

"ANALYSE ET SIMULATION DE LA TRANSMISSION
 DE L'ENERGIE DANS UN MICROSYSTEME"

Communication de M. C. Stettler
 LABORATOIRE SUISSE DE RECHERCHES HORLOGERES, NEUCHATEL

RESUME :

Nous allons voir l'intérêt que présentent l'analyse numérique et ensuite la simulation en micro-technique. C'est à l'aide du système Balisomètre et des méthodes de traitement du signal que nous avons effectué une grande partie des mesures. Suite à l'analyse, des modèles de simulation sur ordinateur ont pu être établis et vérifiés. Ces techniques doivent permettre d'améliorer et d'accélérer la mesure et la conception des microsystèmes.

1. INTRODUCTION

L'utilisation de méthodes numériques pour le traitement de signaux à l'aide de l'ordinateur est courante dans beaucoup de domaines. Appliquées à l'analyse, ainsi qu'à la simulation de la transmission et du transfert de l'énergie dans un micro-système, telle une montre mécanique, elles apportent, une fois élaborées, très rapidement une foule d'informations.

L'analyse a d'abord permis d'identifier les phénomènes, ensuite elle est utilisée pour la mesure et le contrôle simultané du fonctionnement de chaque composant de la montre mécanique. Quant à la simulation, elle est au départ un outil didactique permettant l'élaboration de modèles mathématiques, par la suite, c'est une aide appréciable lors de la conception de nouveaux calibres et pour expliquer le comportement de certaines pièces de série.

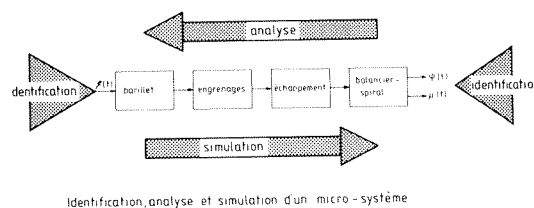
L'utilisation de telles méthodes était, jusqu'ici, trop peu fréquente en horlogerie, désormais ces moyens doivent être appliqués plus largement en microtechnique.

2. METHODE DE TRAVAIL

Pour conduire cette étude, nous avons emprunté à plusieurs branches de la technique leurs méthodes. Si les bases sont les mathématiques et un certain sens pratique, c'est surtout de la théorie des systèmes et du traitement du signal que nous nous sommes inspirés.

Pour montrer l'orientation de notre démarche, nous allons passer immédiatement à l'objet de nos travaux, la montre mécanique, mais qui aurait presque pu être n'importe quel autre système.

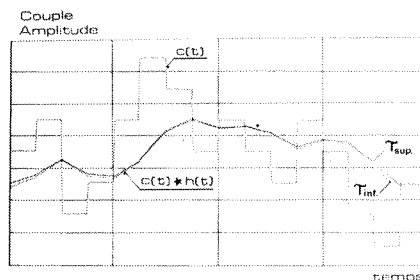
Vu par un technicien, chaque sous-ensemble de la montre mécanique est très différent de celui qui le suit ou le précède. Ces mêmes éléments, vus théoriquement, peuvent être considérés comme des boîtes noires, où chacune a un contenu différent, mais qui, vues de l'extérieur, se comportent comme des filtres au travers desquels passe, plus ou moins bien, l'énergie selon l'impédance mécanique de ceux-ci.



Identification, analyse et simulation d'un micro-système

Fig. 1

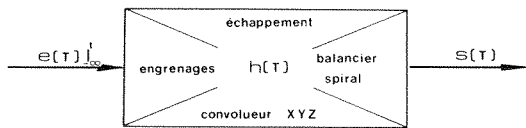
Pour traiter ces divers filtres, l'analyse numérique et les méthodes de transformation nous proposent plusieurs solutions pour le domaine linéaire. Cette condition peut être éventuellement satisfaite par décomposition du problème en tranches successives quasi linéaires. D'autre fois, les méthodes utilisées échappent à une formulation mathématique rigoureuse, mais sans préjudice pour nos résultats.



transfert non linéaire

Fig. 2

Intéressons-nous un instant au cas général d'un élément filtre de la montre mécanique.



transfert dans un sous-système

Fig. 3

Mathématiquement, tous systèmes physiques, nos filtres, peuvent être décrits par un opérateur de convolution s'ils sont linéaires invariants et continus.

Les équations qui lient les grandeurs physiques de chaque sous-ensemble sont, pour le signal de sortie, $s(t)$, l'intégrale de Duhamel ou convolution

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e(t) \cdot h(t-T) dT = e(t) * h(t)$$

que nous utilisons essentiellement pour la simulation.

Pour l'analyse, c'est la déconvolution et la représentation de la réponse dans le domaine des fréquences qui nous est utile.

$$e(t) = s(t) * h(t) \iff E(\omega)$$

Enfin, pour l'identification dynamique, la relation

$$h(t) = s(t) * e(t)$$

nous donne la fonction de transfert des sous-ensembles.

Pratiquement, si la convolution ne cause pas beaucoup d'ennuis, la déconvolution est une opération difficile qui n'a pas toujours de solution ou une infinité, selon la nature théorique ou expérimentale du problème.

Expérimentalement, que rarement la fonction observée à la sortie d'un système $s(t)$ est simple et analytique. Il peut en être de même pour la fonction de transfert $h(t)$ et éventuellement de la fonction d'entrée $e(t)$.

Dans notre cas, les fonctions de sortie, que sont l'amplitude du balancier et la marche instantanée de l'oscillateur, ne sont évidemment pas analytiques. Ces deux fonctions sont mesurées à l'aide du Balisomètre avec une précision de comptage de 10 Mhz et forment des échantillonnages :

$$\begin{aligned} \text{amplitude} & \quad a = \{ a_0, a_1, a_2, \dots, a_n \} \\ \text{marche inst.} & \quad m = \{ m^0, m^1, m^2, \dots, m_n \} \end{aligned}$$

En utilisant la même notation, les fonctions d'entrée à divers niveaux du système, que sont les couples, et les fonctions de transfert de chaque sous-ensemble

deviennent :

$$\begin{aligned} \text{couple} & \quad c = \{ c_0, c_1, c_2, \dots, c_n \} \\ \text{transfert} & \quad h = \{ h_0, h_1, h_2, \dots, h_n \} \end{aligned}$$

D'autre part, en vertu du théorème de Plancherel, le produit de convolution dans un domaine est un produit simple dans le domaine réciproque. Ainsi, il est possible de poser

$$s(t) = e(t) * h(t) \iff E(\omega) \cdot H(\omega)$$

De là, les algorithmes de convolution rapide utilisés pour le calcul numérique de chaque filtre du système montre mécanique.

3. IDENTIFICATION

L'identification d'un système consiste à déterminer la relation de cause à effet entre les grandeurs d'entrée et de sortie. Une fois identifié, il est alors possible de prévoir le comportement du système dans toutes les situations et d'envisager une optimisation.

Pour notre étude, l'identification est à la fois analytique et expérimentale, et selon les cas, statique ou, et dynamique.

3.1. L'engrènement

Le processus d'engrènement tend vers l'identification de type statique à caractère géométrique. La mesure du couple transmis, signal de sortie, est mesurée à l'aide de l'Engretest et traité dans l'ordinateur du Balisomètre.

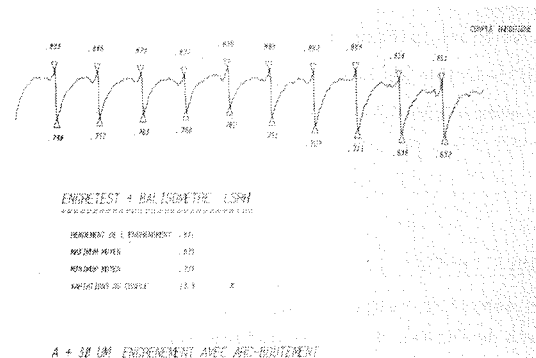


Fig. 4

Les caractéristiques de transmission géométrique non linéaire sont déduites de la cinématique de l'engrènement avec les frottements de glissement et de roulement, ainsi que du signal de sortie. Cette identification a permis la mise au point des modèles de simulation de l'engrènement YGMUL et OGIVE.

3.2. L'échappement et le balancier spiral

Ici, le processus d'identification est à la fois statique et dynamique. Pour la partie statique géométrique non linéaire, les mêmes méthodes que pour l'en-

grènement sont appliquées, alors que pour identifier la partie dynamique, quasi linéaire par tranche, nous utiliserons la déconvolution numérique.

Expérimentalement, nous avons développé un appareil permettant de donner à la roue d'échappement des perturbations avec des caractéristiques connues dans le temps. La mesure de l'amplitude est effectuée au Balisomètre et la réponse du système est calculée. De l'analyse de cette réponse, nous déterminons les paramètres essentiels.

Cette suite d'identification nous a permis de mettre au point un premier modèle de simulation global de l'amplitude GLOBUL, et peut-être bientôt, au vu de l'avancement des travaux, un modèle de la marche instantanée.

4. ANALYSE

Comme nous venons de le voir, la montre mécanique est une cascade de convolveurs, ayant chacun leur propre impédance mécanique. Donc, en mesurant l'amplitude et la marche instantanée, il est possible de déterminer, par déconvolution et traitement numérique, le comportement anormal d'un ou de plusieurs des sous-ensembles. De cette façon, si le taux maximum des perturbations est défini par le signal $e_{ch}(t)$ dans un cahier des charges, nous pourrions vérifier que :

$$e_{ch}(t) \leq h_m(t) * s_m(t)$$

ou

$$E_{ch}(\omega) \leq H_m(\omega) \cdot S_m(\omega) = E_m(\omega)$$

Donc, la transformée de Fourier du produit de déconvolution nous donne la répartition en fréquence du couple à l'échappement et des indications sur les engrenages perturbateurs.

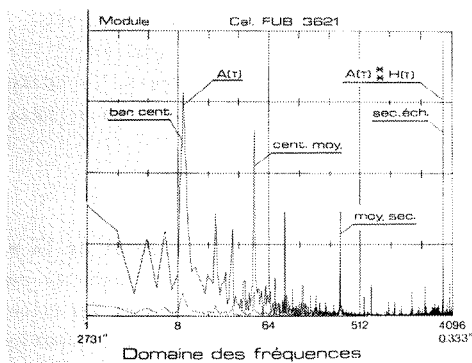
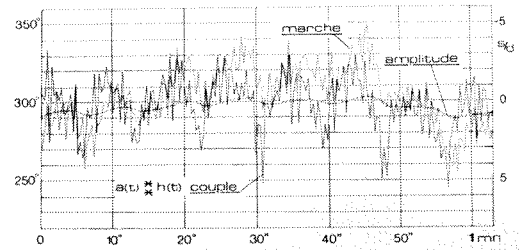


Fig. 5

Suite aux constatations faites durant l'identification d'autres formes de traitement numérique nous permettent de vérifier le comportement de l'oscillateur et de l'échappement.

D'autre part, connaissant la corrélation qui existe entre le couple et la marche instantanée il est pos-

sible, par identification, de contrôler le comportement de l'oscillateur.



amplitude, marche et couple à la roue d'échappement

Fig. 6

D'autre part, il est également possible de connaître la quantité de perturbation, apportée par l'échappement selon le type de corrélation entre l'amplitude déconvoluée et la marche instantanée.

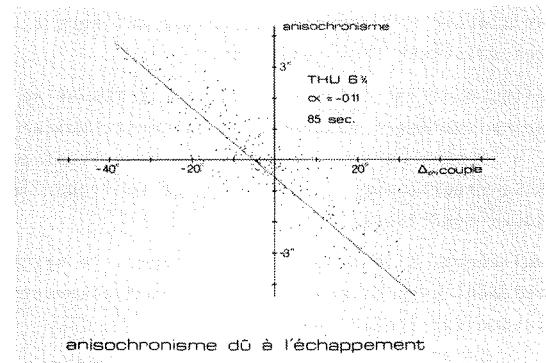


Fig. 7

5. SIMULATION

Nous voici au centre de nos travaux. Jusqu'ici, l'identification, et partiellement l'analyse, ont été des moyens nous permettant de mieux connaître la montre mécanique. Nos objectifs sont d'optimiser celle-ci, d'en faciliter sa conception, et de résoudre rapidement les ennuis de fonctionnement. Nous pensons que la simulation est l'un des outils permettant d'atteindre ces buts. Ainsi, en parallèle à l'identification et à l'analyse, nous avons peu à peu élaboré des modèles mathématiques permettant la simulation sur ordinateurs.

5.1. L'engrènement

L'engrènement est en fait à l'origine de ces travaux. Il est le plus vieux des modèles de simulation dont nous disposons. C'est aussi lui qui nous a rendu conscients de la possibilité de généraliser nos modèles à l'aide des méthodes numériques.

La quantité de perturbation de l'échappement quant à elle, est obtenue soit par filtrage digital inverse, soit par déconvolution de l'amplitude et calcul de la différence entre l'énergie potentielle à l'échappement et l'énergie cinétique du balancier. Les coefficients de régression entre cette différence d'énergie et la marche instantanée nous donnent ces indications (fig. 7).

6.3. Engrenages compensateurs

Après l'analyse et la simulation de l'engrènement, nous avons cherché s'il existait éventuellement une meilleure solution à l'engrènement en microtechnique. Ce sont d'abord des travaux théoriques qui ont abouti à des systèmes d'équations différentielles de type elliptique, malgré les simplifications, notamment en ce qui concerne le frottement. Forts de cette expérience, nous avons complété les exigences de l'engrenage de microtechnique et de finissage pour obtenir un ensemble d'équations et de conditions qu'il s'agit de satisfaire au mieux.

Par des procédés numériques itératifs, il nous est possible d'obtenir un bon compromis. Malheureusement, le programme SPYR n'est pas encore opérationnel industriellement, mais les premiers résultats obtenus montrent l'intérêt d'une telle solution.

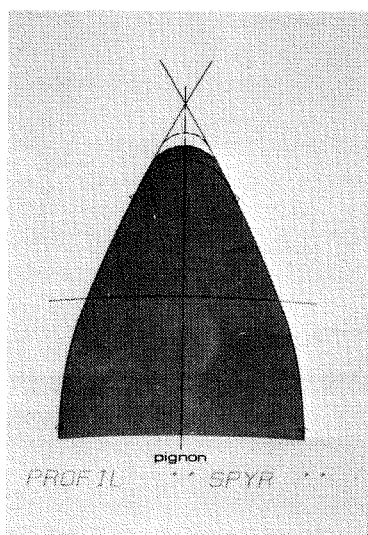


Fig. 11

7. CONCLUSIONS

Ce bref aperçu de nos travaux montre l'intérêt croissant de nouvelles disciplines pour le traitement à l'aide de méthodes numériques. Evidemment, elles nécessitent des outils onéreux et très exigeants que sont les ordinateurs ainsi que les capteurs qui leur sont associés. Sans eux, l'identification des systèmes, l'analyse du comportement, et la simulation des processus seraient presque impossibles.

Certes, des moyens plus spécialisés, éventuellement moins coûteux s'ils existaient, auraient pu être uti-

lisés, mais tout changement rapide d'orientation en cours d'étude nous serait quasi interdit.

Enfin, nous espérons avoir contribué à l'amélioration de nos connaissances et apporter quelques idées en horlogerie classique, tout en ayant démontré les possibilités de méthodes et d'outils que nous pourrions également utiliser pour des études futures dans des domaines peut-être très différents.

BIBLIOGRAPHIE

1. J. MAX : "Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques", Masson & Cie, éditeurs, 1972.
2. M. CUENOD, J.-L. FATIO : "Cours d'introduction aux méthodes d'identification", Editions Albin Michel, 1973.
3. J. ARSAC : "Transformation de Fourier et théorie des distributions", Dunod, 1961.
4. P.-A. LYNN : "An Introduction of the Analysis and Processing of Signal", MacMillan, London, 1973.
5. H.F. SILVERMAN : "An Introduction to Programming the Winograd Fourier Transform Algorithm (WFTA)", IEEE Signal Processing Vol ASSP-25 No 2 4. 1977.

