

Missiles : influences des dérives dans les mesures de chocs mécaniques

Lors des essais en environnement réel, il apparaît souvent une dérive basse fréquence dans les mesures de chocs mécaniques. Celle-ci influe sur les SRC donc sur les spécifications du matériel vis-à-vis des chocs.

Après une étude sur l'étendue de cette influence, nous expliciterons des méthodes permettant la détection et l'élimination des dérives.

1. Introduction

La qualification d'un missile par rapport à son environnement, s'intégrant dans un processus de personnalisation, nécessite de prendre en compte les chocs induits lors de l'allumage des différents propulseurs et éléments pyrotechniques. Ces chocs constituent les derniers environnements mécaniques rencontrés par le missile dans son thème d'emploi.

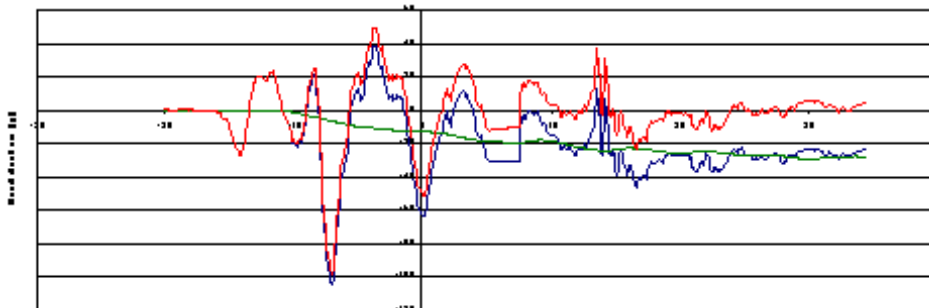


FIGURE 1 : Le signal mesuré (bleu) est corrigé (rouge) par élimination de la dérive (vert)

Dans le cadre du développement d'un missile de protection de zone, la question de la représentativité des chocs réalisés au sol sur équipements seuls s'est posée. La démarche de personnalisation avait abouti dans les années 1990 à spécifier des chocs demi - sinus. Ces chocs ont été définis à partir de l'expérience acquise sur les autres missiles développés et les premières mesures sur des maquettes « départ ». Les mesures accélérométriques, réalisées lors des tirs en vol du missile se sont révélés en dépassement par rapport aux chocs demi-sinus définis préalablement.

Par conséquent pour être plus représentatif de l'environnement réel il a été retenu de spécifier ces chocs en Spectres de Réponse au Chocs (SRC).



Le Spectre de Réponse aux Chocs

Ce spectre permet de visualiser l'accélération, donc la contrainte maximale que subit un système lors d'un choc, fonction de la fréquence.

L'intérêt de ce concept réside dans le fait qu'il permet de s'affranchir des caractéristiques propres aux matériaux subissant le choc, étant donné le fait que les calculs sont effectués sur un système théorique étalon. Le SRC permet donc de comparer des chocs entre eux, puisqu'il se base sur une référence commune.

Il faut s'assurer avant de comparer des SRC qu'ils ont été calculés suivant les mêmes algorithmes, sinon la comparaison n'a peut-être pas de sens !

Pour de plus amples informations sur les SRC, consulter la référence [LAL 99].

Les dérives et leur origine

Comme il est illustré sur la FIGURE 1, une dérive basse fréquence est une composante (ici en vert) qui vient dévier le signal de choc (ici en bleu) en le décentrant par rapport à l'axe des abscisses, alors qu'un signal de choc que nous appellerons désormais « propre » doit rester centré (ici en rouge) sur l'axe des abscisses.

Cette dérive est due à deux causes distinctes:

- **Des erreurs de mesure.** Celles-ci proviennent des défauts sur les capteurs. Ces défauts sont soit dus dès le départ à un mauvais dimensionnement (méconnaissance de l'environnement réel), soit dus à des dommages intervenant lors du tir (chaleur excessive pour les capteurs proches des zones pyrotechniques, « fatigue » du capteur après avoir subi plusieurs chocs). Il est important de travailler sur la correction de ce type de problème en amont des essais.
- **Des phénomènes physiques.** Ces dérives sont parfois bien réelles comme dans le cas d'un catapultage (accélération continue imprimée par la catapulte à l'avion porteur du missile) ou lors de la séparation d'étages de missile en vol.

Matei MANCAS

Gilbert LE FLOC'H

Dans le premier cas il est important d'éliminer la dérive car elle produit une erreur sur le signal donc sur les spécifications qui en sont issues.

Dans le deuxième cas, il peut être intéressant de séparer la dérive basse fréquence du signal de choc afin de qualifier le matériel séparément pour ces deux composantes lors des essais au sol (pot vibrant pour les chocs et centrifugeuse pour les accélérations pseudo-continues).

2. Influence de la dérive sur les SRC

La dérive introduit une amplitude supplémentaire aux basses fréquences. Comme le SRC est concerné par le maximum de la valeur absolue des amplitudes, cela se traduira par des valeurs d'accélération plus importantes, dans les SRC, aux basses fréquences.

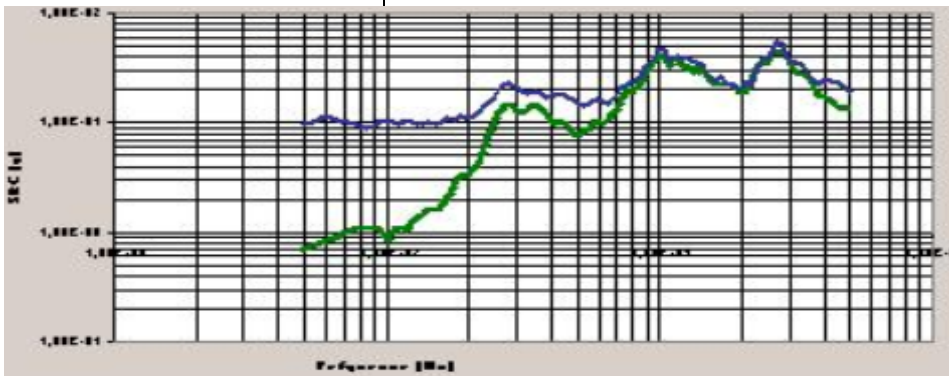


FIGURE 2 : La divergence aux basses fréquences entre un SRC d'un choc normal (vert) et un SRC d'un choc contenant une dérive (bleu)

Ces effets sont visibles sur la FIGURE 2 où le spectre d'un choc « propre » est représenté en vert et celui d'un choc possédant une dérive en bleu. Nous constatons donc l'existence de sur-spécifications systématiques aux basses fréquences.

Les références [LAL 99] et [SMA 99] contiennent plus d'exemples concernant cette influence.

La divergence des SRC

Toute tentative visant à définir un critère global de validité en fréquence d'un SRC à partir de la forme de la dérive (forme modélisée par une amplitude et une fréquence), s'est soldée par un échec. Chaque choc est particulier et possède sa distribution d'amplitudes qui lui est propre ! La recombinaison de cette empreinte en amplitude du choc et de la dérive donne un résultat imprédictible dans la pratique.

Par contre, nous avons mené une étude portant sur le contenu fréquentiel de la dérive qui nous a amené à penser que celle-ci est « vue » comme un mélange de chocs simples (choc rectangle, trapèze, demi-sinus....). Cela est d'ailleurs illustré par l'apparition d'un ou plusieurs lobes caractéristiques de ces chocs qui créent une dissymétrie aux basses fréquences entre les lobes positifs et négatifs [GAM 13].

La divergence intervient donc dès que le spectre de la dérive commence à prendre le pas sur le spectre du choc propre, les lobes de dissymétrie aux basses fréquences annoncent donc la divergence.

L'influence non négligeable de la dérive aux hautes fréquences

Lors des différents tests que nous avons effectués sur les SRC, nous avons constaté que la suppression des dérives basses fréquences entraînait certes, des gros écarts entre les SRC initiaux et corrigés aux basses fréquences, mais pas seulement. Les écarts aux fréquences moyennes et hautes sont moindres et en plus ils sont masqués par les repères logarithmiques dans lesquels les SRC sont habituellement représentés.

La modification de l'amplitude aux basses fréquences induit un effet global sur toutes les fréquences supérieures. En effet, les basses fréquences représentent dans un signal le squelette ou le « support » sur lequel seront « placées » ensuite les plus hautes fréquences. Il va de soi que la modification de l'amplitude de cette structure de base va déformer le reste du signal. Il est toujours délicat de toucher à la basse fréquence sachant que la plupart du temps elle détient la majeure partie de l'information du signal.

La dérive basse fréquence sur un signal de choc a donc des conséquences sur l'ensemble du contenu fréquentiel. Cela est vérifiable en utilisant des ondelettes discrètes orthogonales. Cette technique permet de décomposer un signal sur plusieurs bandes de fréquence. La modification de la seule composante basse fréquence mène, lors de la synthèse, à une fluctuation du rapport des FFT autour de 1 sur toute la plage de fréquences, alors qu'on n'a pas touché aux composantes hautes fréquence du signal!

En conclusion, on peut dire que les signaux contenant des dérives basse fréquence dues à des erreurs d'acquisition doivent être traités à chaque fois non seulement pour éviter les sur-spécifications en basse fréquence mais aussi pour éviter les problèmes haute fréquence. De plus on ne peut pas a priori savoir si aux hautes fréquences, nous avons une sur-spécification ou bien une sous-spécification. En effet, au niveau des hautes fréquences, on ne peut pas prévoir comment se fera la recombinaison des amplitudes, le maximum d'amplitude pour chaque fréquence qui est pris en compte pour le calcul du SRC peut donc fluctuer très facilement. Sur certains exemples nous avons même remarqué des sous-spécifications suivies de sur-spécifications ou bien inversement. Sur les exemples étudiés, ces fluctuations ne dépassent pas 10% (ce qui est déjà conséquent), par contre on peut envisager pour d'autres signaux dont l'amplitude de la dérive est importante des taux d'erreurs supérieurs !

3. Détection et élimination de la dérive basse fréquence

Détection de la dérive

Pour détecter la dérive basse fréquence, plusieurs méthodes sont envisageables.

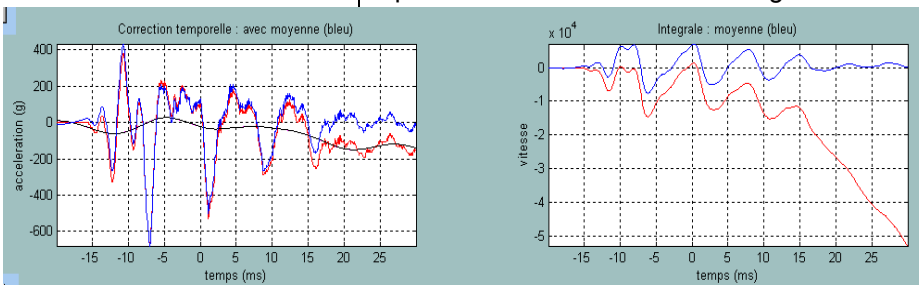


FIGURE 3 : GAUCHE – signal contenant une dérive (rouge), signal corrigé (bleu) et détection de la dérive (noir). **DROITE** – L'intégrale du signal possédant une dérive (rouge) et celle du signal propre (bleu).
Source : **MATCHOC**

Il y a d'abord les **méthodes utilisant des statistiques glissantes** (valeur RMS qui est un indicateur d'énergie différent selon que le signal est centré ou non, le skewness qui est un indicateur de symétrie du signal, une moyenne collant plus ou moins à la dérive). Ces techniques manquent souvent de précision et de validité.

Il y a ensuite les **méthodes liées à la distribution fréquentielle**. En effet, sachant qu'un choc est un événement transitoire composé surtout de hautes fréquences, le spectre de Fourier en amplitude d'un choc propre est, par définition, faible aux basses fréquences et s'annule à l'origine où il est

égal à ΔV (l'aire algébrique sous la courbe des accélérations) [LAL 99].

Nous avons choisi d'utiliser une méthode quantifiant ΔV au cours du temps qui est tout simplement...**l'intégrale du signal temporel**. Celle-ci caractérise bien l'aire algébrique sous la courbe des accélérations au cours du temps.

La FIGURE 3 montre à gauche le signal temporel et, à droite, les intégrales correspondantes. L'intégrale du signal corrigé (bleu) est centrée sur l'axe des abscisses ce qui montre que ΔV est grossièrement nulle (car l'intégrale calculée entre le temps de début et de fin se compense, étant donnée la symétrie par rapport à l'axe des abscisses). Au contraire, l'intégrale du signal contenant une dérive (rouge) dévie très rapidement du même côté que la dérive atteignant rapidement des valeurs très importantes.

L'intégrale est un outil très efficace : celle-ci permet à la fois une détection très fine de la dérive grâce à sa propriété de sommation cumulative : ainsi, même une dérive invisible à l'œil nu est très bien détectée avec une intégrale. L'avantage d'avoir une intégrale fonction du temps plutôt que directement la valeur de ΔV est qu'elle permet d'avoir une quantification de la dérive donc de la correction. En effet, le moment à partir duquel l'intégrale commence à dévier coïncide avec le moment où l'influence de la dérive commence à se faire sentir sur le signal.

Élimination de la dérive

L'état de l'art de cette question nous a menés vers une méthode universellement utilisée : le filtrage. C'est évidemment la première méthode qui vient à l'esprit. Quand on veut éliminer une composante basse fréquence on essaye de filtrer le signal. Certaines personnes utilisent des filtres passe-haut, d'autres des passe-bas qu'elles soustraient du signal initial. Le problème consiste à déterminer la fréquence de coupure qui est choisie un peu au « cas par cas ». De plus les résultats des filtres de type RII (Butterworth, Chebycheff...) sont souvent mauvais, ils n'éliminent que partiellement la dérive basse fréquence tout en altérant les moyennes et hautes fréquences. Finalement une simple moyenne glissante semble donner de meilleurs résultats en détectant assez bien la dérive. Or une moyenne glissante est

finalement une convolution du signal par une fenêtre rectangulaire, donc un filtrage de type RIF. Nous avons obtenu des résultats améliorés en appliquant deux fois de suite une moyenne glissante au signal. Il était ainsi mieux lissé. Or, convoluer deux fois par une fenêtre rectangle, revient à convoluer une fois par une fenêtre triangle. Nous avons finalement retenu la moyenne glissante pour sa simplicité. Le seul paramètre à régler est la largeur de la fenêtre en nombre de points.

Nous avons aussi trouvé une méthode originale n'utilisant pas le filtrage : c'est la décomposition en Modes de Prony [GRI 99]. Nous n'en faisons pas état dans cet article du fait qu'elle est bien moins utilisée et étudiée que le filtrage.

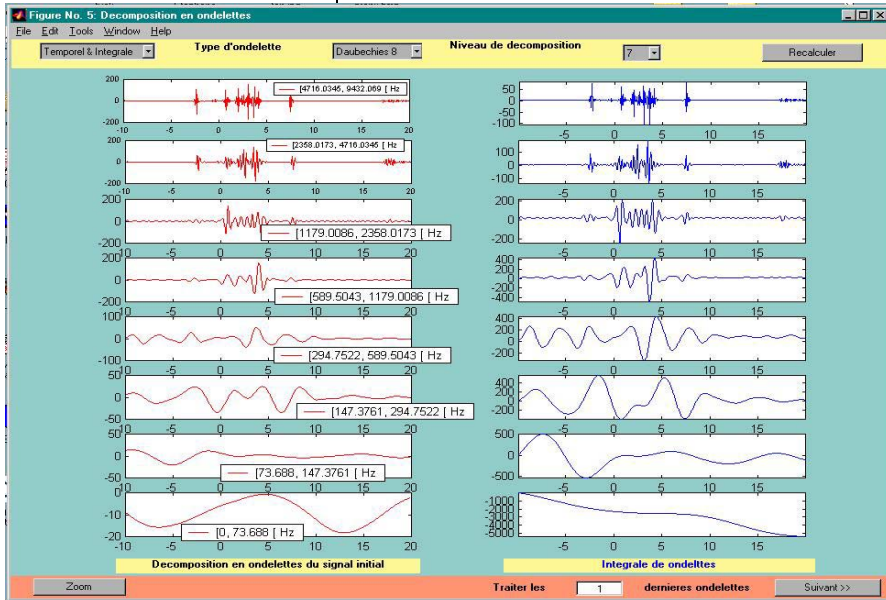


FIGURE 4 : Interface de décomposition en ondelettes du signal. La colonne de gauche recense les ondelettes composant le signal et celle de droite les intégrales correspondantes.

Source : MATCHOC

Toutes ces méthodes nous paraissent manquer surtout de critères de validité. En effet les filtres ne sont jamais parfaits et la décomposition en séries de Prony est incomplète... A-t-on éliminé de l'information utile lors du filtrage ou de la décomposition en séries de Prony? A quel marge près sommes-nous sûrs d'avoir éliminé la dérive ?

Couplage ondelettes / filtrage : efficacité et validité

L'idée d'utiliser les ondelettes est d'abord venue d'un souci de validation des résultats. En effet nous n'avions aucun moyen de quantifier au niveau fréquentiel les modifications effectuées sur le signal par la soustraction de la moyenne glissante.

Nous avons donc pensé à ce moment aux ondelettes orthogonales. D'un point de vue

pratique, elles sont synthétisées par des bancs de filtres passe-bas et passe-haut. Ceux-ci permettent d'obtenir un découpage fréquentiel régulier du signal selon le niveau de décomposition choisi. Pour plus de détails concernant les ondelettes orthogonales, se reporter aux références [FLA 00] et [QUI 00].

Nous sommes allés jusqu'à une décomposition de niveau sept. Celle-ci engendre huit signaux en incluant l'ondelette basse fréquence. Nous avons synthétisés sur la FIGURE 4, colonne de gauche (en rouge), ces huit ondelettes issues de la décomposition du signal initial. Nous y voyons de haut en bas les ondelettes allant de la plus haute fréquence (en haut) vers la plus basse (en bas). La somme point à point de ces ondelettes donne **exactement** le signal initial.

En quoi cette décomposition en ondelettes permet-elle d'augmenter la validité des résultats ? En fait, la dérive basse fréquence sera située, comme son nom l'indique, dans l'ondelette basse fréquence et dans cette ondelette seulement. Ce fait est confirmé par la colonne de droite de la FIGURE 4 où nous avons les intégrales correspondant au signal. Elle sont toutes centrées sur l'axe des abscisses sauf la dernière...qui correspond à l'ondelette basse fréquence.

En soustrayant à cette seule ondelette sa moyenne glissante sur une fenêtre judicieusement choisie, on élimine la dérive basse fréquence de cette dernière ondelette. Or nous n'avons pas touché aux autres ondelettes (plus hautes en fréquence) lors de cette opération. Ainsi, lors de la synthèse du signal, nous sommes sûrs que nous avons uniquement manipulé les basses fréquences du signal : il est certain donc que notre intervention (filtrage) n'a pas du tout affecté les moyennes et hautes fréquences. Nous pouvons même quantifier les plages de fréquence sur lesquelles les ondelettes sont valables. Ceci nous permet d'affirmer le fait qu'ayant modifié uniquement l'ondelette basse fréquence, nous avons seulement modifié dans le signal une certaine bande de fréquence allant de 0 Hz à la limite de validité en fréquence de l'ondelette. Cependant il faut savoir que les filtres utilisés pour la décomposition en ondelettes ne sont pas forcément très sélectifs ce qui fait que des spectres de deux ondelettes voisines peuvent se recouvrir partiellement.

REFERENCES

[LAL 99]

LALANNE C.
Chocs mécaniques
Edition Hermes 1999

[FLA 00]

FLANDRIN P.
Temps-Fréquence
Edition Hermes

[QUI 00]

QUINQUIS A., RADOI E.,
SERBANESCU A.
Le Traitement du Signal sous
Matlab.
Edition Hermes

[GRI 99]

GRIVELET P.
Compensation des
perturbations Basse
Fréquence
R&T CNES 1999

[GAM 13]

Norme française GAM EG 13
Annexe Traitement du Signal
D.G.A.

[SMA 99]

SMALLWOOD O.
The shock response spectrum
at low frequencies
Sandia National Laboratories

Il faut donc toujours ajouter une marge confortable à cette fréquence F qui marquera la limite entre la partie basse fréquence du signal que l'on a modifié en éliminant la dérive et la partie moyenne et haute fréquence qui demeure intacte.

Nous avons aussi constaté un deuxième effet très heureux : si le niveau de décomposition en ondelettes était suffisamment important (souvent un niveau 7 alors que le niveau maximum de décomposition est généralement 5), non seulement les résultats sont parfaitement corrects et la synthèse parfaite, mais l'ondelette basse fréquence semble épouser parfaitement la dérive. Ainsi, la moyenne glissante de cette dernière ondelette est souvent extrêmement proche de l'ondelette elle-même. L'intégrale du signal corrigé montre régulièrement que les meilleurs résultats d'élimination de la dérive sont obtenus lorsque la largeur de la fenêtre de la moyenne glissante est choisie de façon à ce que celle-ci épouse parfaitement l'ondelette, autrement dit l'ondelette basse fréquence est en réalité la dérive basse fréquence !!! Malheureusement ce fait n'est pas une généralité : même si sur la plupart des signaux étudiés, la soustraction de cette ondelette basse fréquence du signal élimine au mieux la dérive, il faut parfois traiter l'ondelette basse fréquence avec un filtrage ou une moyenne glissante pour améliorer le résultat.

La méthode mixte ondelettes/filtrage que nous avons mis au point possède donc deux avantages sur les méthodes de filtrage simple :

- Une possibilité de **validation** des résultats connaissant la bande de fréquence que l'on modifie dans le signal initial.
- De **meilleurs résultats**, permettant parfois de ne pas utiliser des ondelettes sans filtrage mais donnant toujours de meilleurs résultats que le filtrage seul.

MATCHOC

MATCHOC est un outil complet que nous avons conçu sous Matlab permettant l'acquisition et le traitement des erreurs de mesure les plus fréquentes. La méthode alliant ondelettes et moyenne glissante donne des résultats très satisfaisants.

MATCHOC est un outil préliminaire mis au point pour tester les méthodes théoriques proposées plus haut. Il s'agit d'un outil

interne non-commercialisé. En effet, il est nécessaire de mener une phase de tests et validation des algorithmes et résultats scientifiques selon les critères de qualité.

De plus, il nécessiterait une meilleure intégration par rapport aux autres systèmes et logiciels notamment pour l'import ou l'export de données.

4. Conclusion

Pour conclure, nous pouvons d'abord retenir que :

- C'est le spectre de la dérive qui prend le pas sur le spectre du choc aux basses fréquences. Ce spectre est identifiable par des lobes car assimilable à un choc simple.
- L'influence des dérives aux hautes fréquences peut, selon la dérive et le signal de choc, approcher des écarts de 20%... De plus il est impossible de prédire si ces écarts mèneront à des sur ou sous spécifications.
- L'intégrale temporelle du signal est le meilleur indicateur de présence d'une dérive.
- La mise au point d'une méthode mixte ondelettes/filtrage permettant de mieux éliminer la dérive et aussi d'avoir une meilleure validation.
- L'outil MATCHOC donne des résultats encourageants mais il faut encore le perfectionner et le valider avant une utilisation plus étendue.

Enfin, il faut insister sur le fait que lorsqu'il faut traiter des erreurs sur les mesures, il est déjà trop tard. Ces traitements servent surtout à séparer les composantes basses fréquences lorsqu'elles sont dues à des phénomènes physiques afin de valider les contraintes sur des moyens spécifiques (pots vibrants ou centrifugeuses). Ils servent aussi à « limiter les dégâts » lorsque les mesures d'un tir sont très perturbées. Dans ce sens, il nous faut insister lourdement sur le travail qui doit être effectué en amont pour éviter les défauts et les dommages subis par les capteurs.