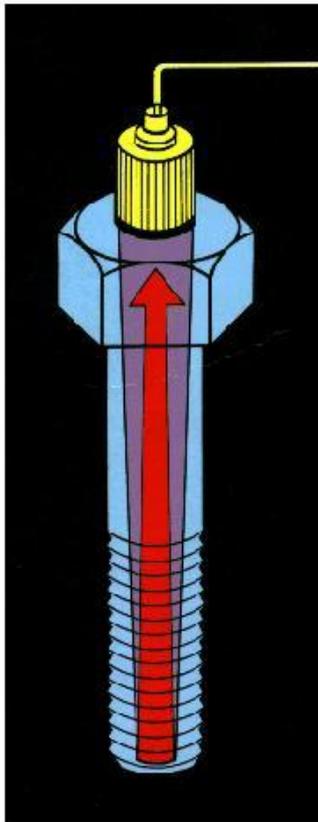


## Contrôle de serrage



par ultrasons

Le principe de la méthode  
expliqué aux non-initiés  
et  
ré-expliqué aux autres

## ❖ Principe de la mesure

Le principe de la mesure est très simple.

Il consiste à mesurer l'élongation de la vis ou du goujon sous l'effet de la tension induite par le serrage.

Cette élongation étant proportionnelle à la tension (supposons pour l'instant qu'on se limite au domaine élastique), on pourra alors en déduire la tension par la simple application d'un coefficient.

Le transducteur ultrasonore posé sur la tête de la vis ou du goujon agit :

- ✓ D'abord comme un **émetteur** qui transforme l'impulsion électrique fournie par le système de mesure en une onde ultrasonore qui va se propager longitudinalement dans le matériau.
- ✓ Puis comme un **récepteur** qui va recueillir l'onde ultrasonore très affaiblie qui s'est réfléchi sur le fond de la vis, pour la transformer en un signal électrique qui sera traité par le système de mesure.

Cette opération est répétée plusieurs centaines ou milliers de fois par seconde.

Lors de chaque « tir », le système de mesure chronomètre le temps écoulé entre l'émission de l'impulsion et le retour de son écho.

C'est le principe du sonar, mais la grande vitesse de propagation des ultrasons (environ  $5800 \text{ m.s}^{-1}$  dans l'acier) et la résolution recherchée sur l'allongement (quelques  $\mu\text{m}$ ) nécessite une résolution de mesure du temps de l'ordre de la nanoseconde ( $10^{-9} \text{ s}$ ).

Appelons «longueur ultrasonore» ce temps mesuré par le système.

*Nous verrons qu'il n'est pas nécessaire de connaître avec précision la vitesse de propagation des ultrasons dans le matériau.*

Au repos, à l'état dit **INITIAL**, on mesure une longueur ultrasonore  $L_i$ .

Après serrage, à l'état dit **FINAL**, on mesurera une longueur ultrasonore  $L_f$ .

Cette élongation ultrasonore  $L_f - L_i$  est due :

- À l'allongement mécanique de la vis
- À la diminution de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore due à la tension introduite dans le matériau.

Généralement, l'effet de la tension est largement prédominant, plus ou moins selon le matériau.

Ces deux causes ne sont pas discernables par le système.

Mais différents travaux de recherche, dont ceux du CETIM en France, ont montré depuis longtemps (quarante ans ...) que ces deux effets étant proportionnels à la tension, leur combinaison l'est également.

Heureusement, car c'est ce qui rend la méthode applicable !

Le rapport de proportionnalité entre l'élongation ultrasonore (grandeur qu'on mesure) et la tension induite (grandeur qu'on cherche à connaître) va être établi par un **ÉTALONNAGE PRÉALABLE** de l'assemblage.

Pour cela, une maquette représentative de l'assemblage (même type de vis/goujon et même longueur serrée) va être soumise à des efforts calibrés, par exemple sur une machine de traction.

Pour chaque valeur de tension, mesurée par la machine de traction ou par un capteur de force, le système de mesure va enregistrer l'élongation ultrasonore correspondante.

Le système calcule alors et enregistre le coefficient de proportionnalité  $K$ .

$$\text{Tension (daN)} = K \times \text{Allongement ultrasonore (ns)}$$

$K$  sera exprimé en  $\text{daN} \cdot \text{ns}^{-1}$  ou  $\text{kN} \cdot \text{ns}^{-1}$

Cette méthode prend automatiquement en compte la vitesse de propagation des ultrasons et ses modifications par la tension, sans qu'il soit utile de les connaître.

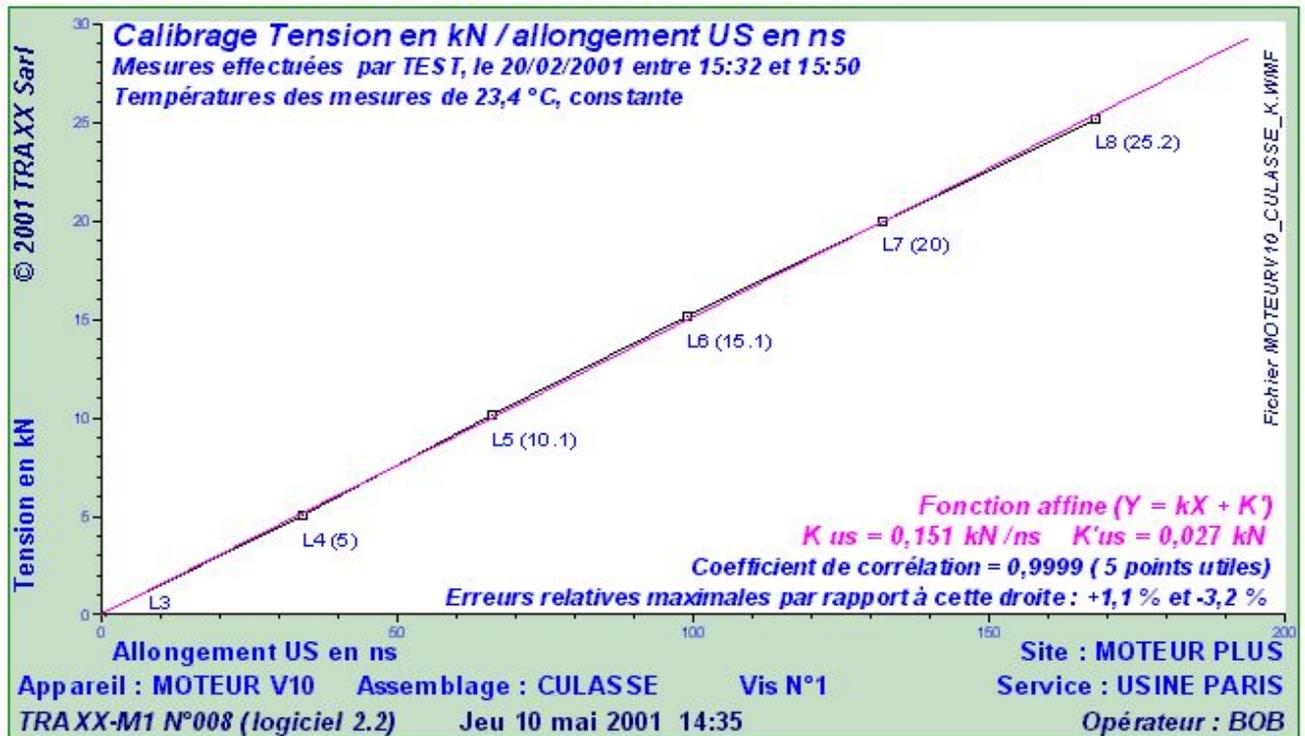
*Cette opération ne dure que quelques minutes. Elle ne sera réalisée qu'une seule fois pour un type d'assemblage donné.*

## ❖ Exemple d'étalonnage RÉEL

On a représenté en abscisse l'allongement ultrasonore en nanosecondes (ns) mesuré par le système

Et en ordonnée la tension en kiloNewtons (Kn) mesurée par la machine de traction.

Les calculs et la présentation graphique sont effectués automatiquement par le système de mesure Traxx-M2.



Copie d'écran non modifiée de l'appareil TRAXX M2

La linéarité quasi-parfaite donne ici un K de 0,151 kN par ns

*Remarque :*

Cet étalonnage permet de relier l'allongement de la vis à la tension à mesurer.

Les vis d'un même lot peuvent donc présenter sans inconvénient de légères variations dimensionnelles, il n'est pas du tout nécessaire de les rectifier au micron !

Une mesure de longueur initiale sera réalisée sur **chaque** vis de la série.

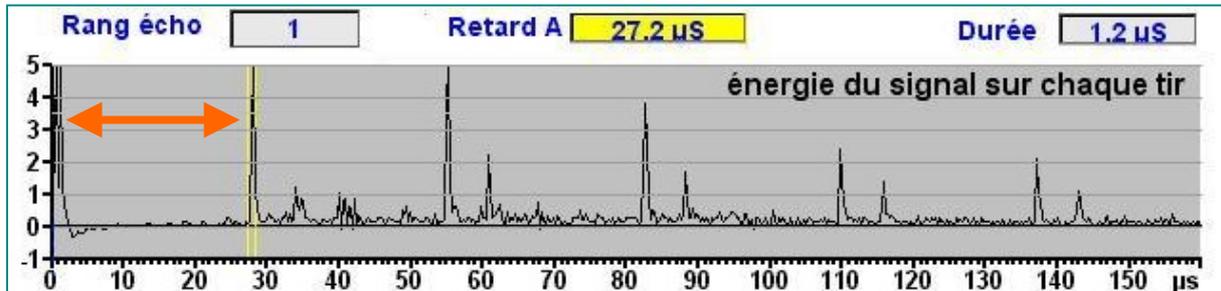
C'est la différence ( longueur finale – longueur initiale ) qui sera utilisée par le système pour calculer la tension.

## ❖ Le mode de mesure simple

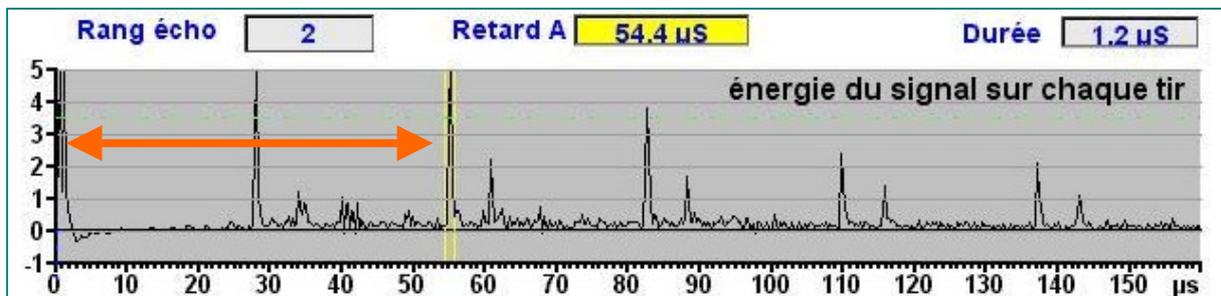
On obtient généralement plusieurs réflexions successives sur les faces d'entrée et de fond de la vis, si ces deux faces sont suffisamment planes et parallèles.

Dans le mode de mesure **SIMPLE**, on effectue la mesure entre l'impulsion d'émission et un écho de fond.

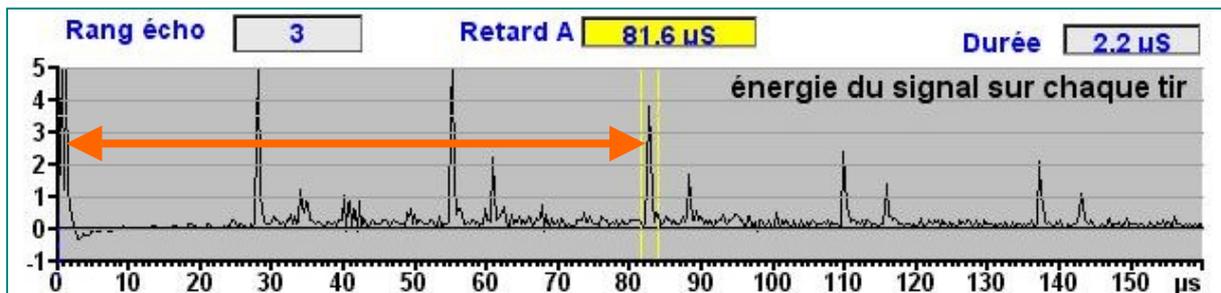
Généralement, on utilise le premier écho de fond :



Mais on peut aussi choisir le deuxième ...



..., le troisième, etc.



*Copie d'écran non modifiée de l'appareil TRAXX M2*

Plus l'écho est lointain, plus il risque d'être affaibli et déformé, donc difficile à traiter.

Mais la précision relative de la mesure va s'améliorer à proportion du rang de l'écho choisi.

Il convient de choisir le compromis le plus favorable.

C'est là qu'interviendra le savoir-faire de l'opérateur qui effectuera les réglages initiaux du système.

## ❖ Le traitement de l'écho

Un écho se présente plus ou moins sous forme d'une oscillation amortie, à la fréquence de résonance de l'ensemble transducteur + face d'entrée de la vis, soit de 1 à 20 MHz généralement.

Sa largeur sera généralement de quelques centaines de nanosecondes.

Or, la résolution recherchée sur la mesure est de l'ordre de la nanoseconde.

Le système doit alors déterminer un point caractéristique sur le signal.  
C'est sur ce point particulier que s'effectuera la mesure de temps.

On a utilisé dans le passé le point où le signal franchit un seuil de tension prédéterminé.

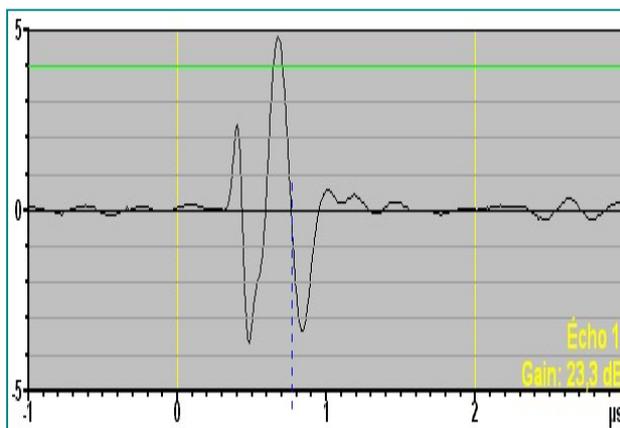
Mais la position temporelle de ce point était affectée par les variations d'amplitude inévitables du signal.

Aussi préfère-t-on aujourd'hui utiliser le point de **passage à zéro du signal**, qui est lui pratiquement insensible aux variations d'amplitude du signal.

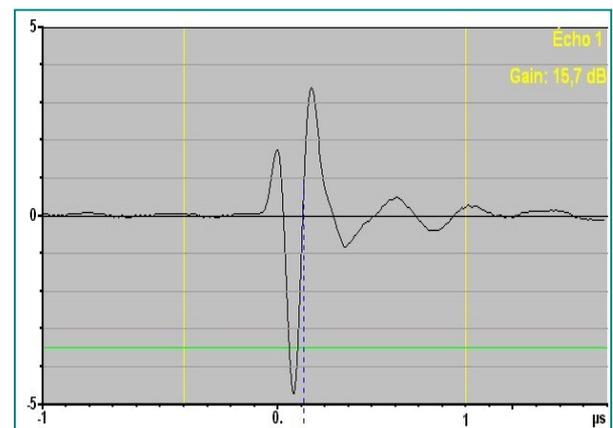
Un seuil (figuré en vert ci-dessous) est choisi par l'opérateur lors du réglage initial de l'appareil.

Il sert à indiquer au système l'arche de signal choisie pour déterminer le point de passage au zéro suivant (indiqué ci-dessous par la ligne pointillée bleue) sur lequel s'effectuera la mesure.

Selon le cas, on pourra utiliser...  
...une arche positive...



...ou négative... du signal :



Copie d'écran non modifiée de l'appareil TRAXX M2

C'est lors de ce choix, réalisé uniquement lors du réglage initial de l'appareil, que s'exprimera le savoir-faire de l'opérateur.

Ensuite, lors des mesures sur site, par un opérateur éventuellement moins formé, le système appliquera la consigne enregistrée, sans intervention de cet opérateur.

## ❖ L'influence de la température

La température de l'assemblage a une influence énorme sur la longueur ultrasonore mesurée.

Elle modifie à la fois :

- ✓ La longueur mécanique de la vis
- ✓ La vitesse de propagation de l'onde ultrasonore.

Quelques degrés de variation sont suffisants pour provoquer des erreurs de 10 ou 20 % sur la mesure de la tension d'un assemblage courant.

Il suffit de manipuler une vis dans la main pendant quelques minutes en observant la mesure pour s'en apercevoir. (Le temps mesuré augmente)

Il est donc nécessaire de corriger l'effet des variations de température.

Pour cela, un étalonnage préalable en température sera réalisé (avec le système lui-même), pour déterminer la variation de longueur ultrasonore (en ns) en fonction des variations de température.

Cette relation étant quasiment linéaire (encore un coup de chance !), on détermine simplement le **coefficient de température  $\beta$**  de l'assemblage.

Le système de mesure sera équipé d'une sonde de température et effectuera automatiquement la correction correspondante lors des mesures.

Le système ramène la mesure de longueur finale à la température de la mesure de la longueur initiale par application du coefficient  $\beta$ .

Puis il effectue le calcul de la tension, ramené à cette température initiale, éliminant ainsi l'influence de la température.

L'approximation ainsi réalisée est largement suffisante eu égard à la précision recherchée sur la tension (quelques %)

## ▪ Les avantages du mode simple

Il est simple !

Le système n'a à traiter qu'un seul écho.

Il est utilisable même si un seul écho est présent.

## ▪ Les inconvénients du mode simple

La mesure peut être affectée par de nombreuses causes d'erreurs :

- ✓ Longueur du câble utilisé (éventuellement variable dans le temps)
- ✓ Epaisseur variable du fluide couplant
- ✓ Dispersions dans le traducteur
- ✓ Dispersions (thermiques) éventuelles de l'électronique de mesure
- ✓ Etc. ...

Ces erreurs s'avéreront particulièrement pénalisantes dans le cas d'un suivi dans le temps de l'évolution d'un assemblage.
--

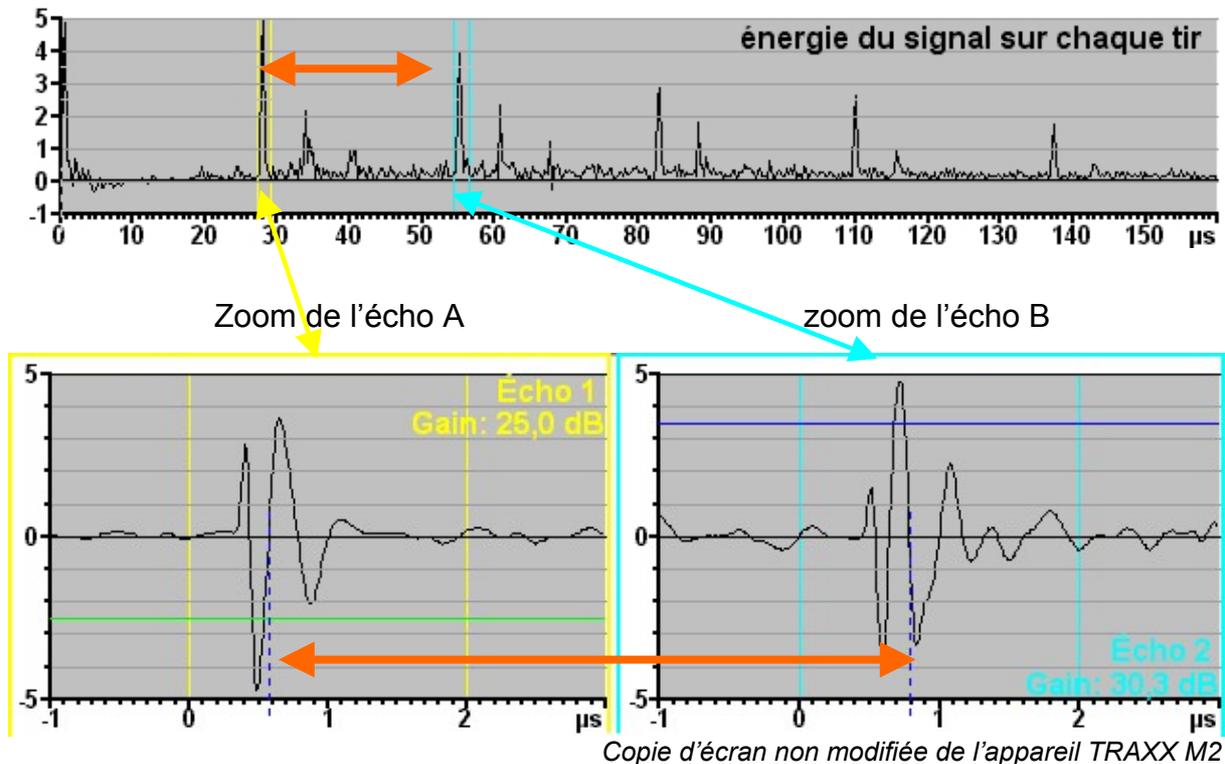
Pour s'affranchir de ces causes d'erreur, il est souvent préférable d'utiliser ...

... le mode de mesure différentiel

## ❖ Le mode de mesure différentiel

Ce mode consiste à ignorer le signal d'émission pour mesurer le temps écoulé entre le retour de **deux échos de fond**, généralement le premier et le deuxième.

Le système de mesure effectue une double mesure de temps par passage au zéro du signal, dont il effectue la différence  $T_B - T_A$ .



**Premier** écho de fond (TA)

**Deuxième** écho de fond (TB)

C'est la différence de ces deux temps (passage à zéro de l'écho B – passage à zéro de l'écho A) qui sera utilisée comme longueur ultrasonore.

Le trajet effectué par le signal entre les deux mesures se résume à un simple aller-retour entre les deux faces, sans sortir du matériau.

Ainsi toutes les causes d'erreur relevées plus haut, dues au trajet du signal extérieur à la vis sont automatiquement éliminées.

Ce mode différentiel est très supérieur au mode simple, surtout pour le suivi d'un assemblage dans le temps, où la reproductibilité à long terme de la mesure est essentielle.

**ATTENTION** : Le mode différentiel **VRAI** exige le traitement **simultané** de deux échos. Le système doit asservir en temps réel l'amplitude des **deux échos** choisis, avec **deux gains d'amplification différents**.

## ▪ Les avantages du mode différentiel

Il élimine pratiquement toutes les principales causes d'erreurs affectant le mode simple. (câble, couplant, dérive thermique, etc.)

Il assure une excellente reproductibilité à long terme, nécessaire au suivi dans le temps d'un assemblage.

Il permet l'échange de données entre sites distants ou dans le temps, sans se préoccuper de la longueur des câbles ou des dispersions dues aux transducteurs et aux couplants.

## ▪ Les inconvénients du mode différentiel

Il nécessite la présence de deux échos utilisables au moins

Il traite le deuxième écho de fond, qui, ayant subi TROIS réflexions, peut être très déformé et très sensible à la position du transducteur.

L'utilisation de ce mode demande une certaine attention de la part de l'opérateur, pour éviter le phénomène de « saut d'arche ».

Ce phénomène (qui existe aussi en mode simple) intervient quand un seuil mal défini ou un signal très déformé amène le système à se tromper d'arche de mesure, en décalant alors d'une période entière du signal le point de passage par zéro choisi. (par exemple 100 ns !)

Généralement, l'erreur introduite par ce « saut d'arche » est tellement énorme que l'opérateur ne peut manquer de la détecter.

Ce danger de « saut d'arche » fait l'objet de différents algorithmes tendant à l'éliminer. Des progrès restent à faire sur ce point. Ils sont en cours d'étude.

## ▪ Utilisations particulières du mode différentiel

Le système effectuant automatiquement la différence des deux temps, on peut intercaler une pièce entre le transducteur et la face d'entrée.

Son épaisseur sera automatiquement éliminée pendant la mesure

### Deux usages intéressants :

- ✓ Intercaler un **isolant thermique** entre le transducteur et la pièce si celle-ci est très chaude. (plusieurs centaines de degrés possibles)
- ✓ Intercaler une **rondelle souple** (élastomère) entre le transducteur et la pièce dont la face d'entrée est trop rugueuse ou insuffisamment plane pour assurer un contact direct correct avec le transducteur.

## ❖ Précision des mesures

Avec une électronique actuelle, la **résolution** de la mesure est généralement d'une nanoseconde ou mieux.

La **précision** atteinte sur la mesure de tension est plus difficile à déterminer.

En effet, le système de mesure de temps peut atteindre une précision très élevée, mais des perturbations physiques vont limiter la précision réelle de la mesure :

- ✓ Modifications des échos dues aux différences de positionnement du traducteur, par exemple en rotation sur lui-même.
- ✓ Planéité et parallélisme imparfaits des faces d'entrée et de fond.
- ✓ Forme irrégulière du fond de la vis.
- ✓ Dispersions de métallurgie entre vis de même type ( partageant le même étalonnage).
- ✓ Incertitude sur la mesure de la température réelle de la pièce, ou gradient de température variable et mal maîtrisé.
- ✓ ...

La mesure de temps va alors être affectée d'erreurs de reproductibilité absolues qui seront généralement de quelques nanosecondes.

L'incertitude relative de la mesure de tension dépend alors de l'étendue de mesure.
---

*Exemples numériques :*

Sur une vis de culasse de longueur 150 mm, l'élongation ultrasonore maximale pourra être de l'ordre de 400 ns

L'incertitude relative sur la mesure sera de l'ordre de **1 à 2 %**

Sur une très petite vis de quelques mm, l'élongation maximale sera par exemple de 50 ns seulement.

L'incertitude relative pourra alors monter à **5 à 7 %**.

Mais, en sélectionnant le n-ième écho quand c'est possible, on améliorera n fois la précision relative.

## En résumé,

cette méthode permet d'atteindre, toutes causes d'erreurs confondues, une précision meilleure que 5 % sur la tension réelle, et jusqu'à 1 à 2 % quand les conditions sont favorables.

Ces précisions sont largement suffisantes pour les besoins actuels des industriels.

## ❖ Différents types d'utilisation (dans le désordre)

### ✓ Mesures en **desserrage**

La longueur initiale est mesurée sur la vis tendue.

Puis elle est desserrée, et la longueur finale est mesurée sur la vis détendue.

On connaîtra ainsi la tension qui existait avant le desserrage. ( $K \times (L_i - L_f)$ ).

### ✓ **Asservissement** du serrage par la mesure ultrasons

Le transducteur est laissé en place PENDANT le serrage.

Le système permet alors de suivre en temps réel l'augmentation de la tension.

On peut ainsi arrêter le serrage quand la tension souhaitée est atteinte.

Cet asservissement du serrage par les ultrasons peut être manuel (méthode utilisée sur Ariane, où l'opérateur surveille non pas le couple qu'il applique, mais directement la valeur de tension lue sur l'appareil) ou automatique (asservissement d'une visseuse).

### ✓ **Suivi** de l'évolution du serrage **à long terme**

Le système mémorise la « longueur initiale » de la vis.

Des mesures périodiques de « longueur finale » sont effectuées pour suivre l'évolution de l'assemblage dans le temps (se desserre-t-il ou non ? , comment vieillit-il ?)

Ces mesures s'effectuent sans démontage et sans intrusion dans l'assemblage.

### ✓ Utilisation dans le **domaine plastique**

La méthode est utilisable dans le domaine plastique, moyennant certaines précautions méthodologiques.

Ce point sort du cadre de cet exposé. Il pourra être développé par ailleurs.

## ✓ Mesures dynamiques en temps réel

Avec un système capable de prendre une mesure en un temps très bref (par exemple quelques microsecondes), on pourra mesurer les efforts réels subis par un assemblage en fonctionnement.

Par exemple un goujon de fixation de culasse sur un moteur en fonctionnement.

On pourra ainsi établir par exemple la cartographie des efforts subis par l'assemblage en fonction par exemple de l'angle du vilebrequin.

## ✓ Surveillance continue

Il est possible de surveiller le comportement d'un assemblage en permanence, le traducteur et le système restant à demeure.

Cette méthode (d'avenir) permettra de détecter les problèmes avant qu'ils ne surviennent sur des assemblages particulièrement critiques, et d'éviter ainsi des casses dangereuses et/ou coûteuses.

Une télé-alarme pourra être déclenchée par le système.

Exemples d'applications :

- ✓ Grues
- ✓ Engins lourds (travaux publics)
- ✓ Ponts et ouvrages d'art
- ✓ Téléphériques
- ✓ Industrie lourde (laminoirs)
- ✓ Centrales électriques
- ✓ Aéronautique
- ✓ Navires
- ✓ Ferroviaire
- ✓ ...

## ✓ À vous d'en imaginer d'autres ...

**Traxx**

3, rue Sainte Croix

91150 ÉTAMPES

FRANCE

tél : +33 (0)1 64 94 1168

fax : +33 (0)1 64 94 25 69

Email : [Traxx@free.fr](mailto:Traxx@free.fr)

[www.Traxx.eu](http://www.Traxx.eu)