

NICE du 1^{er} au 5 JUIN 1981

MIDAS : Une **M**aquette d'**I**ndustrialisation pour la
Digitalisation **A**daptative de **S**inusoïdes

Mr DOMINE et Mr GRZESKOWIAK

DRET-ETCA Fort de Montrouge 94114 Arcueil

RESUME

Dans l'étude de structures en présence de vibrations, les techniques numériques présentent d'importants avantages : dynamique et précision accrue, dépouillement accéléré, grande variété de traitements possibles. Ces avantages se paient en général par la nécessité d'acquérir à des cadences élevées, ce qui nécessite des matériels coûteux.

L'utilisation d'une technique particulière, l'échantillonnage "phasé", permet de réduire cette contrainte dans le cas critique d'une excitation sinusoïdale avec balayage en fréquence. On rappelle le principe de cette technique, déjà mise en œuvre sur plusieurs chaînes d'acquisition existantes, et ses difficultés.

Toutefois, pour que la méthode soit pleinement efficace, il faut appliquer une stratégie d'acquisition variable au cours du balayage en fréquence. Le développement des microprocesseurs permet d'envisager la réalisation d'un système "ad hoc" d'un coût modéré.

On présente ici une chaîne d'acquisition expérimentale, dont la réalisation répond à deux objectifs essentiels :

- 1) Valider l'utilisation de l'échantillonnage phasé comme méthode d'acquisition, et déterminer les paramètres optimaux de la stratégie d'acquisition variable.
- 2) Démontrer la faisabilité matérielle d'un système spécialisé performant et peu coûteux, en vue d'une réalisation industrielle ultérieure.

Cette étude est financée par la DRET.

SUMMARY

In the study of vibrated mechanical structures, the numerical techniques offer significant improvements. Basically, they have greater dynamic and accuracy, faster execution and larger variety of treatments than the analogic methods. These advantages are obtained only with high acquisition rates, which mean costly devices.

The use of a particular technique, the "phased sampling", makes it possible to reduce this cost in the critical case of sinusoidal vibration with frequency sweep. The principle of this method, which has already been used on several existing acquisition devices, is recalled, as well as its difficulties.

The complete efficiency of the method, however, implies the use of an acquisition strategy varying while the frequency is swept. The microprocessor technology makes it possible to implement such a strategy at a relatively low cost.

The purpose of this paper is to present an experimental acquisition device, whose design was focused on two goals :

- 1) To validate the use of "phased sampling" as acquisition method, and to optimize the parameters of the variable strategy ;
- 2) To ensure the feasibility of a high performance specialized device at a low cost.

This study is sponsored by the D.R.E.T.. (Direction des Recherches, Études et Techniques).



MIDAS : Une Maquette d'Industrialisation pour la Digitalisation Adaptative de Sinusoïdes

I – INTRODUCTION : ORIGINE DE L'ÉTUDE - SON OBJECTIF

1.1 – Pourquoi cette étude ?

1.1.1 – Les techniques numériques présentent un intérêt croissant dans l'acquisition et le traitement des mesures. Divers facteurs concourent à cette évolution. Essentiellement, ce sont :

- la dégradation quasi nulle du signal numérisé (alors que les signaux analogiques sont à tout instant soumis au bruit) ;
- la puissance des systèmes de traitement en numérique (qui permettent d'accélérer considérablement le dépouillement) ;
- la variété des traitements possibles (qui ouvrent le champ des analyses et des recherches) ;
- et surtout, l'évolution technologique foudroyante qui rend le traitement numérique universellement disponible.

Toutefois, certains arguments sont élevés contre l'acquisition numérique. Ils reposent sur le fait, indéniable, que la numérisation s'accompagne d'une perte d'information, résultant de la discrétisation du phénomène :

- dans le temps (échantillonnage) ;
- dans le domaine de ses valeurs (quantification).

Il est donc nécessaire d'acquérir un volume considérable de données numériques pour préserver la quantité d'information souhaitable*.

(*) Cette redondance est en fait le "prix" que l'on paye pour préserver ultérieurement la qualité de l'information.

1.1.2 – Dans le cas des vibrations sinusoïdales, et plus généralement pour tout phénomène périodique de période connue, cet inconvénient peut être supprimé. On utilise le fait que toute l'information utile est contenue dans une période, et qu'elle se limite en fait à un ensemble discret de fréquences harmoniques.

1.1.3 – L'idée de l'étude est donc d'examiner en pratique la méthode correspondante, dite "échantillonnage phasé".

Deux points sont à prendre en considération :

- l'intérêt de la méthode appliquée à un problème précis : en l'occurrence, il s'agit des essais de structures soumises à des vibrations sinusoïdales ;
- la faisabilité technique d'un système d'acquisition fonctionnant sur ce principe.

1.2 – Sujet et objectif de la recherche

1.2.1 – Le cadre : Le travail entrepris porte sur le cas des essais de structures. Le principe de ces essais est de soumettre la structure étudiée à des vibrations, pour déterminer ses modes propres de résonance et sa sensibilité.

Trois types d'essais sont effectués :

- Essai "sinus" : excitation par un signal de fréquence pure (sinusoïdal). Toutefois, la fréquence de ce signal varie lentement au cours du temps pour balayer la plage de fréquences étudiées. Le signal d'excitation est donc pseudo-sinusoïdal.
- Essais "aléatoire" ou "bruit" : excitation par un bruit blanc, comprenant donc toute la gamme des fréquences étudiées.
- Essai "choc" : excitation par un ... choc (signal bref, très riche en harmoniques).

Dans notre cas, seul l'essai "sinus" est intéressant. Toutefois, on effectuera aussi l'acquisition d'essai de type "aléatoire", pour s'assurer que la chaîne d'acquisition développée en est capable.

1.2.2 – L'échantillonnage phasé

La méthode repose, on l'a vu sur le caractère périodique des signaux acquis. On effectue donc l'acquisition sur une seule période ou, ce qui revient au même (effet stroboscopique); sur un nombre entier de périodes. Le nombre de points à acquérir est égal (d'après le théorème de Shannon) au double du rang de l'harmonique la plus élevée. Plus généralement, si :

- n_i est le rang de la dernière harmonique intéressante
 - n_v est le rang de la dernière harmonique non négligeable
- alors il faut acquérir au moins $n_i + n_v + 1$ points/période.

La caractéristique essentielle de l'acquisition est qu'elle doit être effectuée sur un nombre entier de périodes. Cela signifie que les échantillons doivent être équidistants en phase sur le signal : d'où le nom d'échantillonnage phasé.

1.2.3 – Objectif de l'étude

L'objectif final est d'aboutir à la réalisation d'un matériel d'acquisition numérique :

- de coût modéré (pas plus du double d'un enregistreur magnétique analogique)
- de performances au moins équivalentes à celles d'un tel enregistreur.

II – PLAN D'ENSEMBLE DE L'ÉTUDE

2.1 – Contenu

Comme on l'a vu, deux points sont abordés :

- la validité et l'intérêt de la méthode dite "d'échantillonnage phasé". A cette occasion, on effectuera une étude détaillée des signaux acquis et de leurs caractéristiques.
- la faisabilité technique d'un matériel d'acquisition fonctionnant sur ce principe.

2.2 – Méthode

Pour obtenir ces résultats, on a adopté la démarche suivante :

- 1ère phase : des analyses expérimentales des signaux ont été effectuées. Elles ont fourni les premiers éléments de spécifications pour la...
- 2ème phase : une maquette de chaîne est réalisée. On répond ainsi à deux objectifs :
 - étudier les problèmes techniques de la réalisation
 - valider expérimentalement la méthode, au cours de la...
- 3ème phase : l'exploitation de la maquette sur des signaux convenablement choisis.

2.3 – Qui réalise ?

L'étude a été entreprise sur une idée du LRBA (Vernon), qui effectue les travaux théoriques et l'étude expérimentale des signaux.

Il a demandé à l'ETCA son concours pour la définition et la réalisation de la maquette MIDAS, dont on va présenter maintenant l'architecture.



MIDAS : Une Maquette d'Industrialisation pour la Digitalisation Adaptative de Sinusoïdes

III – ARCHITECTURE DE MIDAS

3.1 – Vue d'ensemble : MIDAS est constituée :

- d'une chaîne d'acquisition relativement classique
- d'un ensemble de conduite de cette chaîne permettant d'effectuer de l'échantillonnage phasé suivant un grand nombre de stratégies différentes.

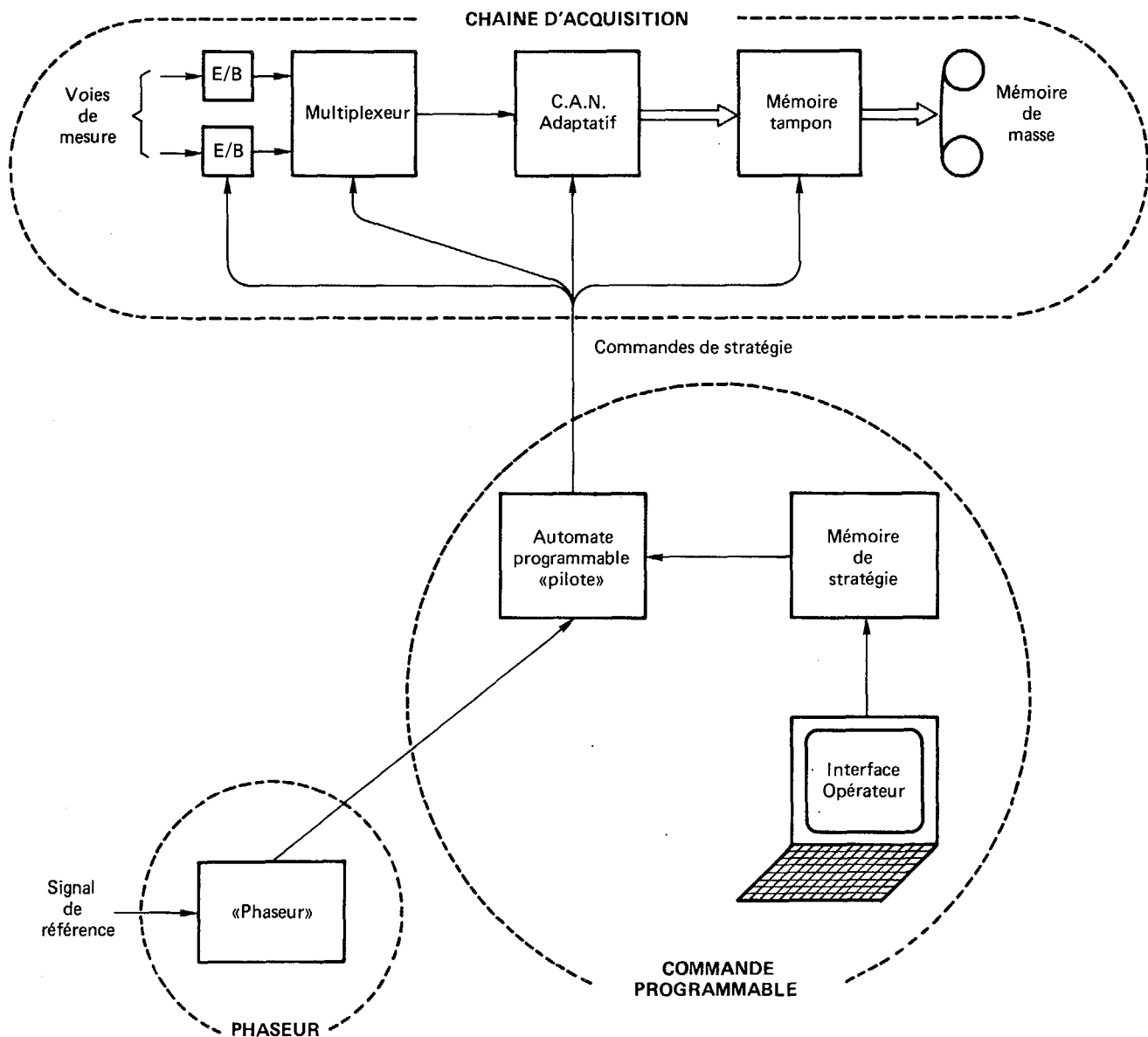
La chaîne d'acquisition est une chaîne deux voies, avec sur chaque voie un échantillonneur-bloqueur dont la commande est indépendante. Un Convertisseur Analogique Numérique dit "Adap-

tatif", conçu et réalisé à l'E.T.C.A., permet d'adapter l'échelle du codage à la valeur instantanée du signal. Le codage est fait sur 10 bits ; deux bits supplémentaires indiquent l'échelle retenue. Une mémoire tampon est placée avant le dérouleur de bande, pour régulariser le débit des informations à la sortie de la chaîne.

L'ensemble de conduite permet de définir plusieurs stratégies d'acquisition. Chacune d'elle s'applique dans une plage de fréquence, au cours du balayage.

Un dispositif particulier (phaseur) fournit les instants théoriques d'échantillonnage à partir du signal d'excitation (ou sinusoïde de référence, dite "à amplitude constante").

Figure 1
- Architecture de MIDAS
- Schéma de principe





MIDAS : Une Maquette d'Industrialisation pour la Digitalisation Adaptative de Sinusoïdes

3.2 – Phaseur

3.2.1 – Définition

Le phaseur est le dispositif qui fournit, à partir du signal de référence les impulsions d'échantillonnagephasé.

Le signal de référence est le signal d'excitation de la structure. C'est une pseudo-sinusoïde (équation : $\sin 2\pi f(t)$, dans laquelle $f(t)$ varie suivant une loi exponentielle $f(t) = f_0 + \frac{v}{60}(t - t_0)$ où v représente la vitesse de balayage en octave/mn). (*) (**).

(*) On effectue parfois un balayage linéaire $f(t) = f_0 + \frac{v}{60}(t - t_0)$ (v en Hz/mn).

(**) En pratique, le signal d'excitation n'a pas une amplitude constante, pour corriger la fonction de transfert du pot vibrant. On utilise donc un autre signal, à amplitude constante.

L'échantillonneurphasé doit fournir des impulsions à une fréquence multiple (entière l) de la fréquence du signal de référence.

3.2.2 – Les principales difficultés auxquelles on se heurte pour réaliser un tel dispositif proviennent des défauts du signal de référence (variations d'amplitude du signal, écart entre la fréquence réelle et la fréquence théorique, tension continue superposée à certaines fréquences au signal de référence,...)

Ainsi, la faisabilité du dispositif doit être étudiée, à partir d'une meilleure connaissance du signal, et de réalisations pratiques.

Par ailleurs, l'étude de l'échantillonnagephasé en tant que méthode requiert un système idéal, ou du moins d'une excellente précision.

Il importe en effet que le matériel utilisé pour l'étude introduise aussi peu de dégradation que possible : une précision de $1^{\circ}/\infty$ sur la position des échantillons a été spécifiée (*). Il apparaît très difficile de tenir cette contrainte à basse fréquence, en raison en particulier de la variation importante de la fréquence instantanée du signal sur une seule période.

(*) L'erreur relative est calculée comme le rapport de l'écart à la position théorique sur la durée totale de la période.

3.2.3 – Pour satisfaire à ces contraintes, deux solutions différentes sont mises en oeuvre.

– A basse fréquence, le signal est échantillonné à haute cadence (suréchantillonnage). La cadence d'échantillonnage, constante sur une plage de fréquence du signal de référence, est choisie de façon à assurer un minimum de 500 échantillons par période. Ceci permet de garantir un écart à la position théorique (quelle qu'elle soit) inférieur à $1^{\circ}/\infty$ de la valeur de la période.

Le choix des échantillons est effectué en temps différé, en fonction de la valeur exacte (mesurée) de la période.

– Aux fréquences plus élevées, un phaseur "à horloge" génère les impulsions en temps réel, avec une erreur théorique inférieure à $1^{\circ}/\infty$.

L'échantillonneur "à horloge" mesure la valeur d'une période et génère sur la période suivante des impulsions équidistantes en temps, réparties sur une durée égale à celle de la période mesurée. L'erreur systématique introduite est inférieure à $1^{\circ}/\infty$:

- au-dessus de 34,7 Hz pour $v = 3$ oct/mn

- au-dessus de 11,6 Hz pour $v = 1$ oct/mn
- au-dessus de 2,3 Hz pour $v = 0,2$ oct/mn

3.2.4 – D'autres méthodes d'échantillonnagephasé font l'objet d'études de principe :

– **Phaseur à seuils** : Les échantillons à prélever correspondent à des valeurs toujours identiques de la phase : $A = \sin(\frac{2K\pi}{n})$. On peut donc envisager de déclencher le prélèvement lors du passage de la sinusoïde de référence par des valeurs seuils bien définies.

Ceci présente l'avantage de fournir des impulsions équidistantes **en phase** et non **en temps**. (Les deux notions sont identiques pour une vraie sinusoïde, mais pas pour une pseudo-sinusoïde dont la fréquence varie continuellement).

Toutefois, l'applicabilité d'une telle solution dépend étroitement de la qualité du signal de référence (en particulier de sa stabilité en amplitude).

– **Phaseur à horloge corrigée** : Dans la mesure où la fréquence suit une loi connue, on peut envisager de calculer la valeur exacte d'une période à partir de la période précédente. En pratique, on devra appliquer un développement limité, avec un nombre de termes assez réduit pour permettre le calcul en temps réel. Par ailleurs, cette solution n'est intéressante que si la fréquence suit correctement sa loi théorique de variation.

– **Phaseur à asservissement de phase** :

La génération d'un signal à une fréquence multiple de la fréquence de référence est envisageable par asservissement sur la phase : cette technique, théoriquement séduisante, risque d'être pratiquement inapplicable aux très basses fréquences, car la variation relative de fréquence sur une seule période y est très importante.

– **Phaseur à tri** : le suréchantillonnage (adopté à basse fréquence sur MIDAS) permet d'assurer une excellente précision. Si un dispositif de tri **en temps réel** permet de sélectionner les échantillons à retenir, on élimine l'inconvénient d'une capacité de stockage trop importante.

Cependant, deux inconvénients apparaissent :

- les cadences en entrée deviennent rapidement considérables, il faut donc limiter le nombre de voies disponibles.
- les échantillons acquis doivent être stockés, avant leur tri, dans une mémoire provisoire d'assez grande capacité. L'architecture correspondante risque d'être lourde.

Sur le plan du principe, on remarquera simplement que le suréchantillonnage consiste à revenir à une acquisition très riche, ce qu'on cherchait à éviter.

3.2.5 – Phaseur : Conclusion

Les différentes techniques d'échantillonnagephasé envisagées, et les problèmes qu'elles posent constituent le centre de l'étude. Leur faisabilité sera ensuite mieux connue.

Par ailleurs les performances souhaitables d'un tel équipement pourront être précisées par l'exploitation de MIDAS. La question du choix d'une technique ne peut être tranchée actuellement.

MIDAS : Une Maquette d'Industrialisation pour la Digitalisation Adaptative de Sinusoïdes

3.3 – La commande programmable

Entre le phaseur (qui fournit un multiple entier de la fréquence de référence) et la chaîne d'acquisition (par laquelle sont prélevés les échantillons), un ensemble permet de créer et d'appliquer des stratégies de prélèvement.

3.3.1 – Stratégies : Présentation

On a vu que les contraintes d'un système industriel (nombre de voies à acquérir ainsi que celles qui résultent du mode opératoire (vitesse de balayage en fréquence) se traduisent par la nécessité d'adopter des compromis sur le mode d'acquisition des "points de fréquence". Par ailleurs, les compromis nécessaires sont différents suivant la plage de fréquence dans laquelle on se trouve.

On souhaite étudier l'influence des différents compromis possibles sur la qualité de restitution et d'analyse du signal.

A cette fin, on doit pouvoir découper la gamme de fréquences en un certain nombre de plages, à l'intérieur desquelles tous les paramètres définissant une stratégie seront choisis par l'opérateur. Celui-ci choisit également les valeurs de fréquence définissant le changement de plage (donc de stratégie).

Une stratégie est définie par la valeur des paramètres de l'échantillonnage, c'est-à-dire :

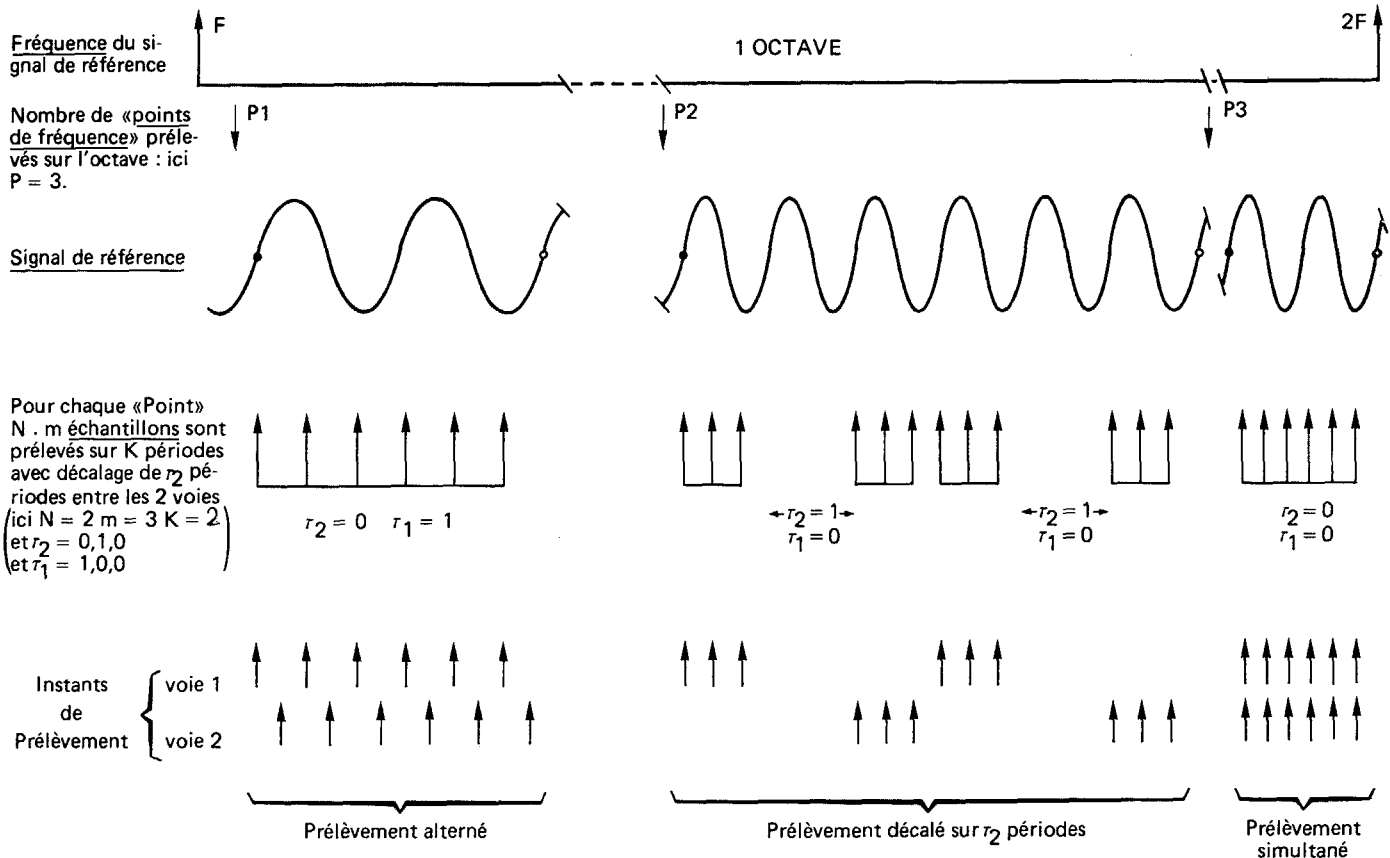
- un paramètre définissant la densité d'acquisition au cours du balayage :

le nombre de "points de fréquence" acquis par octave :

ce paramètre détermine la densité de points de fréquence acquis, c'est-à-dire la résolution de la courbe donnant l'amplitude du signal mesuré en fonction de la fréquence du fondamental (dite "courbe amplitude-fréquence").

- les paramètres qui caractérisent l'acquisition à une fréquence déterminée :
 - le nombre d'échantillons prélevés pour restituer un "point de fréquence" : ce nombre définit le rang d'harmonique maximum dont on évite le repliement.
 - le nombre k de périodes sur lequel on étale le prélèvement d'un point : on utilise là un effet stroboscopique pour étudier une période à partir de plusieurs.
 - le nombre N de points de fréquence consécutifs que l'on prélève pour en restituer un seul : dans ce cas, on effectue un prélèvement avec une fenêtre d'analyse du signal plus large, en vue d'améliorer la finesse d'analyse spectrale possible.
- Les paramètres qui permettent d'analyser le décalage de prélèvement entre deux voies différentes :
 - un indicateur spécifie un prélèvement des échantillons **alternativement** sur une voie et sur l'autre.
 - un paramètre fixe un **décalage** d'un nombre déterminé de périodes entre le prélèvement d'un point sur une voie et celui du point correspondant sur l'autre voie.

Figure 2
Stratégies : exemples





MIDAS : Une Maquette d'Industrialisation pour la Digitalisation Adaptative de Sinusoïdes

3.3.2 — Les fonctions que réalise la commande programmable sont entièrement définies par la description précédente, c'est-à-dire par les paramètres de stratégie.

Pour ce faire, la commande est constituée par un automate câblé spécialisé (le "pilote"), qui fournit à la chaîne d'acquisition les impulsions élémentaires de commande (pour chaque échantillon, sur chaque voie). Les entrées du pilote sont :

- d'une part les échantillons en provenance du phaseur
- d'autre part la "mémoire de stratégie".

La "mémoire de stratégie" est une zone de mémoire vive (RAM) contenant la description entière d'un essai, c'est-à-dire, pour chaque plage de fréquence à laquelle est associée une stratégie particulière :

- la valeur de la fréquence marquant le début de la plage
- les valeurs prises par chacun des paramètres de stratégie.

Le passage d'une stratégie à la suivante est assuré automatiquement par le pilote, lorsque la fréquence de référence atteint et dépasse la valeur de la fréquence stockée en mémoire comme valeur de début de la nouvelle plage.

Le chargement de la mémoire est effectué par "l'interface de définition de l'essai".

L'interface est un micro-ordinateur avec ses périphériques, qui :

- permet à l'opérateur chargé de l'essai de définir interactivement la succession des stratégies à appliquer et les plages de fréquence correspondantes ;
- effectue toutes les transformations nécessaires pour mettre les données ainsi fixées par l'opérateur sous leur forme interne, et charger la mémoire de stratégie.

On notera, pour mémoire, que la commande programmable peut fonctionner en échantillonneur à cadence fixe, sans utiliser la sortie du phaseur. Pour ce faire, un mot particulier de la mémoire de stratégie (fe) indique la fréquence à adapter dans ce mode de fonctionnement.

3.4 — La chaîne d'acquisition

La chaîne d'acquisition de MIDAS est une chaîne classique, de bonnes performances (cadence moyenne $\leq 50\,000$ pts/s - cadence instantanée par voie : $40\,000$ pts/s).

Deux éléments méritent de retenir l'attention :

- le convertisseur analogique-numérique (CAN) adaptatif
- la mémoire-tampon.

3.4.1 — Le CAN adaptatif

Pour des signaux à forte dynamique (ici : 80 dB), il y a tout à gagner à effectuer un codage "flottant" du signal, c'est-à-dire à coder sur un maximum de bits la valeur significative débarrassée des zéros en tête, en représentant ces derniers - qui correspondent à "l'échelle" du signal - par un code conventionnel. (Dans le cas de codage flottant des nombres dans un calculateur, ces parties correspondent à la mantisse et à la caractéristique ou exposant).

A titre d'exemple, pour un code de 12 bits, on obtient ainsi sur un signal variant de 1 mV à 10 V (dynamique = 80 dB) :

- avec un codage conventionnel (de type "entier")
une erreur de résolution variant de 0,025 % sur le signal pleine échelle à 250 % (!) pour 1 mV), le pas de quantification est de 2,5 mV (donc supérieur au signal le plus faible) ;
- avec un codage adaptatif (de type "flottant") à 4 échelles, codées sur 2 bits, soit 10 bits disponibles pour le codage :
une résolution variant de 0,1 % à 1 % sur chacune des quatre échelles.

Ceci illustre l'intérêt d'une perte (minime) de précision sur les signaux élevés, pour un gain considérable sur les signaux faibles.

Le système retenu pour MIDAS est donc un convertisseur 12 bits, dont 2 bits d'échelle, offre une précision toujours supérieure ou égale à 1 %, et effectue la conversion en $3\,\mu\text{s}$, avec un temps de désaturation quasi-nul.

3.4.2 — La mémoire-tampon

L'intérêt de la mémoire-tampon apparaît en filigrane derrière les performances annoncées pour la chaîne : cadence instantanée possible supérieure à la cadence moyenne. Cette dernière est limitée par le choix d'un dérouleur magnétique de performances ordinaires (75 ips - 1600 bpi ; capable d'acquérir environ 100 koctets/s en régime permanent), en raison de son coût modéré.

Pour effectuer des acquisitions de "points de fréquence", de durée limitée, à haute cadence, il était donc nécessaire d'insérer dans la chaîne une mémoire (de type pile FIFO) permettant de régulariser le débit d'information en entrée du dérouleur.

Cette mémoire, gérée par un automate à microprocesseur, permet en outre d'assurer :

- l'adjonction d'informations de service sur le fonctionnement de l'ensemble de MIDAS (commande programmable)
- la mise au format des mots-mesure (découpage de mots de 16 bits en 2 octets).

CONCLUSION

L'étude en cours doit déboucher début 82 sur les résultats d'exploitation de la maquette. Ceux-ci permettront :

- d'une part de spécifier les paramètres importants d'un système d'acquisition numérique de mesures pour les essais de vibration : ces spécifications constitueront un guide à la disposition des responsables de laboratoire désirant acquérir ou renouveler un tel système ;
- d'autre part de porter une appréciation sur l'intérêt de la méthode d'échantillonnage phasé, et de fournir un dossier d'industrialisation pour un système d'acquisition construit sur ce principe. D'ores et déjà, on peut affirmer qu'un tel système devra être conçu pour s'adapter sans difficultés tant sur des dispositifs de pilotage variés, que sur des moyens de stockage très différents (enregistreur magnétique embarquable ou non, centre de calcul déjà existant, ou microcalculateur,...).

L'objectif de ce travail ne sera pleinement atteint que s'il permet, à un industriel à choisir, de réaliser un produit commercialisable répondant aux besoins, toujours en expansion, des laboratoires d'essais en environnement et de test de structures.