HAL open science

Détection de chocs en tête de suspente d'un siège de télésiège par la méthode de Prony temps-fréquence

Nadine Martin

To cite this version:

Nadine Martin. Détection de chocs en tête de suspente d'un siège de télésiège par la méthode de Prony temps-fréquence. Journées section électrotechnique du Club EEA, Mar 2005, Lyon, France. hal-00380882

HAL Id: hal-00380882

https://hal.science/hal-00380882v1

Submitted on 4 May 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Journées EEA 17-18 mars 2005, Lyon

Titre :

Diagnostic et signal - Détection de chocs en tête de suspente d'un siège de télésiège par la méthode de Prony temps-fréquence

Titre court :

Chocs et remontées mécaniques

Auteur :
Nadine MARTIN
Directeur de recherche CNRS, Responsable du groupe GOTA
LIS, Laboratoire des Images et des Signaux
961, rue de la Houille Blanche, Domaine Universitaire
BP 46 – 38402 Saint Martin d'Hères – France
Tél. 33 (0)4 76 82 62 69 - Fax 33 (0)4 76 82 63 84
nadine.martin@lis.inpg.fr, *www.lis.inpg.fr*

Résumé :

Nous nous intéressons au cas particulier d'un système mécanique : le passage d'un télésiège sous un pylône compression. La pince qui relie le véhicule au câble doit s'insérer entre le câble et les galets du balancier. Le passage de chaque angle de la pince sous un galet génère un choc qui excite le balancier du pylône. La réponse du système est ainsi une succession de chocs très rapprochés. La modélisation de la réponse observée est l'objectif de ce travail étant donné que des chocs répétés sont gênants et préjudiciables pour le confort des passagers ainsi que pour la durée de vie du véhicule et du pylône. Une transformée de Fourier à court terme, méthode d'analyse adaptée aux signaux non stationnaires, ne permet pas de les analyser. Il est proposé une nouvelle méthode, dite Prony temps-fréquence, qui s'appuie sur le modèle élémentaire d'un choc, soit une sinusoïde amortie. Cette méthode a la particularité d'être adaptée à des réponses brèves et rapprochées dans le temps. Des résultats sur un signal réel sont commentés. La méthode s'applique à d'autres types de signaux, telles que des signaux vibratoires mesurés sur un boîtier d'engrenages.

Mots-clefs :

Traitement du signal, signaux non-stationnaires, détection, transitoires, chocs, modélisation, analyse paramétrique, Prony, analyse temps-fréquence, signaux vibratoires, remontées mécaniques.

1. Introduction

Connaître un système physique nécessite la mise en place et la résolution des équations du système. C'est là l'approche du physicien théoricien.

La réponse d'un système physique (inclure un lien vers la figure 1) à une excitation est observée au moyen de mesures telles que des mesures électriques (courants, tensions), des mesures acoustiques ou des mesures vibratoires. C'est là l'approche du physicien expérimentateur.

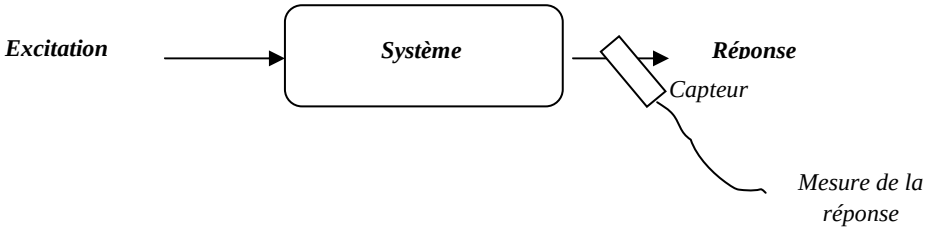

***Figure 1**. Un système physique.*

La réponse d'un système porte des informations sur le système et son excitation. Chercher à analyser le contenu des mesures au-delà de la simple observation : c'est là l'approche du traiteur de signal.

L'objectif de cette communication est de mettre en évidence l'apport du traitement du signal dans l'analyse et la compréhension d'un système physique. Nous nous intéresserons au cas particulier d'un système mécanique : le passage d'un télésiège sous un pylône compression. Les signaux vibratoires mesurés sur ce type de système sont étudiés au LIS au sein du groupe GOTA (inclure un lien vers *www.lis.inpg.fr*) depuis une dizaine d'années [11], [12], [13], [14], [1]. Ces recherches ont abouti à la proposition d'une nouvelle approche temps-fréquence en traitement du signal [2], [7], [8], [10].

Le présent article se découpe de la façon suivante :

- (inclure un lien vers le paragraphe 2) : description du système mécanique considéré et de la génération des chocs ;

- (inclure un lien vers le paragraphe 3) : description du modèle « multi-chocs » de la réponse du système suite au modèle d'excitation ;

- (inclure un lien vers le paragraphe 4) : limites d'une analyse de Fourier de la réponse, que la méthode d'analyse soit globale ou temps-fréquence (spectrogramme) ;

- (inclure un lien vers le paragraphe 5) : description de la méthode proposée, méthode de Prony temps-fréquence ;

- (inclure un lien vers le paragraphe 6) : résultats de la méthode appliquée sur un signal vibratoire réel ;

- (inclure un lien vers le paragraphe 7) ;

- (inclure un lien vers les références bibliographiques).

2. Remontée mécanique et chocs

Un véhicule, télésiège ou télécabine, est relié à un câble par l'intermédiaire d'une pince (inclure un lien vers la figure 2).

***Figure 2**. Détail d'une pince.*

Détail d'une pince (Pomagalski) et passage d'une cabine sous un pylône compression.

Le long de la ligne de transport, deux types de pylônes peuvent se rencontrer. Les pylônes support soutiennent le câble qui, par conséquent, passe au-dessus des galets du balancier. Ce passage est peu ressenti par les passagers. Par contre, les pylônes compression appuient sur le câble. Dans ce cas, la pince doit s'insérer entre le câble et les galets du balancier. A chaque angle de la pince, le vecteur vitesse du galet suit la forme de la pince. En conséquence, il y a variation de la quantité de mouvement et un choc est produit. La forme de la pince définit le nombre, l'amplitude et la phase des chocs. Prenons le cas d'une pince d'un télésiège débrayable d'Isola 2000 (inclure un lien vers la figure 3).

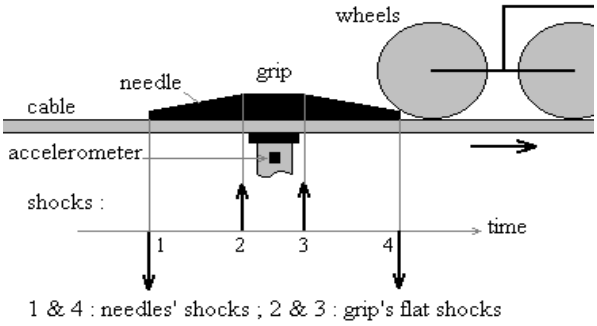

***Figure 3** : La pince s'insère sous un galet.*

La pince s'insère sous un galet et subit ici 4 chocs de l'interaction pince/galet, le nombre de choc étant lié à la forme de la pince.

La forme de la pince est telle qu'elle génère ici 4 chocs lors du passage sous un galet. Par projection sur l'axe vertical, le premier et le dernier choc sont dirigés vers le bas, les chocs 2 et 3 vers le haut.

Après le passage de la pince sous l'ensemble des galets du balancier, le système est excité par une suite de chocs élémentaires dont la répartition temporelle est liée à la géométrie de la pince, comme nous venons de le décrire, mais aussi du balancier, soit du nombre de galets et

de leur répartition géométrique, ainsi que de la vitesse du câble (inclure un lien vers la figure 4).

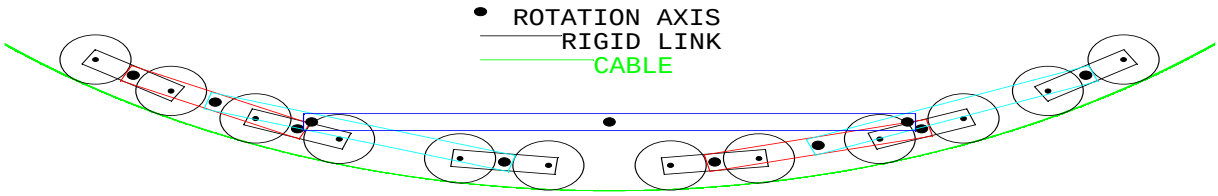

***Figure 4**. Un balancier de 12 galets.*

Distribution des galets sur un balancier de 12 galets dans un télésiège débrayable 4 places (Isola 2000).

Dans l'exemple considéré, le balancier est constitué de 12 galets, répartis 2 par 2. Pour une vitesse du câble de 4,16 m/s, le passage de la pince sous ces 12 galets génère 48 chocs sur la tête de suspente du véhicule en un peu moins de 2 s (inclure un lien vers la figure 5). Cette distribution de chocs est en fait un modèle de l'excitation du système.

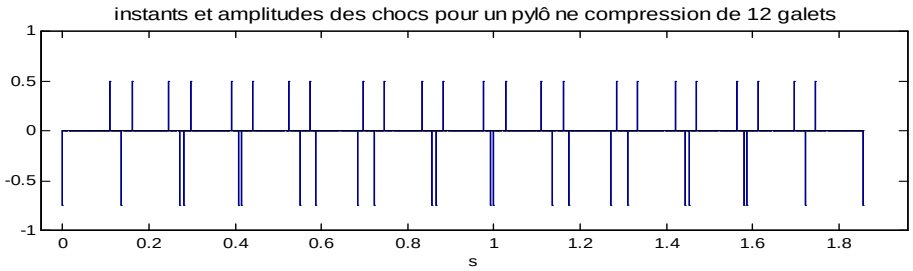

***Figure 5**. Modèle d'excitation du système.*

Succession des 48 chocs induits par le passage de la pince sous les 12 galets (inclure un lien vers la figure5) pour une vitesse du câble de 4,16 m/s.

Ces chocs survenant entre la pince du véhicule et les galets du balancier vont exciter les modes propres du système. Prenons un exemple simple. Si le système est mono-modal, c'est-à-dire ne possède qu'un seul mode propre, la réponse à un choc est une sinusoïde amortie (inclure un lien vers la figure 6).

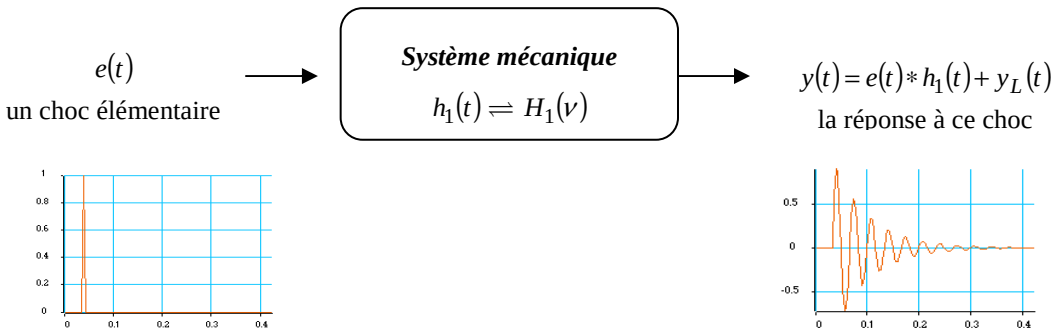

***Figure 6**. La réponse d'un système mécanique mono-modal.*

La réponse d'un système mécanique mono-modal de réponse impulsionnelle $h_1(t)$ à un choc élémentaire est la somme de la réponse forcée et de la réponse libre.

Lorsque l'excitation comporte plusieurs chocs successifs, la réponse finale est une succession de réponses à des chocs élémentaires, soit une succession de sinusoïdes amorties. Comme dans la plupart des cas le système est multi-modal, chaque choc va alors exciter simultanément plusieurs modes. Nous le verrons ultérieurement dans (inclure un lien vers le paragraphe 3).

Les pylônes compression sont imposés par des normes de sécurité qui stipulent qu'un véhicule ne doit pas dépasser une certaine hauteur par rapport au sol. Ils sont moins abondants que les pylônes support mais ils génèrent des chocs plus nombreux et plus forts. La répétition de ces chocs est gênante et préjudiciable pour le confort des passagers ainsi que pour la durée de vie du véhicule et du pylône. Ces conséquences pourraient être amoindries si une modélisation de la réponse était calculable. Nos travaux visent cet objectif.

3. Modèle « multi-chocs » de la réponse

Examinons le cas plus général d'un système mécanique linéaire et élastique à P degrés de libertés et à amortissement sous-critique. L'excitation du système telle que décrite dans (inclure un lien vers le paragraphe 2) est modélisée par une série périodique de chocs, soit M chocs espacés de manière irrégulière et éventuellement d'amplitudes différentes.

Supposons qu'un choc élémentaire puisse être modélisé par une fonction de Dirac. Sous cette condistion, l'excitation du système mécanique est représenté par un vecteur de dimension P, noté $\mathbf{e}_M(t)$, et qui s'écrit :

$$\mathbf{e}_M(t) = \sum_{m=1}^{M} \delta(t - t_m)\,\mathbf{e}_m$$

avec $\mathbf{e}_m$ le vecteur d'amplitude du $m^{ème}$ choc de dimension P, $\delta(t)$ la fonction de Dirac et t_m l'instant du $m^{ème}$ choc.

La réponse du système, notée $\mathbf{y}(t)$, somme des réponses libres et forcées, s'écrit comme une somme de sinusoïdes amorties et retardées. Les détails du calcul sont reportés dans [10] et [7] et montrent que la dérivée seconde, notée $\ddot{\mathbf{y}}(t)$, homogène à une accélération, l'unité de la mesure, s'écrit :

$$\ddot{\mathbf{y}}(t) = \sum_{m=1}^{M}\sum_{p=1}^{2P}\left[\left(\Omega_p^2 - \alpha_p^2\right)^2 + 4\alpha_p^2\Omega_p^2\right]^{1/2} e^{-\alpha_p(t-t_m)} e^{j\left(\Omega_p(t-t_m) + arctg\left(\frac{2\alpha_p\Omega_p}{\Omega_p^2-\alpha_p^2}\right)\right)}\, u(t-t_m)\,\mathbf{a}_{mp}$$

avec $\mathbf{a}_{mp}$ l'amplitude complexe pour chaque choc m et chaque mode propre p, Ω_p et α_p respectivement la pulsation et l'amortissement du mode propre p.

Ces paramètres caractérisent complètement le système et sont définis à partir des caractéristiques intrinsèques du système, les masses, amortissements et raideurs. Les amplitudes dépendent également des amplitudes des chocs et des conditions initiales.

Notre objectif vise à caractériser la totalité de la réponse, soit l'ensemble de ces paramètres, caractéristiques de l'ensemble des chocs. Il est à noter que, dans l'exemple considéré, les chocs sont très rapprochés, d'où une réelle difficulté pour l'analyse de la réponse.

4. Analyse de Fourier d'une réponse à des chocs

La réponse à ces chocs est expérimentalement mesurée par un accéléromètre fixé en tête de la suspente. Nous allons analyser tout particulièrement une mesure accélérométrique (inclure un lien vers la figure 7) réalisée à Isola 2000 dans le but d'extraire l'ensemble des paramètres du système.

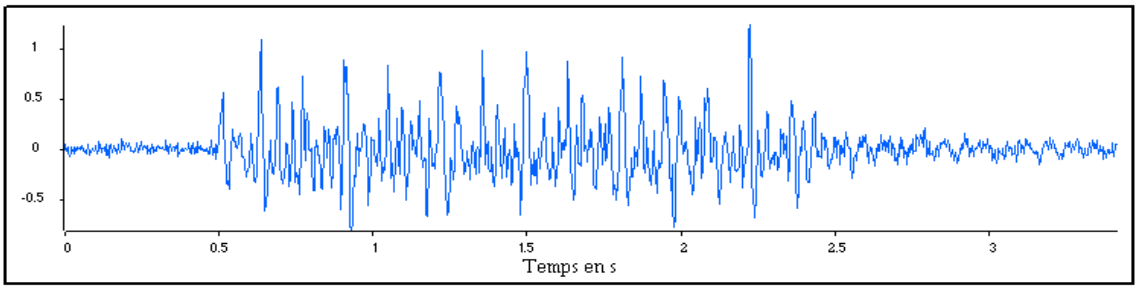

Figure 7. *Mesure accélérométrique.*

Signal accélérométrique mesuré en tête de suspente d'un télésiège débrayable 4 places d'ISOLA 2000 (durée 3,4 s - 1024 points - fréquence d'échantillonnage 300 Hz).

Il est difficile d'exploiter la mesure dans le domaine temporel. Les instants d'arrivée des 48 chocs, tels qu'annoncés dans (inclure un lien vers le paragraphe 2) sont difficilement repérables. Une analyse spectrale de ce signal par transformée de Fourier procure l'estimation de la répartition de l'énergie en fonction de la fréquence (inclure un lien vers la figure 8).

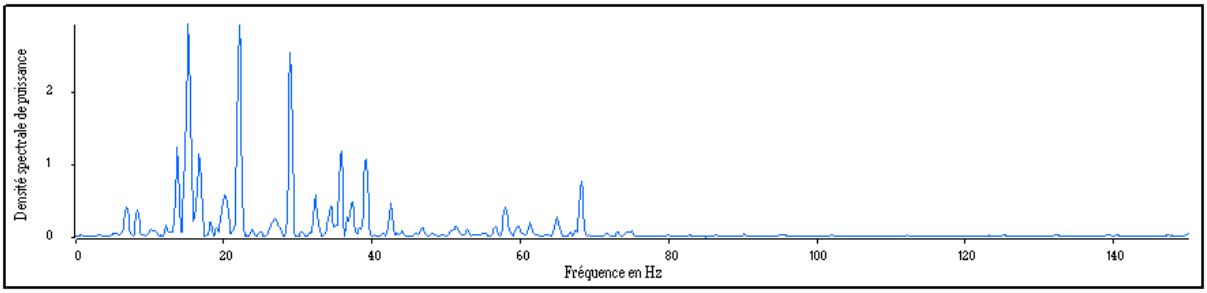

Figure 8. *Densité spectrale de puissance du signal accélérométrique.*

Densité spectrale de puissance du signal accélérométrique (inclure un lien vers la figure 7) calculée sur la durée totale du signal pondéré par une fenêtre de Blackman, résolution fréquentielle (bande à –3dB)de 0,49 Hz.

Néanmoins, toute référence temporelle est perdue. excepté en cas de périodicité régulière des chocs, il est encore plus laborieux d'extraire les 48 chocs.

En fait, l'analyse proposée doit tenir compte de la non-stationnarité du signal au cours du temps. Une transformée de Fourier à court terme, analyse de Fourier sur une fenêtre courte et glissante au cours du temps, est une méthode d'analyse adaptée à de tels signaux. Elle estime la répartition de l'énergie en fonction du temps et de la fréquence. Cette méthode appliquée sur le signal accélérométrique (inclure un lien vers la figure 7) fournit une représentation temps-fréquence ou spectrogramme (inclure un lien vers la figure 9).

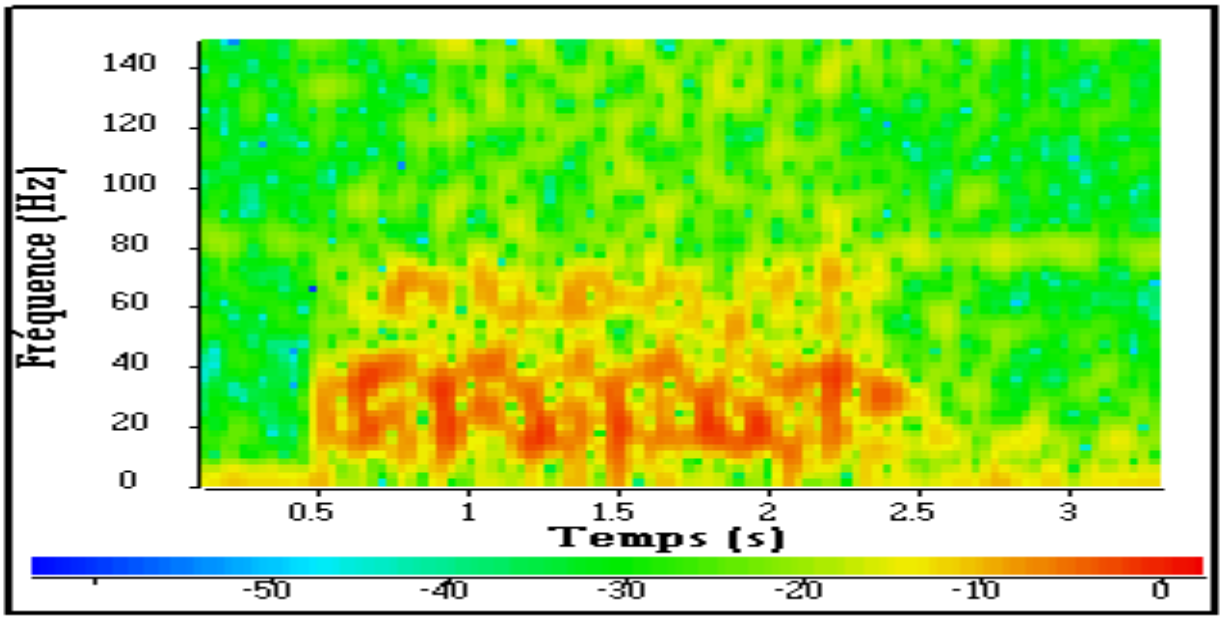

Figure 9. *Spectrogramme du signal accélérométrique.*

Spectrogramme du signal accélérométrique (inclure un lien vers la figure 7), chaque segment temporel de 0,21 s (64 points), est pondéré par une fenêtre de Blackman, résolution fréquentielle (bande à –3dB) de 7,8 Hz, la couleur code l'énergie.

Cette représentation ne permet toujours pas de détecter les différents chocs du signal. Quelle en est la raison ? Pour que la séparation soit possible, la fenêtre d'analyse doit être de durée inférieure ou égale à l'intervalle entre deux chocs. Cette durée minimale fixe la résolution fréquentielle maximale de cette analyse.

Dans l'exemple étudié, pour une vitesse du câble de 4,16 m/s, la géométrie de l'ensemble implique des chocs très proches autour de l'instant 1s (inclure un lien vers la figure 5) : le choc de sortie de la pince sous le 6ème galet est immédiatement suivi, à 7 ms près (2 points à 300 Hz), du choc d'entrée de la pince sous le 8ème galet. Les écarts-moyens entre chocs sont de l'ordre de 15 ms, soit 5 points. Vu ces ordres de grandeurs, un spectrogramme calculé sur des fenêtres de 64 points, soit 213 ms, ne pourra pas isoler chaque choc. Des fenêtres de taille inférieure (16 points, 53 ms) n'auront pas une résolution acceptable (bande à –3dB de 17 Hz pour une fenêtre rectangulaire).

Ainsi, les limites d'une approche non stationnaire basée sur la transformée de Fourier sont vite atteintes et cette approche ne permettra pas de séparer des réponses à des chocs rapprochés, en particulier les 48 réponses aux chocs du signal réel étudié.

Par conséquent, un détecteur de non stationnarités appliqué dans ce plan temps-fréquence [9] ne conduira pas à une détection des instants d'arrivée des chocs contenus dans cette mesure.

5. Analyse de Prony temps-fréquence

Afin d'accéder à l'excitation, au moins deux approches sont envisageables. La première consiste à déconvoluer le signal de sortie connu afin d'estimer l'excitation à l'entrée. Il existe des techniques, dites de déconvolution aveugle, qui résolvent ce problème sans la connaissance *a priori* de la fonction de transfert du filtre. Le lecteur consultera [5] pour une application de cette technique aux signaux de remontées mécaniques décrits dans cet article ainsi qu'une application à des signaux d'engrenages. Cette façon de procéder impose des hypothèses de stationnarité sur les paramètres du système (fréquence et amortissement) ainsi que des conditions initiales nulles, ce qui est vérifié dans certains systèmes mécaniques.

Toutefois, certains systèmes complexes sont non stationnaires avec, en plus, des conditions initiales non nulles et/ou variables d'un choc à l'autre. Dans ce cas, il est intéressant d'envisager d'autres approches. Ces approches introduisent des informations supplémentaires quant au modèle du signal analysé. Ces connaissances *a priori* améliorent les performances en terme de résolution. Pour l'exemple étudié dans cet article, le modèle s'inspire du modèle de l'équation du mouvement décrit dans (inclure un lien vers le paragraphe 3).

5.1 Prony et fenêtre d'observation

L'observation de l'équation de la réponse du système développée dans (inclure un lien vers le paragraphe 3) montre que la réponse à chaque choc m suit un modèle défini en discret par :

$$\hat{y}[k] = \sum_{p=1}^{P} h_p . z_p^{k-1} \quad \forall k = 1, N$$

avec h_p l'amplitude complexe du mode p, $h_p = A_p . e^{j\phi_p}$, z_p le pôle complexe du mode p, $z_p = e^{-\alpha_p T_c} . e^{j\Omega_p T_c}$, N le nombre de points du signal et T_c la période d'échantillonnage.

Ce modèle est le modèle dit de Prony connu depuis 1795 [15]. Pour chaque choc et chaque mode du système, le modèle fait intervenir 4 paramètres : l'amplitude et la phase issus de l'amplitude complexe, la fréquence et l'amortissement issu du pôle complexe. L'identification des paramètres de ce modèle est une approche fréquemment adoptée pour l'analyse de signaux oscillants que ce soit en traitement du signal ou en traitement d'antenne et nous ne reviendrons pas sur les multiples techniques envisageables [10] et [7].

Dans un contexte d'extension à un signal non stationnaire, composé d'une succession de ces modèles, il est important d'illustrer un comportement connu du modèle lorsque la fenêtre d'observation n'est pas en phase avec la réponse que l'on souhaite modéliser.

Une *avance de phase* de l'observation sur la réponse du système signifie que les sinusoïdes sont précédées d'échantillons correspondant à la réponse précédente ou à du bruit ambiant (inclure un lien vers la figure 10). Dans cette éventualité, le modèle de Prony n'est plus compatible avec les données observées. L'application de la méthode sur une telle fenêtre conduit à des erreurs d'estimation non négligeables. Une telle rupture additive de modèle dans

la fenêtre d'observation provoque une erreur d'estimation des paramètres de fréquence et d'amortissement proportionnelle au rapport de la puissance du modèle qui précède l'instant de choc sur la puissance de la réponse au choc [16]. L'estimation des amplitudes est perturbée par un biais multiplicatif et un biais additif qui dépendent des échantillons du signal avant la rupture. Suivant que ces échantillons représentent du bruit ou la fin de la réponse au choc précédent, ce biais sera plus ou moins important.

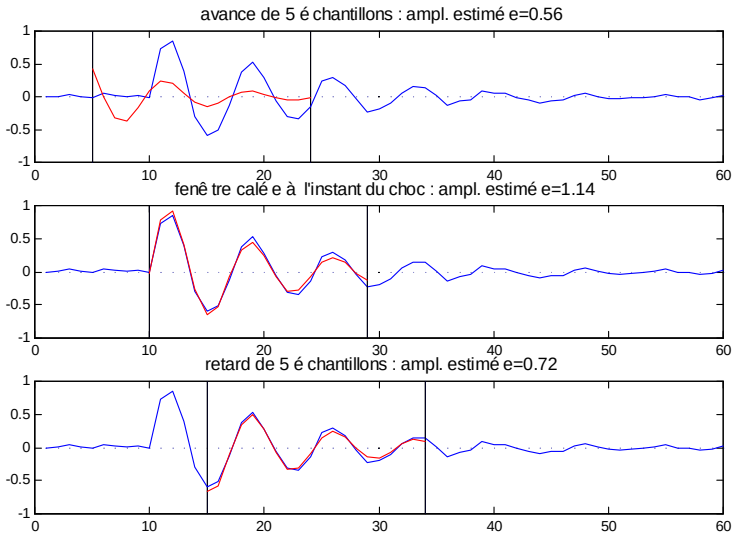

***Figure 10**. Prony et fenêtre d'observation.*

Sensibilité de l'analyse de Prony au positionnement de la fenêtre d'observation : avance de phase, fenêtre calée à l'instant du choc et retard de phase. Courbe en bleu : signal simulé (exp(-0.4(t-10)).sin(2π0.14 (t-10)) avec T_c=1s ; rapport signal à bruit (bruit blanc additif) =18 dB ; Courbe en rouge : modèle estimé de Prony à un ordre P=2 avec une taille de fenêtre N=20 points (délimitée par deux barres verticales).

Lors d'un *retard de phase* de l'observation sur la réponse du système, les premiers échantillons des sinusoïdes ne sont pas pris en compte (inclure un lien vers la figure 10). Dans cette éventualité moins défavorable, le modèle de Prony est vérifié mais les paramètres estimés sont, bien évidemment, ceux correspondant à l'observation. Le décalage temporel influe essentiellement sur l'estimation de l'amplitude et de la phase. L'amplitude est perturbée par un terme multiplicatif, fonction exponentielle du retard de phase, tandis que la phase est perturbée par un terme additif égal au retard de phase.

5.2 Principe du Prony temps-fréquence

Par définition, le modèle de Prony ne modélise qu'une seule réponse, que celle-ci soit mono ou multi-modale. Pour modéliser l'ensemble de la réponse, nous proposons d'appliquer la méthode de Prony sur une fenêtre glissante avec une configuration adaptée au fait que les sinusoïdes soient amorties. Cette option, contrairement aux modélisations purement non-stationnaires, évite d'avoir à choisir un modèle de non-stationnarité. La seule contrainte est une contrainte de stationnarité locale sur une fenêtre temporelle qu'il n'est pas déraisonnable de supposer lors de la réponse à un choc. La longueur de cette fenêtre, optimale lorsqu'elle est

choisie égale à la durée de la réponse d'un choc, est un paramètre fondamental. L'algorithme proposé estime cette durée en exploitant les propriétés de l'estimateur sur deux types de fenêtres, des fenêtres de durée « très courte » ou des fenêtres de durée « longue ». Le choix de ces longueurs est précisé dans (inclure un lien vers le paragraphe 5.3).

Etant donné le problème de sensibilité du modèle à la fenêtre d'observation (inclure un lien vers le paragraphe 5.1), appliquer un modèle de Prony à chaque choc nécessite impérativement une étape préliminaire de détection des instants d'arrivée de ces chocs. Nous avons développé une méthode conjointe de détection/estimation. Cette méthode a la particularité d'être adaptée à des réponses brèves et rapprochées dans le temps.

5.3 Détection des instants : courbe des amplitudes

Dans le but d'estimer les instants d'arrivée de chocs, nous avons exploité la sensibilité du modèle de Prony au positionnement du choc dans la fenêtre.

Notons $t_m = k_m \ T_c$ les instants d'arrivée des chocs à estimer et supposons, dans un premier temps, que les réponses aux chocs soient disjointes. Considérons une fenêtre glissante en temps de N_f points, N_f étant de l'ordre du nombre de points entre chocs et repérée par l'indice de son premier point noté k_f.

Lorsque $k_{m+1} - N_f + 1 \leq k_f \leq k_m - 1$, cas n°1 de (inclure un lien vers la figure 10), l'observation est en avance de phase et la fenêtre contient une rupture de modèle. L'estimation des amplitudes sera perturbée sur une durée correspondant à la largeur de fenêtre N_f.

Lorsque $k_m \leq k_f \leq k_{m+1} - N_f$, cas n°3 de (inclure un lien vers la figure 10), l'observation dans la fenêtre est en retard de phase $\varphi_r = k_f \ \Omega_p$ par rapport à l'instant de choc k_m et l'amplitude du mode p, notée $A_p\left[k_f\right]$, s'écrit :

$$A_p\left[k_f\right] = A_{mp} \ e^{-\alpha_p\left(k_f - k_m\right)T_c}$$

Cette équation montre que l'amplitude de chaque mode estimée sur la fenêtre est une exponentielle fonction de l'indice k_f et maximale pour $k_f = k_m$.

Les paramètres du modèle de Prony sont estimés en deux phases découplées : estimation des fréquences et des amortissements suivie de l'estimation des amplitudes et des coefficients d'amortissement. Il est de ce fait envisageable de choisir des tailles de fenêtre différentes pour chaque phase. Cette possibilité est intéressante dans un contexte de détection qui requiert une sensibilité aux moindres variations plutôt qu'une estimation précise.

En choisissant pour la deuxième phase une taille de fenêtre $N_f bis$ très inférieure à N_f, l'estimation des amplitudes sera perturbée sur une durée beaucoup plus faible ($N_f bis$). (inclure un lien vers la figure 11) représente deux analyses de Prony sur un signal simulé, l'une avec la même taille de fenêtre pour les deux phases, l'autre avec deux tailles de fenêtre différentes.

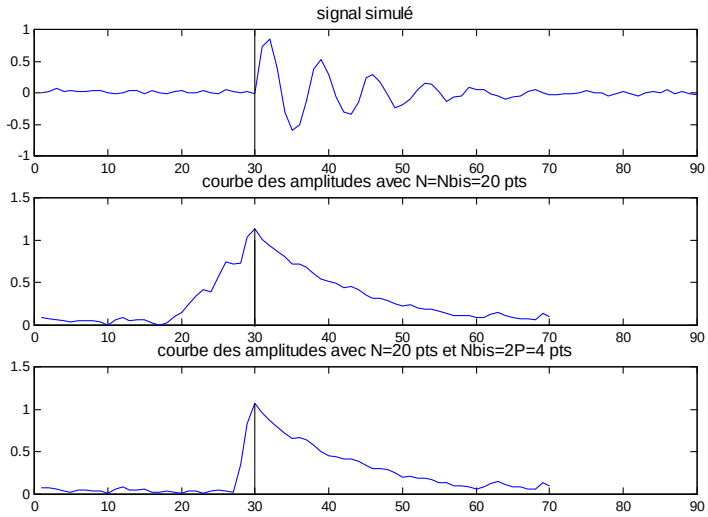

Figure 11. *Courbes des amplitudes estimées sur un signal simulé.*

Courbes des amplitudes estimées sur le signal simulé représenté sur la figure du haut. Courbe calculée avec une taille de fenêtre glissante identique pour les deux phases de Prony, Nf=Nfbis=20 pts sur la figure du milieu, puis avec une taille beaucoup plus faible pour la deuxième phase, Nfbis=2P=4 pts, sur la figure du bas.

Le choix $N_f bis = 2P$ apparaît comme un bon compromis afin de ne pas trop dégrader la qualité de l'estimation des amplitudes et de mettre néanmoins en évidence une réduction notable de la durée de perturbation, de 20 points à 4 points.

Ainsi, lorsque la fenêtre glisse point par point sur un signal multi-chocs, chaque courbe $A_p\left[k_f\right]$ représente une succession d'exponentielles amorties maximales aux instants recherchés. Cette propriété est vraie quel que soit le mode p variant de 1 à P. Etant donné qu'il n'y a aucune raison de privilégier un mode par rapport à un autre, le détecteur que nous proposons est construit sur la somme des amplitudes estimées pour chaque mode. Ainsi, les instants k_m sont estimés par les arguments des maxima de la somme des amplitudes des modèles locaux sur chaque fenêtre :

$$\hat{k}_m = \arg\max_{k_f} \sum_{p=1}^{P} A_p\left[k_f\right] \text{ avec } A\left[\hat{k}_f\right] > \lambda\sigma$$

avec σ l'écart-type du bruit. Cette dernière contrainte est ajoutée afin d'éliminer des maxima associés au bruit ambiant. La variance du bruit est estimée au préalable à l'aide, par exemple, d'un estimateur du maximum de vraisemblance dans le plan temps-fréquence [6]. λ un nombre réel fixé *a priori*.

La robustesse du détecteur est améliorée en ajoutant une contrainte sur les points qui suivent chaque maximum : ne sont retenus que les maxima qui sont suivis d'une décroissance exponentielle. Les paramètres $\hat{A}_{k_f}$ et $\hat{\alpha}_{k_f}$ d'un modèle de fonction exponentielle sont estimés par moindres carrés sur la courbe d'amplitude entre deux maxima.

Par conséquent, le détecteur est défini de la façon suivante. Les maxima retenus sont ceux pour lesquels la puissance d'erreur normalisée entre la courbe d'amplitude et ce modèle exponentiel est inférieure à un seuil ε fixé *a priori* :

$$\frac{\sum_{k_f=k_m}^{k_{m+1}} \left| \sum_{p=1}^{P} A_p\left[k_f\right] - \hat{A}_{k_f}.e^{-\hat{\alpha}_{k_f}\left(k_f-k_m\right)T_c} \right|^2}{\sum_{k_f=k_m}^{k_{m+1}} \left| \sum_{p=1}^{P} A_p\left[k_f\right] \right|^2} < \varepsilon$$

Si les réponses aux chocs ne sont pas disjointes, une détection correcte est néanmoins possible si l'amortissement et la fréquence ne varient pas d'un choc à l'autre. La (inclure un lien vers la figure 12) d'un signal simulé à partir de trois chocs de même amplitude et de même réponse qui interférent de façon constructive dans les deux premiers chocs et de façon destructive dans les deux derniers conduit à des résultats encourageants.

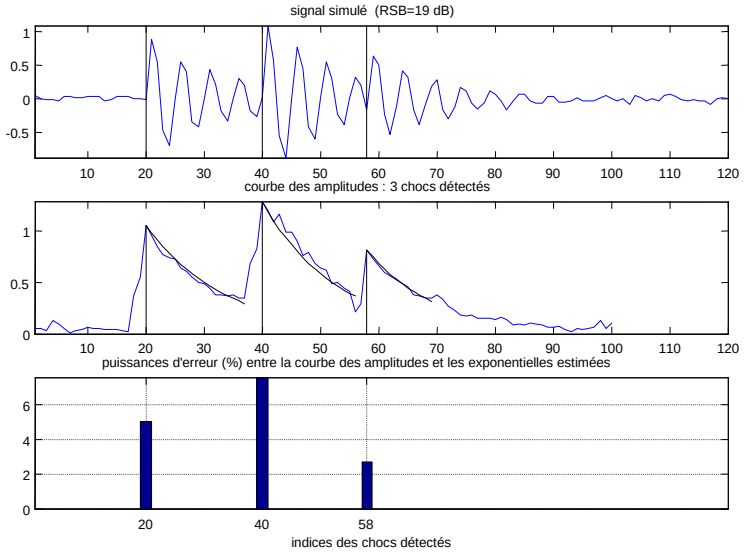

***Figure 12**. Détection des chocs.*

Courbe des amplitudes et détection des chocs avec N_f=20 points, $N_f$bis=2P=4 points, ε = 10%.

Les instants d'arrivée des trois chocs ont été détectés sans erreur sur la courbe des amplitudes extraites. Les performances de ce détecteur en fonction du rapport signal à bruit sont développées dans [10].

5.3 Algorithme Prony temps-fréquence

Nous avons fait l'hypothèse que les réponses aux chocs sont disjointes ou que les amortissements et les fréquences varient peu d'un choc à l'autre. Une taille de fenêtre N_f choisie large pour la première phase de Prony conduit à une bonne estimation des fréquences et amortissements. Une taille $N_f bis = 2P$ choisie courte pour la deuxième phase réduit la perturbation des amplitudes estimées en avance de phase et assure ainsi une meilleure détection comme nous l'avons illustré dans (inclure un lien vers le paragraphe 5.3). Ce

découplage des longueurs de fenêtre entre les deux phases de Prony permet de respecter les deux contraintes d'estimation et de détection. L'algorithme complet (estimation / détection / modélisation) a été baptisé méthode de Prony-temps-fréquence et est constitué des trois étapes suivantes :

1- Modèle de Prony calculé sur une fenêtre glissante avec une fenêtre de taille N_f fixé *a priori* (environ 3 périodes du fondamental) pour la première phase de la modélisation de Prony (fréquence et amortissement) et une fenêtre de taille $N_{fbis}<N_f$ pour la seconde phase de la modélisation de Prony (amplitude et phase) ;

2- Détection des instants d'arrivée des chocs (inclure un lien vers le paragraphe 5.2) ;

3- Modèle de Prony recalculé sur chaque segment délimité par les instants d'arrivée des chocs.

Appliquons cette méthode sur un signal simulé comportant trois chocs (inclure un lien vers la figure 12). La méthode de Prony temps-fréquence calcule un modèle complet du signal (inclure un lien vers la figure 13) qu'il est intéressant de comparer avec le signal original.

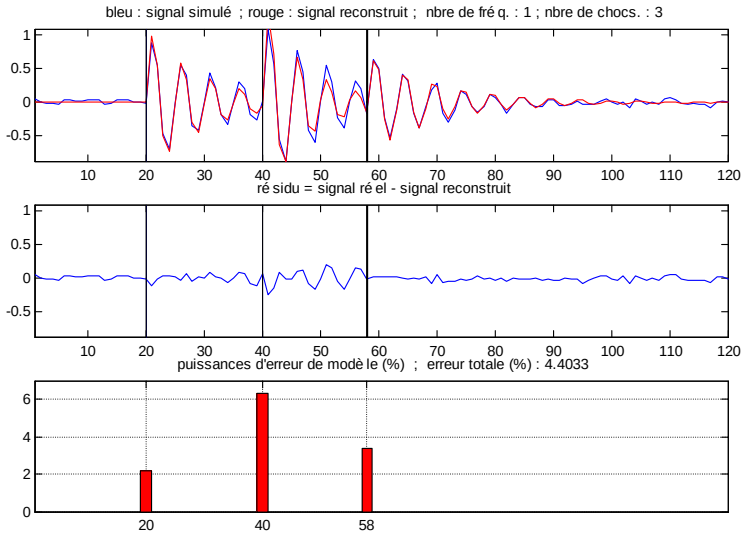

***Figure 13**. Prony temps-fréquence sur un signal simulé.*

Calcul du modèle complet, du résidu, des puissances d'erreur de modèle pour chaque choc et de l'erreur totale de reconstruction pour le signal (inclure un lien vers la figure 12).

La puissance d'erreur de modélisation de chaque choc est calculée comme la puissance du résidu de chaque segment détecté (écart entre le modèle et le signal), normalisée et exprimée en %. La puissance d'erreur totale de reconstruction est calculée comme la puissance totale du résidu normalisée par la puissance du signal complet. Sur ce signal simulé, le modèle est calculé avec erreur totale de 4,4 %, ce qui est tout à fait acceptable étant donné que les chocs ne sont séparés que par 4 ou 5 périodes du fondamental.

6. Application à un signal vibratoire de remontées mécaniques

Analysons par la méthode de Prony temps-fréquence la mesure accélérométrique (inclure un lien vers la figure 7) effectuée à Isola 2000 en tête de suspente d'un télésiège débrayable 4 places avec une vitesse du câble de 4,16 m/s.

Les résultats (inclure un lien vers la figure 14) montrent que l'erreur de reconstruction s'élève à 19,3 % , ce qui est substantiel.

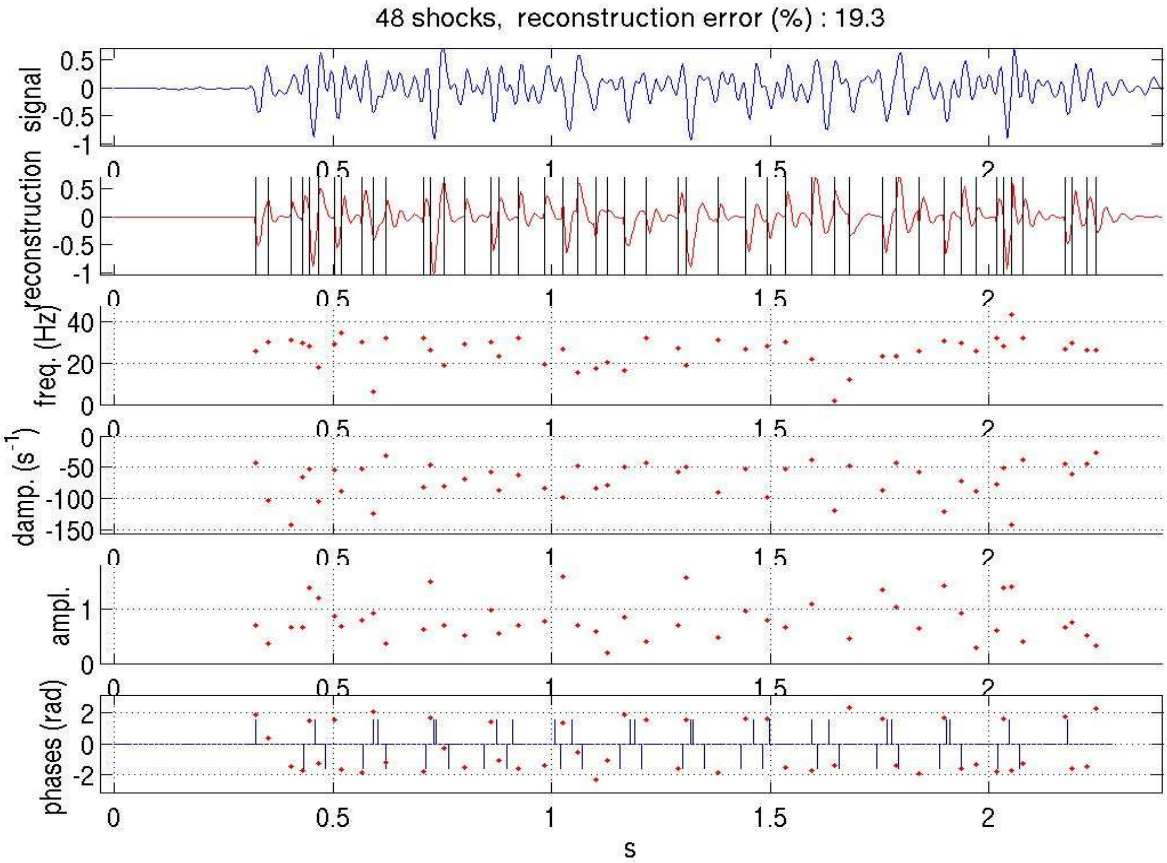

Figure 14. *Prony temps-fréquence appliquée à une mesure accélérométrique.*
Prony temps-fréquence appliquée à la mesure accélérométrique (inclure un lien vers la figure 7) effectuée à Isola 2000 (télésiège débrayable 4 places au passage d'un pylône compression de 12 galets) pour une vitesse de ligne de 4,16 m/s. De haut en bas : réponse mesurée ; signal reconstruit par la méthode superposés aux instants d'arrivée des chocs détectés (barres verticales) (P=2, N_f=10);puis, en fonction du temps, fréquence, amortissement, amplitude et phase estimés. Sur la dernière courbe sont superposés les instants d'arrivée des chocs calculés à partir d'un modèle du système.

En effet, la confrontation entre le signal reconstruit par la méthode de Prony temps-fréquence et le modèle *a priori* des excitations fait apparaître quelques dissemblances. La valeur moyenne des fréquences estimées est de 26 Hz avec un écart-type de 7 Hz.

Néanmoins, ce résultat est extrêmement positif étant donné le nombre de chocs et le rapprochement des chocs. Il est notable de signaler que nous n'avons pas réussi, jusqu'à présent, à obtenir de résultats à l'aide des méthodes de déconvolution qui font l'hypothèse d'un système stationnaire [5]. Le système étudié dans cet article est un cas fortement critique

où l'intervalle entre deux chocs est de l'ordre de la période du fondamental, chaque réponse étant de plus amortie.

Bien que le signal soit mécanique et non acoustique, il est intéressant d'écouter (inclure un lien vers la figure 7). pour se rendre compte de la difficulté. A cette fin, il est indispensable d'avoir des enceintes ou un casque adaptés à la basse fréquence des signaux (15 à 40 Hz) : (Inclure un lien vers le signal audio isola300.wav afin de l'écouter).

Pour une comparaison, on peut aussi écouter le signal simulé avec 3 chocs à des fréquences identiques (inclure un lien vers la figure 12) : (Inclure un lien vers le signal audio 3chocssimu300.wav afin de l'écouter).

7. Conclusion

La compréhension du phénomène mécanique tel que présenté dans cet article ouvre la porte à sa modélisation prédictive, ce qui en terme de construction mécanique est un facteur très important de sécurité. Dans ce domaine, la loi impose, avant mise en service de l'installation, des essais de fatigue des sièges. La possibilité de modéliser le signal dès sa conception peut permettre d'évaluer les problèmes de confort de l'usager ou de fatigue des matériaux avant la fabrication.

Le problème présenté ne concerne que le passage d'un véhicule sous un pylône compression. Dans [3] et [4] et [2] est présentée une analyse des mesures accélérométriques effectuées en entrée et en sortie de gare des véhicules débrayables. Dans ce cas, le véhicule glisse sous des pneus d'entraînement et non plus des galets, nous ne pouvons plus parler de chocs. Nous avons exploité le modèle mécanique de l'ensemble véhicule-pince afin d'en extraire un profil vitesse/position de la pince qui a pu être comparé au profil, donné par le constructeur, des vitesses théoriques des pneus. Cette comparaison met en exergue les éventuelles dérives du réglage du système d'entraînement.

Sur le plan du traitement du signal, le problème soulevé par l'analyse d'un signal vibratoire a abouti à la conception d'une nouvelle méthode de détection et de modélisation de transitoires. L'approche proposée a permis la détection de chocs très rapprochés, de l'ordre de la période du transitoire, et ce, malgré la superposition des réponses aux chocs. La méthode de détection est originale dans le sens où elle est basée sur l'estimation des paramètres d'un modèle. Une étude non présentée dans ce document a montré la supériorité de cette détection par rapport à un détecteur construit sur une transformée en ondelettes. Cet avantage est lié à l'adaptation du modèle de Prony aux signaux vibratoires considérés. Le modèle final de l'observation est un modèle de signal non stationnaire, ce qui permet une grande souplesse lors de l'analyse de signaux réels.

La méthode proposée s'applique à d'autres types de signaux. Nous l'avons appliquée à des signaux vibratoires mesurés sur des engrenages [2]. L'intérêt d'une telle approche est une modélisation locale et fine, applicable sur une durée très courte du signal observé, ce qui est peu classique dans les méthodes de diagnostic.

Les signaux non stationnaires sont fréquents et il est rare de pouvoir y échapper en traitement du signal. Il est alors indispensable de maîtriser les outils d'analyse, communément appelés temps-fréquence. Les méthodes fréquemment enseignées de nos jours appartiennent à la

classe dite de Cohen, ce qui englobent entre autres le spectrogramme et la distribution de Wigner-Ville. Les approches basées sur le calcul d'un modèle et souvent dénommées paramétriques, telle que celle présentée dans cet article, présentent des performances particulièrement intéressantes pour une large gamme de signaux. Que l'utilisateur soit un étudiant ou un ingénieur, celui-ci doit être à même, dans toute application, de pouvoir établir les connaissances *a priori* nécessaires au choix d'un modèle, dans le but d'optimiser les performances de l'analyse. Au delà des techniques d'identification de paramètres du modèle, une approche conjointe modèle du signal observé et modèle physique du système étudié favorise des interactions positives de l'un vers l'autre qui aboutissent à une meilleure compréhension de la physique sous-jacente.

Références bibliographiques

[1] Y. BALTER, P. JAUSSAUD, N. MARTIN, Etude du mouvement d'un balancier d'un télécabine II. Mécanique Industrielles et Matériaux (GAMI), Vol. 52, n°2, Juin 1999.

[2] F. COMBET, Traitement du signal Avancé et Diagnostic des Installations de Remontées Mécaniques, Thèse de Doctorat de l'INPG, Décembre 2003.

[3] F. COMBET, P. JAUSSAUD N. MARTIN, Motion estimation and pulse detection in a detachable chairlift station. Third workshop on Physics in Signal and Image Processing, PSIP 03, Grenoble, France, January 29-31, 2003.

[4] F. COMBET, P. JAUSSAUD, N. MARTIN, Modèles vibratoires dans les remontées mécaniques. REE, Revue de l'Electricité et de l'Electronique, n° 6 (juin-juillet), 2003.

[5] F. COMBET, N. MARTIN, P. JAUSSAUD, Recovery of a high shock probability process using blind deconvolution methods. EUropean SIgnal Processing COnference, EUSIPCO 20002, Toulouse, France, Vol. II, pp. 91-94, September 3-6, 2002.

[6] C. HORY, N. MARTIN, Maximum Likelihood estimation for Spectrogram segmentation. ICASSP 02, Orlando, Florida, Vol. II pp. 1581-1584, May 13-17, 2002.

[7] P. JAUSSAUD, N. MARTIN, F. COMBET, En mécanique : Détection de chocs. Chapitre 6.1, 48 pages. Ouvrage « Décision temps-fréquence », sous la direction de N. MARTIN et C. DONCARLI. Traité IC2, Editeur HERMES, Mars 2004.

[8] P. JAUSSAUD, N. MARTIN,V. PELLISSIER, Detection and Modelling of a Vehicle Acceleration on a Compression Tower by a Triple-Prony Processing. First International Symposium on Physics in Signal and Image Processing, Paris, France, 18-21 January 1999.

[9] N. MARTIN, M. DURNERIN, Détection de non-stationnarités à l'ordre 2. Chapitre 2.1, 23 pages. Ouvrage « Décision temps-fréquence », sous la direction de N. MARTIN et C. DONCARLI. Traité IC2, Editeur HERMES, Mars 2004.

[10] N. MARTIN, P. JAUSSAUD, F. COMBET, Close shocks detection using time-frequency Prony Modelling. MSSP, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 18, n°2:, pp 235-261, March 2004.

[11] L. PADOVESE, N. MARTIN, J.M. TERRIEZ, Méthode Temps-Fréquence Hybride ARCAP pour l'Identification des Caractéristiques Dynamiques d'un Pylône Compression d'un Téléphérique Monocâble. Traitement du Signal, Vol.13, n° 3, pp 209-223, Septembre 1996.

[12] L. R. PADOVESE, J.M. TERRIEZ, N. MARTIN, Etude des Phénomènes Dynamiques dans les Pylônes Compression des Téléphériques Monocâble. Mécanique Industrielles et Matériaux (GAMI), Vol. 48, n° 4, Décembre 1995.

[13] L. R. PADOVESE, N. MARTIN, J. M. TERRIEZ, Study of Dynamic Phenomena in Hold-Town Towers of Monocable Ropeways. III International Mobility Technology Conference & Exhibit, SAE Brasil, Sao-Paulo, 7-9 November 1994.

[14] L.R. PADOVESE, Etude des phénomènes dynamiques dans les pylônes compression des télésièges monocâbles. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 17 décembre 1992.

[15] R. PRONY, Essai expérimental et analytique, Sur les lois de la dilatabilité des fluides élastiques et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'eau et de la vapeur de l'alkool, à différentes températures, Journal de l'Ecole Polytechnique, Paris 1, pp. 24-76, 1795.

[16] T. ROBERT, Modélisation continue de signaux non-stationnaires à rupture brutale, Thèse de doctorat de l'INP Toulouse, 15 janvier 1996.