

# Observation et mise en évidence de phénomènes de dérive sur des mesures de chocs mécaniques,

par Henri Grzeskowiak

La mesure de chocs à l'aide de capteurs piézo-électriques ou piézo-résistifs s'accompagne de phénomènes de dérives observées sur le signal : c'est sur la vitesse que cette dérive est la plus évidente alors que sur l'accélération elle est plus cachée et un œil non averti peut très bien ne pas la voir.

Dans ce qui suit nous allons le montrer sur quelques exemples, puis nous donnerons quelques pistes pour les causes possibles, nous évoquerons les corrections possibles sur quelques exemples et donnerons des critères de validation des mesures de chocs mécaniques.

Un même phénomène que l'on va appeler faute de mieux « l'offset dynamique » (sur le signal d'accélération) a curieusement un impact très visuel sur la vitesse déduite d'une telle mesure d'accélération alors qu'il passerait facilement inaperçu sur l'accélération.

## Henri Grzeskowiak

évolue toujours dans l'univers des essais et de la sureté de fonctionnement en tant que consultant, chargé de cours, et membre actif de l'ASTE après une carrière professionnelle dédiée aux essais environnementaux à la DGA, Matra, puis MBDA.

Henri Grzeskowiak a reçu plusieurs distinctions pour ses connaissances dans le domaine de l'environnement mécanique et est reconnu par la communauté dédiée à la mesure des chocs et des vibrations.

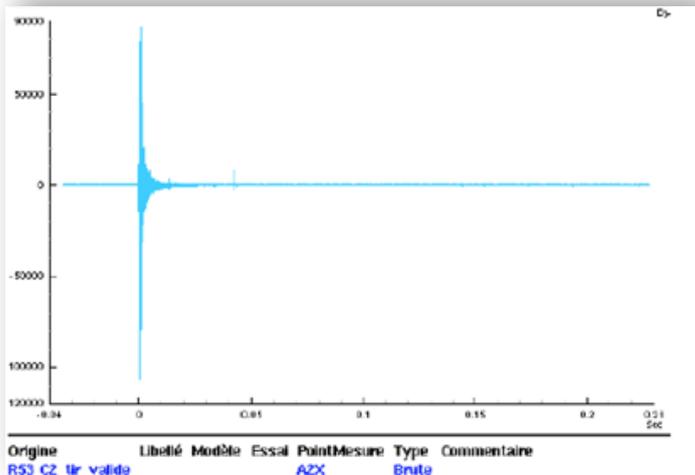


Figure 1 - accélération

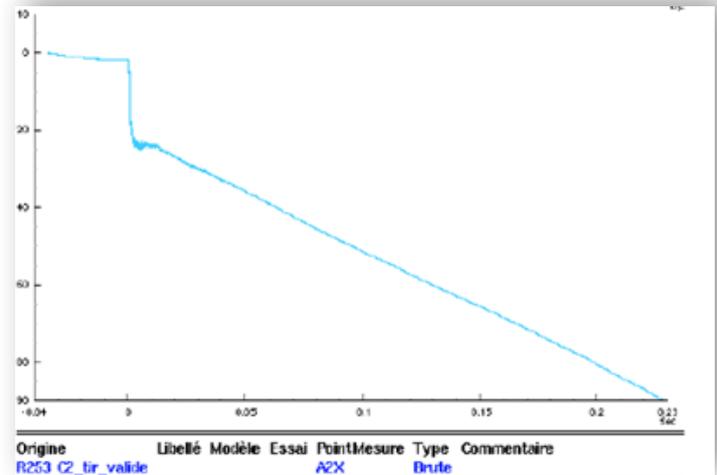


Figure 2 - vitesse correspondante

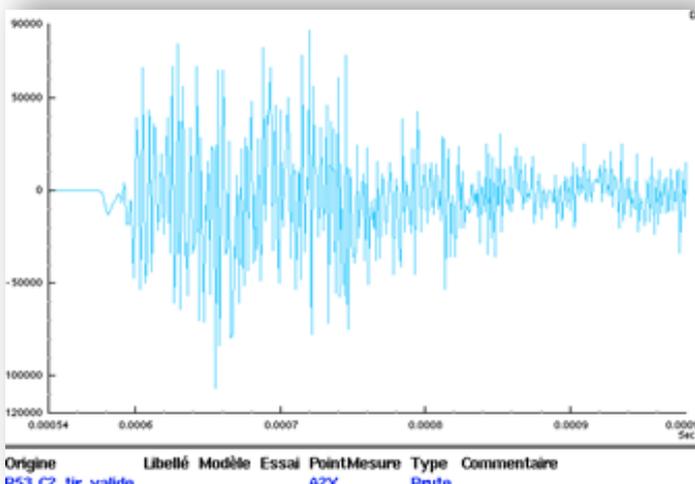


Figure 3 - accélération

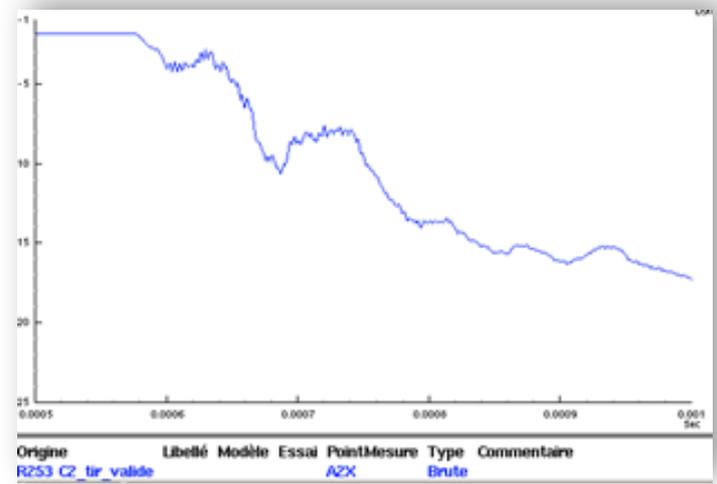


Figure 4 - vitesse correspondante

Précisons que dans ces deux cas (figure 1 & 2 / figure 3 & 4), le choc est réputé à changement de vitesse et de déplacement nuls, c'est à dire qu'au début du choc on a des conditions initiales nulles en vitesse et déplacement vers lesquelles on revient après la fin du choc.

On constate que dans le cas de la **figure 1** (accélération) la dérive de l'offset a précédé le choc proprement dit, mais qu'un changement de pente s'est produit après la fin de la partie dynamique du choc (celle ou l'accélération en regard est en variation dynamique).

Dans le cas de la **figure 3**, l'accélération est dilatée et l'oeil exercé voit immédiatement les «soubresauts» qui viennent se superposer à l'accélération. Ces soubresauts dont la valeur moyenne n'est pas nulle, contrairement à la partie dynamique du choc (qui correspond aux oscillations de vraie vitesse que l'on voit de part et d'autre de la pente moyenne de la dérive) , vont provoquer la dérive de vitesse que l'on observe sur la **figure 4** qui représente la vitesse.

## On peut donc distinguer les types de dérive (ou offset) suivants :

- **Offset de type 1** avant le choc proprement dit : cet offset statique doit être retiré dans tous les cas (pour cela on calcule sur une durée choisie la valeur moyenne du choc avant le début du choc proprement dit et on la retire de la totalité du signal)

- **Offset de type 2** : une éventuelle dérive , normalement d'origine thermique, qui se produit à partir de l'instant où la correction d'offset statique a été réalisée : il faut apprécier au coup par coup la nécessité de le corriger

- **Offset de type 3** : l'offset dynamique pendant le choc : que l'on peut considérer comme une sensibilité du capteur à la grandeur d'influence qu'est l'onde de déformation lorsque celle-ci traverse le corps d'épreuve du capteur ( la partie structurale portant le transducteur)

- **Offset de type 4** : puis le retour à l'équilibre des éléments de la structure polycristalline qui se sont dépolarisés sous l'effet du choc.

**ZERO-SHIFT IN PIEZOELECTRIC ACCELEROMETERS. Polarization Switching in Polycrystalline Ferroelectrics at Very Low Fields and Stresses.**

**Description/Abstract**

Authors: Plumlee, R.H.  
Publication Date: 1971 Jan 01  
OSTI Identifier: 4045629  
Report Number(s): SC-RR-70-755  
Resource Type: Technical Report  
Resource Relation: UNCL. Orig. Receipt Date: 31-DEC-71  
Research Org: Sandia Labs., Albuquerque, N. Mex.  
Country of Publication: United States  
Language: English  
Format: Size: Pages: 61  
Subject: N33100\* --Physics (Solid State); NO KEYWORDS  
Related Subject: SEIGNETTOELECTRIC MATERIALS/polarization switching in polycrystalline, at very low fields and stresses  
Availability: Dep.; NTIS  
Update Date: 2008 Feb 14

**Full Text**

**Technical Reports**

Please see Document Availability for additional information on obtaining the full-text document. Library patrons may search WorldCat to identify libraries that may hold this item. Keep in mind that many technical reports are not cataloged in WorldCat.

**Cite**

Select a citation type above to copy/paste or download the reference.

### Référence 1

Le document en référence 1 ci-dessus est une étude de **Sandia** (Department of Energy – USA) intitulée «Polarization switch in polycrystalline ferroelectrics at very low fields and stresses».

Les matériaux piezoélectriques ne sont pas des matériaux parfaitement élastiques. Lorsque la force appliquée à l'élément est brusquement réduite, les structures cristallines pourraient toutes ne pas retourner à leur état initial.

Ainsi, lorsque la force produite par le choc n'est plus appliquée, les éléments de la structure polycristalline produisent toujours des charges. La résultante retourne à zéro à une vitesse déterminée par sa limite basse fréquence.

Ce phénomène est aléatoire et son signe également. C'est le constat que j'ai pu faire sur de très nombreux chocs, qui montraient des évolutions temporelles aléatoires lorsque l'on compare l'une par rapport à l'autre, toutes choses égales par ailleurs.

Les **offsets** de type 1 et 4 ont l'air anodins, et on pourrait être tenté de ne pas les corriger : cependant leur effet est loin d'être négligeable.

En effet, ils se traduiront dans le domaine de la vitesse, par des ajouts de 2 triangles, dont la dérivée par rapport au temps qu'est l'accélération conduit à un effet sur le SRC de l'accélération de façon étendue en fréquence et en amplitude.

Il est donc nécessaire, avant d'exploiter un choc, de **commencer par faire une analyse destinée à statuer sur la qualité des données**, puis à les corriger si nécessaire et possible, enfin de n'exploiter que des données validées, celles qui n'auraient pas été validées étant mises de côté.

Des critères, connus comme les critères de Piersol (Alan Piersol, senior expert aux USA, qui a laissé son nom attaché à beaucoup d'ouvrages de référence) constituent une aide pour statuer sur la qualité des mesures de choc.

Il vaut mieux dans tous les cas les appliquer une fois les offsets de type 1 à 4 corrigés ou réduits autant que possible.

**Critère de Piersol n°1 sur les Spectres de réponse aux chocs : ce critère indique que tout signal qui présente un écart entre le SRC composite (résiduel+primaire) positif d'une part et négatif d'autre part plus grand que 6 dB, même localement en fréquence, soit rejeté.**

En régime de réponse modale établie, le signal devrait avoir un caractère symétrique, et le critère s'applique alors très bien.

La question se pose en régime propagatif ; tout choc, qu'il soit produit par un coup de marteau ou une source pyrotechnique, génère un système **d'onde de compression** (laquelle se propage sans se déformer (sinon la largeur du front d'onde, voir plus loin), donc dite non dispersive, à la vitesse de Racine carrée de  $(E/\rho)$ ), **d'onde de cisaillement** (comme pour l'onde de compression en remplaçant le module d'élasticité longitudinale E par le module transversal G), **d'onde de flexion** (laquelle se déforme en se propageant car ses composantes voyagent à une vitesse k.racine carrée de f, (k fonction de la géométrie de la pièce traversée) et l'onde est dite dispersive).

Ces **ondes de déformation** vont faire des aller-retours dans les éléments géométriques rencontrés. Le temps d'un aller-retour et son inverse la fréquence va apparaître comme composante fréquentielle dans la réponse modale qui va s'établir progressivement. Il faut plusieurs aller retours pour que cette réponse s'établisse.

Plus la largeur du front d'onde est étroite, et plus les faibles distances d'aller retours seront favorisés, donc les hautes fréquences. Ce qui explique qu'un simple coup de marteau ne va pas faire ressortir les mêmes fréquences qu'une source pyrotechnique. Pourtant, il s'agit bien de la même structure.

**Sur la figure 5, sont présentés :**

- Un tableau à gauche en haut donnant les emplacements de jauges de déformation par rapport à une ligne de découpe pyrotechnique (un tube expansible chargé à 1g/m) : on constate que la jauge la plus proche se situe à 21 cm de la ligne de découpe (pas de maîtrise de la mesure de déformation avec des jauges pour des distances plus courtes)

- Le tableau au milieu en haut montre l'évolution de la déformation en micro déformation en fonction de l'abscisse; à 21 cm, nous avons 400  $\mu\text{m/m}$ , pour une limite élastique de l'aluminium autour de 2500  $\mu\text{m/m}$ . L'extrapolation intuitive vers des abscisses plus faibles se rapprochant de la source laisse prévoir des valeurs très élevées dépassant la limite élastique : on observe effectivement des déformations plastiques de la structure après le tir.

- Le graphe à droite en haut montre la transformée de Fourier des signaux de jauge, non négligeable jusqu'à 100 KHz et le filtre anti repliement intervenant ensuite.

- Le graphe inférieur de la figure 10 montre l'évolution de la forme du front d'onde de compression en fonction de l'abscisse : on constate que ce front d'onde devient de plus en plus étroit lorsque l'on se rapproche de la source. Ce qui explique que plus on s'éloigne de la source et moins les hautes fréquences sont présentes; ce phénomène d'élargissement progressif du front d'onde est particulièrement sensible pour un choc pyrotechnique on l'on passe de 1 MHz et plus à quelques cm de la source à moins de 10 kHz à 1 m de la source (hormis les cas particuliers dont il faut toujours se méfier en chocs pyrotechniques : focalisation, transformation d'une onde de compression en onde de flexion lors d'un renfort, épaulement, bride, changement de forme...).

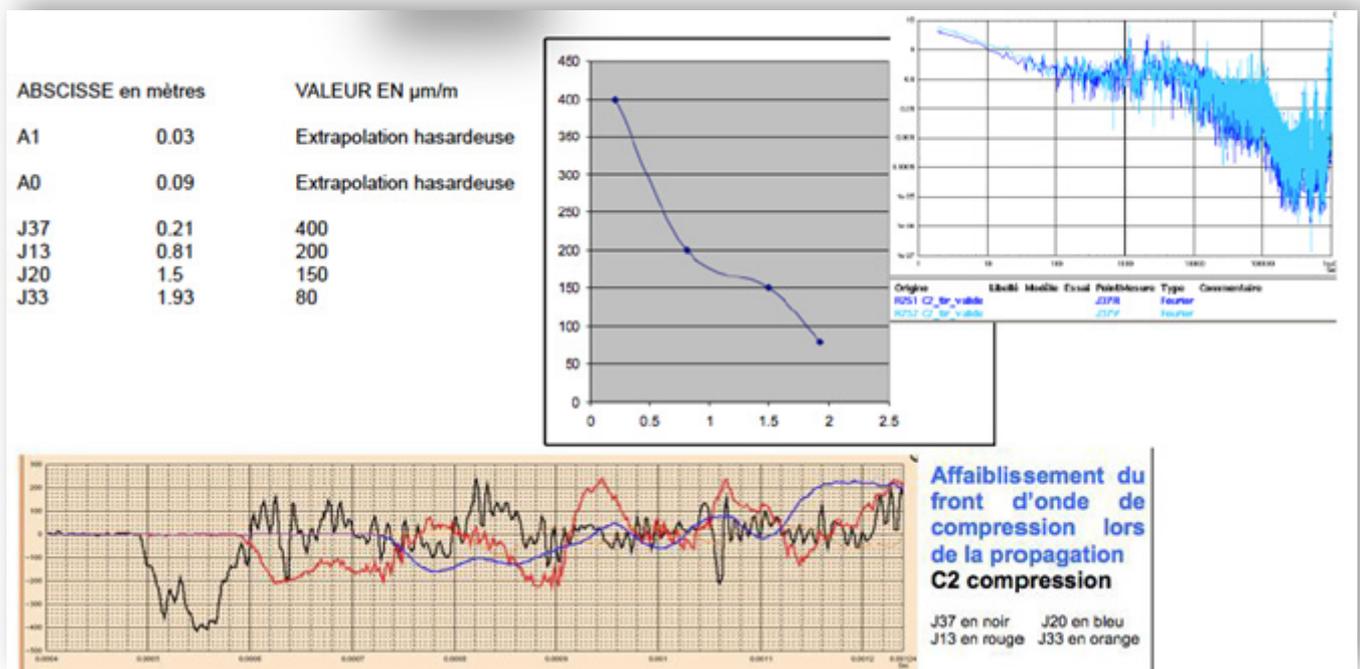


Figure 5

En conclusion de cette digression sur le régime de propagation des ondes, **plus on se rapproche des sources et plus le risque de dissymétrie existe**. Nous n'avons pas actuellement les connaissances suffisantes sur les niveaux de dissymétries admissibles.

Les modèles éléments finis indiquent des dissymétries allant jusqu'à 6 dB, mais ils sont basés sur des macro modèles de source non validés.

**Il est donc nécessaire d'utiliser ce critère avec le recul nécessaire.**

A titre de curiosité, la **figure 6** représente un front d'onde de compression d'amplitude de déplacement inférieure à 1 µm et se déplaçant à 5300m/s, capté à l'aide d'une holographie double référence.

La pente du front d'onde devrait être une composition de la vitesse de propagation (5300 m/s) et de l'onde de détonation (qui est une onde de choc à environ 7000m/s).

L'incurvation que l'on observe avec une pente qui diminue et finit par s'inverser est produite par les dimensions finies de la plaque sur laquelle les mesures ont été réalisées (phénomène de diffraction de l'onde).

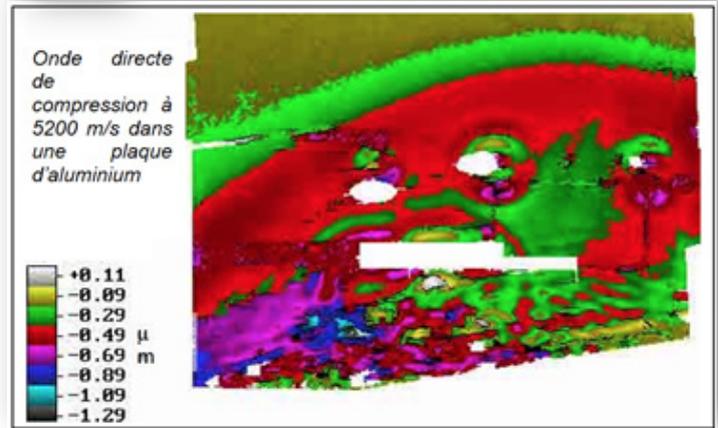


Figure 6

**Critère de Piersol n°2 sur la vitesse : pour un choc à changement de vitesse nul (ce qui est le cas le plus fréquent), ce critère indique que la valeur moyenne de la vitesse ne doit pas excéder les valeurs extrêmes enregistrées lors de la phase de choc proprement dite.**

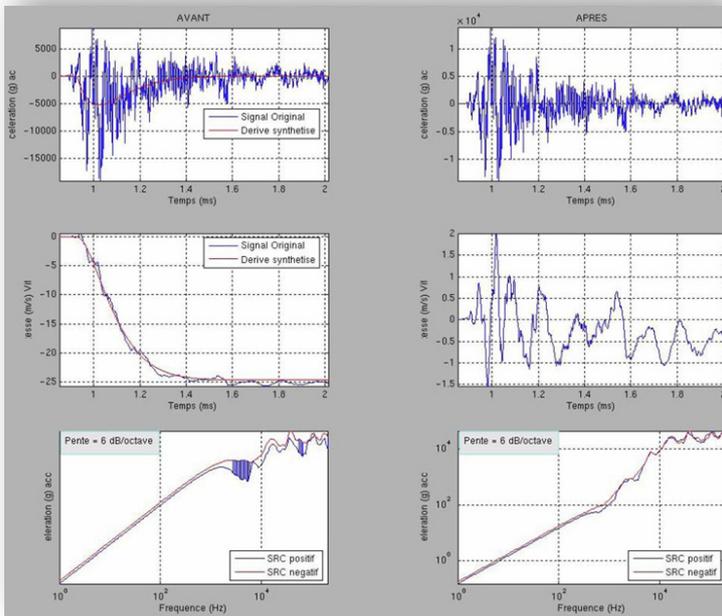


Figure 7

Examinons à titre d'exemple les figures disponibles. Les figures 2 et 4 ne passent évidemment pas le critère. Quant à la **figure 7**, on peut la décomposer en 6 graphes :

- **Graphes a et b** (ligne 1)  
*graphe a* : signal accélérométrique original en bleu  
*graphe b* : corrigé après soustraction de la dérive

- **Graphes c et d** (ligne 2)  
*graphe c* : vitesse du signal a  
*graphe d* : vitesse du signal corrigé b

- **Graphes e et f** (ligne 3)  
*graphe e* : critère de piersol n°1 sur le signal a , avec hachures sur les bandes de fréquence ne respectant pas le critère  
*graphe f* : critère de piersol n°1 sur le signal corrigé b , qui passe le critère

La correction réalisée ici a consisté à réaliser une décomposition en composantes de Prony et à reconstituer le signal après élimination de la composante non physique (qui apparait en rouge sur le graphe a ci-dessus).

Cette correction a été réalisée à l'aide d'une application réalisée sous Matlab\*.

\* Téléchargement du .m possible en envoyant une demande à [henri@grzeskowiak.fr](mailto:henri@grzeskowiak.fr) qui vous communiquera le lien ; fourni pour investigation sans garantie de bon fonctionnement, la société RMS distribue un produit commercial SignalLAB permettant de réaliser une telle correction.

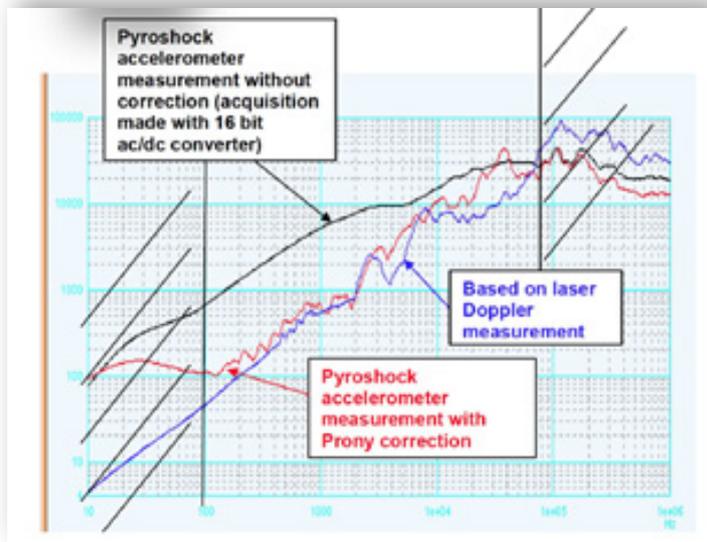
L'appli développée restitue deux graphes : pour les différentes composantes de PRONY, un graphe des amortissements en fonction de la fréquence et un graphe des amplitudes en fonction de la fréquence.

La composante non physique apparaît de façon très nette car elle correspond à un amortissement très élevé (plusieurs dizaines de %).

Un autre exemple de correction effectué est représenté sur la **figure 9**.

On y voit, **pour un même choc** :

- Le SRC du signal laser (en bleu) : la référence
- Le SRC d'une mesure avec capteur classique de type piezorésistif MEMS présentant un offset de type 3 non corrigé
- Le SRC du signal avec capteur classique avec offset de type 3 retiré par la décomposition-recomposition de PRONY



**Figure 9**

Au passage, il faut attirer l'attention sur une limite en basse fréquence des SRC, qui n'est pas très connue.

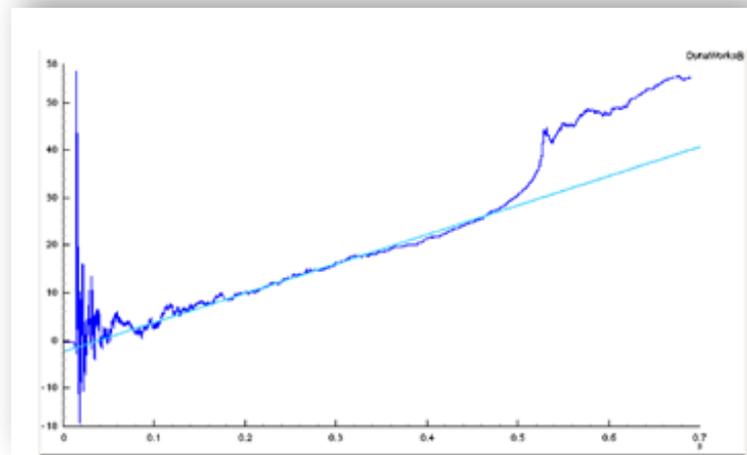
En effet, prenons une étendue de mesure de 200 000 g et une dynamique de 11 bits + signe ; le pas de quantification est de  $200000/211 = 97.6$  (et  $200000/216 = 3$  pour un convertisseur 16 bits).

Or pour être restituée avec une **précision acceptable**, l'amplitude de la composante temporelle doit correspondre à **au moins 3 pas de quantification**, soit 300 g.

Par ailleurs, le SRC d'un choc atteint habituellement une valeur maximale de 3 fois la valeur maximale du temporel, donc les 300 g impliquent un SRC de 1000 g.

Cela veut donc dire que dans ces conditions, le SRC restitué sous la barre horizontale des 1000 g n'aura pas une précision acceptable.

D'où la barre tirée à 1000g et les hachures dans la zone interdite.

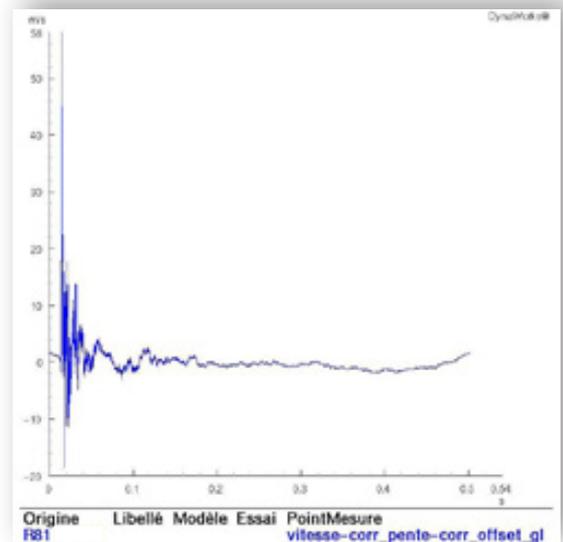


**Figure 8**

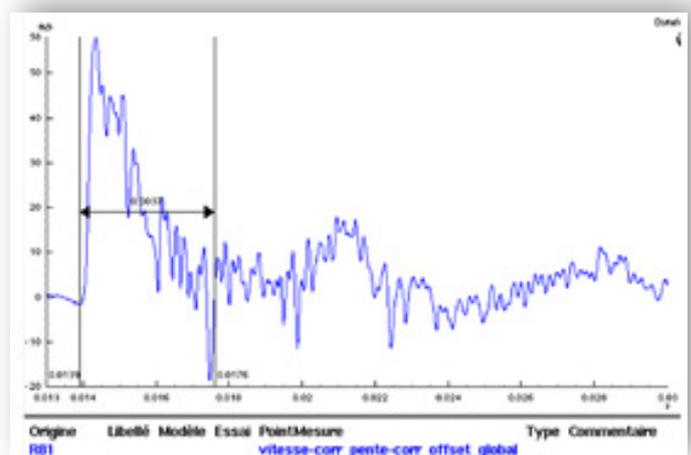
Cela dit, il y a des cas où des corrections bien plus immédiates à mettre en œuvre donnent de bons résultats.

La **figure 8** montre un exemple de choc réel, censé représenter un phénomène à changement de vitesse nul. Il apparaît que la correction peut être simplement réalisée en soustrayant au signal la droite de pente constante représentée sur cette figure.

Le résultat apparaît sur les **figures 10** et **11** (dilatation de 13).



**Figure 10**



**Figure 11**

La correction par élimination de la composante (des composantes) non physique(s) est sans équivalent dans la mesure où elle permet de **retirer le contenu non physique** (selon le jugement de l'expert qui réalise cette correction).

La plupart des autres corrections connues : filtrage passe haut, filtrage basé sur les ondelettes , ont pour inconvénient d'éliminer tout le contenu basse fréquence du signal, or **c'est précisément ce que l'on souhaite préserver**.

Une fois les offsets de type 1 à 4 corrigés ou réduits autant que possible, on pourra calculer les Spectres de Réponse aux Chocs .

La **figure 12** représente ce que devraient être les SRC en basses fréquences. La figure 5 représente les SRC :  
- d'une part en accélération absolue en **rouge** sur la figure

- d'autre part en pseudo accélération en **bleu** (quelquefois indicé SRCd , car il s'obtient par le carré de la pulsation fois le déplacement relatif).

L'habitude en Europe est plutôt d'utiliser le SRCd alors qu'aux USA c'est plutôt le SRC (de l'accélération absolue).

Dans tous les cas , il est donc conseillé de préciser quel est le type de SRC qui est mis en œuvre ainsi que le facteur d'amplification dynamique correspondant.

Donc, pour un choc à  $\Delta V$  et  $\Delta D$  nuls, la pente en BF, en coordonnées log-log, devrait être :

- pour un **SRC** : de 6dB/oct puis de 12 dB/oct
- pour un **SRCd** : de 12dB/oct

Bien entendu, ces pentes seront modulées par la présence de modes structuraux agissant dynamiquement en regard.

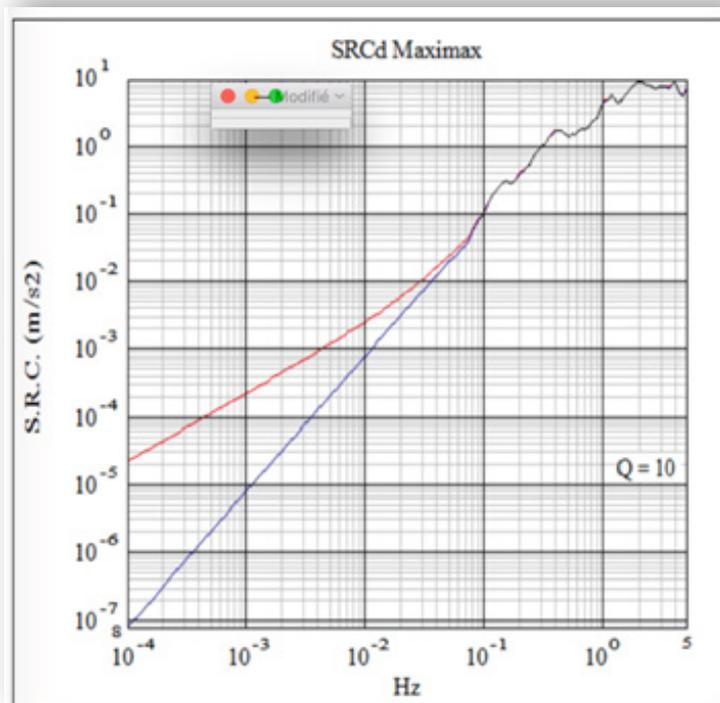


Figure 12

### Critère de Piersol n°3 sur le rapport SRC Signal/Bruit :

- on enregistre avant le choc le signal qui précède (bruit de fond) sur une durée égale à celle retenue pour le choc
- le SRC du signal devra excéder le SRC du bruit de fond d'au moins 6 dB.

Ce critère se comprend très bien et ne nécessite pas d'explications supplémentaires.

Bien entendu, les industriels développant les capteurs ne sont pas en reste quant aux efforts pour réduire la sensibilité à ces phénomènes.

A titre d'exemple, la **figure 13** représente les SRC d'un même choc mais restitués avec différents moyens de mesure :

- En **rouge** : une mesure avec vibromètre laser POLYTEC
- En **bleu** : une mesure avec PCB MEMS 60 kg
- En **vert** : mesure avec le capteur de référence de la concurrence

On peut constater que la sensibilité à l'offset de type 3, qui explique l'écart en basses fréquences par rapport au laser qui est la référence, est nettement moindre pour le PCB Piezotronics de type MEMS 60 kg qu'elle ne l'est pour le capteur de la concurrence.

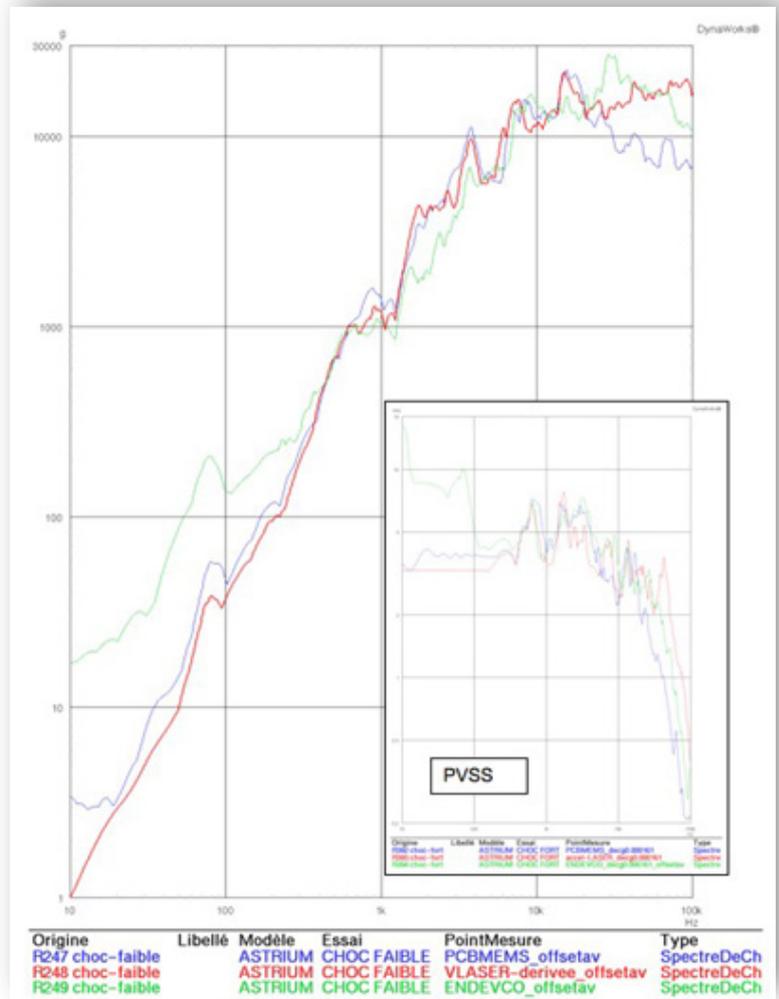


Figure 13

### Conclusion

Les capteurs de choc piézo-électriques et piézo-résistifs présentent des **phénomènes de dérives de signal**, qui peuvent impacter certaines exploitations des signaux acquis avec ces capteurs ; par exemple les basses fréquences du Spectre de Réponse aux Chocs ou les vitesses déduites des mesures d'accélération .

Il faut donc **rester vigilant** pour les détecter : les critères de Piersol sont une aide dans cette phase de détection, et mettre en œuvre des actions de mitigation.

Cet article donne quelques pistes pour cela .

A PROPOS DE  
PCB PIEZOTRONICS

PCB Piezotronics est fournisseur d'équipements de moyens d'essais pour les essais mécaniques, les essais acoustiques et le monitoring industriel. Nous y associons nos services et nos connaissances applicatives pour contribuer à l'amélioration technique et économique de la performance de nos clients dans la réalisation de leurs essais.

S'appuyant au quotidien sur trois piliers fondateurs : Qualités produits, Compétences Applicatives et Services Clients, PCB Piezotronics propose une offre adaptée aux secteurs de l'industrie, énergie, automobile, R&D, aéronautique, aérospatial et militaire.

[www.pcbpiezotronics.fr](http://www.pcbpiezotronics.fr)

Contact : Valérie HELLEQUIN  
01 69 33 19 65  
[vhellequin@pcbpiezotronics.fr](mailto:vhellequin@pcbpiezotronics.fr)