une mauvaise lubrification.



*Figure 5 : résultat d'un amorçage interne sur un équipement fermé.*



*Figure 6 : le détecteur de défauts US Ultraprobe 10 000 peut enregistrer les niveaux relatifs en décibels ; les fréquences centrales d'écoute et leurs signaux audio-temporels sont enregistrés pour une analyse spectrale via un logiciel de post-traitement. Ces fonctionnalités sont très utiles pour le suivi qualitatif des roulements et engrènements tournant jusqu'à de très basses vitesses (jusqu'à 10 tr/min).*

La fréquence centrale de résonance des roulements se situe entre 20 kHz et 45 kHz en fonction de leur taille et de la dimension des billes qui les composent. À cet égard, les défauts primaires (brinelling, fretting, mauvaise lubrification, etc.) sont amplifiés par les résonances des roulements qui présentent une forte densité modale pour ces fréquences. Ce phénomène haute fréquence est rapidement identifiable par les détecteurs de défauts ultrasonores. Certains appareils ont un système de balayage de fréquences adaptable au centre du dôme d'amplification du roulement. La comparaison du niveau acoustique relatif en décibels n'est qu'un premier élément permettant au responsable maintenance d'être averti d'un problème éventuel. Seule l'analyse FFT du signal temporel acquis permettra le suivi qualitatif par rapport à la typologie spectrale de la cinématique de l'organe mécanique inspecté (cf. figure 6).



*Figure 7 : Ultraprobe mis en complément avec un collecteur-analyseur FFT de vibration Entek-IRD Datapack servant à l'expertise des réducteurs et paliers inaccessibles sur des lignes d'arbres.*

Les détecteurs de défauts ultrasonores peuvent aussi être associés comme une sonde accessoire à un collecteur-analyseur vibratoire de données pour l'analyse de défauts sur des réducteurs et boîtes de vitesses comme sur l'image ci-contre (cf. figure 7).

### **Écouter ce qui ne vibre pas : la complémentarité des analyses ultrasonores et vibratoires**

On peut dire que les techniques acoustiques et d'analyses vibratoires sont identiques, excepté le choix de la fréquence de détection.

Dans la pratique, les différences sont importantes et affectent non seulement la conception du capteur et le traitement des signaux, mais surtout le rapport signal/bruit du signal détecté.

En conséquence, les techniques d'écoute ultrasonores peuvent fournir des résultats complémentaires pour la surveillance des paliers par rapport à des techniques de surveillance vibratoire et notamment pour les basses vitesses. Si un défaut de machine produit exclusivement une vibration basse fréquence (par exemple, les faibles niveaux de balourd ou de mésalignement sur une machine tournante), alors par définition, aucun signal ultrasonore ne sera détecté. À cet égard, l'analyse vibratoire fournit une méthode de surveillance nettement supérieure.

Cependant, dans la pratique, des niveaux élevés de balourd et de mésalignement produisent une activité importante d'émission ultrasonore due à la modulation cyclique des efforts de la charge sur le film de lubrification. Au vu des défauts typiques de machines qui peuvent se produire dans les roulements et les engrenages, les sources des chocs sont principalement associées aux impacts et aux frottements. Ces signaux ont un large spectre de fréquences s'étendant du continu jusqu'à (typiquement) des fréquences élevées de l'ordre du mégahertz. Pour fournir une illustration plus compréhensible du paragraphe précédent, une sonde ultrasonore et un accéléromètre ont été montés côte à côte sur un même palier. Les signaux ont été simultanément enregistrés et numérisés avec la sonde ultrasonore et l'accéléromètre.

### **Effets pervers de la surlubrification pouvant générer un incendie**



La surlubrification ou sous-lubrification représente 80 % des défauts des roulements. Afin d'éviter ces problèmes, les rondiers peuvent utiliser des détecteurs de défauts ultrasonores fixés sur leur pompes qui permettent d'écouter et d'optimiser le graissage en temps réel.

## Aperçu d'un défaut par rapport au bruit de fond suivant la détection ultrasonore et la vibration pour le même roulement

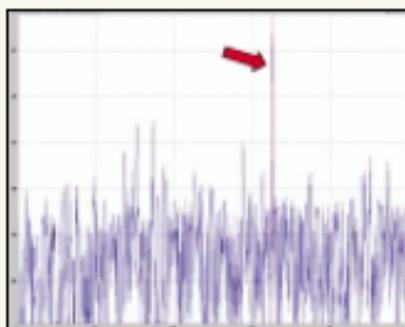
Cinématique des défauts du roulement inspecté

Fabriquant : SKF

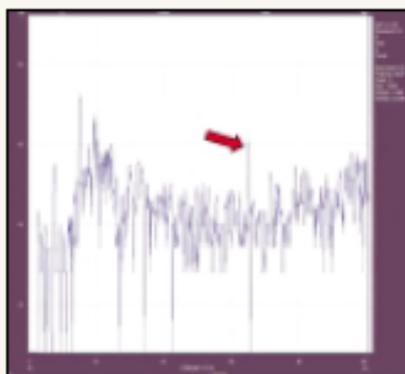
Référence : 22218CC (SKF)

Fréquences de défauts

- éléments roulants : 57,512 Hz ;
- bague interne : 85,083 Hz ;
- bague externe : 65,017 Hz ;
- cage : 3,397 Hz ;
- vitesse de rotation : 7,9 Hz.



*L'analyse de ce spectre nous montre la présence d'une raie émergeante de 50 dB par rapport au bruit de fond à 65 Hz pour un défaut sur la bague externe du roulement.*



*Spectre zoomé, une émergence de seulement 10 dB apparaît par rapport au bruit de fond. On constate aussi un niveau (basses fréquences) vibratoire supérieur lié aux engrenements proches du palier. Ceci peut devenir problématique pour les roulements tournant à des basses vitesses.*

*Niveau global vitesse de 0,58 mm/s.*

*Niveau global accélération de 157 mg.*

*Par rapport à ces spectres, on peut constater que l'émergence des défauts en ultrasons est 100 fois plus élevée qu'en vibration.*

## Que produit l'effet corona dans l'air ?

Lorsqu'on porte un fil à un potentiel électrique élevé, le champ à son voisinage peut devenir suffisamment intense pour provoquer l'ionisation des molécules de l'air. Les ions ainsi formés sont alors entraînés par la force électrostatique et tendent à se déplacer le long des lignes du champ électrique. Ce dernier est proportionnel à la densité de charge par unité de surface.

Les micro-amorçages sont générés par des éléments sous tension possédant des angles aigus. Mais aussi, nous retrouvons ces effets dans des microbulles d'air entre les conducteurs et leurs isolants et notamment sur les têtes de câble.

L'effet couronne n'est pas uniquement un phénomène électrique. C'est avant tout une **agression ionique** qui ne crée pas de chaleur à la base.

Les composants chimiques de l'air sont :  $N_2 + O_2 + (H_2O) +$  gaz rares.

Le résultat de l'ionisation est la formation de :

- $O_3$  (l'ozone est utilisé pour des traitements de surface) ;
- Nox (dérivés nitrés) ;
- $HNO_2, HNO_3$  (salpêtre, poudre blanche composée d'acide nitrique) ;
- $NH_4NO_3$  (dérivé d'ammoniac) ;
- agression UV.

La complémentarité des diagnostics infrarouge et ultrasonore est la meilleure solution pour l'inspection des appareillages électriques.

Les caméras infrarouges peuvent détecter les anomalies résistives. L'instrument de détection de défauts ultrasonores localise les anomalies capacitives.



*Le contrôle ultrasonore prend ainsi toute son importance.*

*Dans ce cas, l'opérateur écoute les joints de portes avec un Ultraprobe 2000, les aérations et le niveau des vitres plexiglas en face avant des appareillages.*

*La sensibilité de certains appareils ultrasonores a été validée par EDF afin de connaître leur seuil de détection.*

## Les trois phases de dégradation des roulements

### ➤ Les défauts préliminaires

Le niveau de lubrification est anormal et le niveau ultrasonore en décibels augmente sans changements dramatiques de la qualité du timbre entendu.

### ➤ Quand le défaut augmente

Un son de roulement qui "gratte" est clairement identifié avec les détecteurs de défauts ultrasonores. Les collecteurs-analyseurs de vibration confirment l'anomalie. L'analyse spectrale du signal permettra de qualifier le type de défaut.

### ➤ Plus le roulement se détériore, plus la chaleur dégagée augmente

Elle peut être visualisée avec une caméra infrarouge mais, à ce niveau, l'avarie peut être catastrophique et immédiate. À cet égard, il est abusif voire même dangereux de penser faire du diagnostic de pannes sur des roulements en thermographie infrarouge, car l'opérateur ne saura pas dans quelle phase il se situe (mauvaise lubrification sur un bon palier ou dégradation physique du roulement ?)

*Au début des années 1970, la NASA, avec le numéro 1 mondial de la détection de défauts US Uesystems, a fiabilisé la prévention des défauts de roulements grâce aux ultrasons. Ils ont permis de détecter les débuts d'usures précoces. Durant les années 1990, elle a mis au point un capteur de fuite US longue distance solidaire de l'Ultraprobe afin de contrôler l'étanchéité des faisceaux de remplissage des réservoirs d'hydrogène et d'oxygène. Ici, la fusée Boeing Delta II, chargée de placer des satellites en orbite.*



## En conclusion

Il semble logique qu'un responsable maintenance dans une industrie fasse appel à différents moyens possibles afin de localiser des défaillances potentielles sur ces équipements.

Nous n'avons jamais vu un médecin réaliser un diagnostic sur un patient uniquement en le regardant, en le palpant ou en mesurant sa température corporelle. Dans une démarche liée à la maintenance conditionnelle, il faut essayer d'employer un maximum de descripteurs possibles afin d'accroître la pertinence du diagnostic et la planification des arrêts de production. La détection de défauts ultrasonores en fait partie...