

## Développement d'une chaîne d'acquisition virtuelle suivant un formalisme à trois niveaux

Alexis Vander Biest, Cédric Boey, Antoine Nonclercq, Frédéric Robert  
Université Libre de Bruxelles

Laboratoire d'Electronique-Microélectronique (MiEL), CP165/56  
Avenue F.D. Roosevelt 50, B1050 Bruxelles (Belgique)  
{ avdbiest,cboey,anoncler,frobert }@ulb.ac.be

### RESUME

Toute mesure d'une grandeur physique requiert, pour peu qu'elle soit un peu délicate à réaliser, la mise en place d'un ensemble de "modules" de nature électrique ou électronique appelé chaîne d'acquisition. Elle a pour but de mesurer effectivement la grandeur physique désirée (et elle seule) et de rapatrier cette mesure vers un organe de traitement, typiquement un PC.

Dans un article précédent, nous avons introduit le concept de "chaîne d'acquisition virtuelle" consistant à simuler à des fins pédagogiques une chaîne d'acquisition. Après en avoir rappelé les propriétés principales et l'intérêt pédagogique, nous exposerons une évolution majeure dans le concept de chaîne d'acquisition virtuelle: l'introduction d'un formalisme explicite en trois niveaux consacrés respectivement à la construction de la chaîne d'acquisition, à la mesure de ses performances et à la modélisation des modules. Nous illustrons enfin l'intérêt de notre formalisme sur deux exemples pratiques.

**Mots clés :** instrumentation, chaîne d'acquisition, simulation

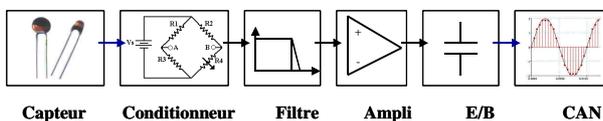
### 1 – LE CONCEPT DE CHAÎNE D'ACQUISITION VIRTUELLE

#### 1.1 Chaîne d'acquisition

L'instrumentation est une discipline fort répandue chez l'ingénieur : un processus de contrôle ou de régulation nécessite, quel que soit le domaine concerné, la mesure de grandeurs physiques aussi variées qu'une température, une grandeur mécanique (pression, accélération, ...), la puissance d'un rayonnement ou l'énergie de particules ionisantes.

La chaîne d'acquisition est un ensemble de dispositifs qui permet la mesure de ces grandeurs physiques et qui assure le traitement du signal mesuré jusqu'à un organe d'acquisition numérique (*fig 1*).

En amont de cette chaîne, le capteur transforme la grandeur physique désirée en une grandeur électrique "brute" (courant, charge, tension, impédance, ...).



*fig 1 : la chaîne d'acquisition*

Cet article se focalise essentiellement sur la partie acquisition d'une grandeur physique depuis sa mesure jusqu'à sa conversion numérique : les aspects de l'instrumentation relatifs aux actionneurs ne seront pas traités ici.

#### 1.2 Intérêt pédagogique

Dans le cadre d'un cours d'Instrumentation donné à l'Université Libre de Bruxelles, nous avons développé

une simulation de chaîne d'acquisition [1] (que nous qualifierons de "virtuelle" dans la suite pour l'opposer à son équivalent réel). Dans ce contexte, les avantages de ce type de simulation comparé à l'expérimentation sont les suivants :

- *Une vue d'ensemble de l'instrumentation :*  
Nous avons choisi de proposer aux étudiants une vue globale de la chaîne d'acquisition plutôt que de détailler le fonctionnement des nombreux types de capteurs existants, convertisseurs et autres conditionneurs existants [2,3]. Notre simulation se focalise à cette fin sur une modélisation comportementale de chacun des modules de la chaîne en mettant en avant leur fonctionnalité : la chaîne est vue comme une juxtaposition de ces modules où chacun d'entre eux trouve sa place dans le traitement du signal mesuré.
- *Une plus grande puissance de représentation :*  
Il est intéressant de mettre en évidence des phénomènes difficilement visibles ou mesurables en pratique en exacerbant leur influence via la simulation (ex : dérive sensible en température de certains capteurs, dégradation de la précision avec le temps, ...). En jouant sur les modèles des composants, nous pouvons également plus facilement isoler certains facteurs de dégradation du signal qu'il ne serait possible de le faire avec un dispositif réel.
- *Coût :*  
L'acquisition d'une licence pour le logiciel de simulation représente un coût unique pour toute la chaîne comparé à l'achat de multiples capteurs et autres cartes d'acquisition nécessaires en pratique.

Bien sûr une simulation ne peut remplacer un travail sur dispositif réel, que nous jugeons lui aussi indispensable. Nous présentons simplement la chaîne d'acquisition virtuelle comme un complément potentiellement très intéressant pour un labo d'instrumentation.

### 1.3 – Choix du logiciel de simulation

Plusieurs logiciels conviennent parfaitement pour la simulation de notre chaîne d'acquisition (comme Matlab par exemple) : parmi ceux-ci, nous avons choisi LabVIEW [4] pour les raisons suivantes :

- *Simplicité* :  
La programmation graphique de LabVIEW est facile à apprendre et propose de nombreuses fonctionnalités de traitement de signaux toutes prêtes (filtrage, FFT, ajout de bruit ...).
- *Interactivité* :  
Lorsque la simulation fonctionne de manière continue, tous les paramètres peuvent être changés permettant d'observer en temps réel l'impact sur l'allure du signal.
- *Modularité* :  
Nous allons profiter des possibilités de représentation hiérarchique de LabVIEW via l'utilisation de "VI" (Virtual Instrument : des blocs d'exécution qui peuvent être mis en série, en parallèle et combinés hiérarchiquement pour faire de nouveaux VI). Nous pouvons utiliser ces VI afin de créer des modules dont la combinaison confèrera beaucoup de flexibilité à la conception d'une chaîne d'acquisition : l'explication détaillée du formalisme utilisé fait précisément l'objet de la section suivante.

## 2 – INTRODUCTION D'UN FORMALISME EN TROIS NIVEAUX

### 2.1 Niveau 3: assemblage de la chaîne

Comme nous l'avons déjà vu plus haut, une chaîne d'acquisition comporte différents modules constitutifs (capteur, filtre, amplificateur, ...) dont l'arrangement exact et le nombre dépendent de l'application : l'assemblage de tous les VI de même granularité que leur équivalent réel constitue le niveau 3 de la chaîne d'acquisition.

Dans la chaîne virtuelle, ce niveau correspond exactement à la vue qu'aurait un utilisateur devant un cas pratique de dimensionnement. En effet, les modules sont vus comme des boîtes noires sans description précise de leur comportement interne mais avec des performances connues telles que nous pourrions les trouver dans les notices d'utilisation d'un module réel. De cette façon, il est directement possible de :

- Constituer n'importe quelle topologie de chaîne de manière simple et rapide en interconnectant les différents modules dans l'ordre désiré ;
- Evaluer comment, dans une même topologie de chaîne, le remplacement d'un module par un autre

modifie les performances générales de cette chaîne.

Pour éviter l'interconnexion de modules dont les sorties et entrées seraient incompatibles, nous avons implémenté un mécanisme implicite de vérification des unités. En effet, il serait par exemple absurde de permettre la connexion d'un module thermistance -dont le signal de sortie représente une variation de la valeur de la résistance fonction de la température- à un module amplificateur de tension -qui augmente l'amplitude d'un signal de tension présent à son entrée-. Afin d'éviter de telles erreurs, chaque entrée et sortie d'un module est pourvue en interne d'une unité rendant impossible dans LabVIEW l'interconnexion de deux VI incompatibles du point de vue dimensionnel au niveau 3. Ce mécanisme transparent pour l'utilisateur traduit bien le souci de simplicité qui a prévalu à la mise en place de ce niveau de la chaîne d'acquisition.

En marge du flux séquentiel qu'est la chaîne comme décrite jusqu'à présent, la présence d'un organe de contrôle (un microprocesseur par exemple) permet de gérer certains aspects essentiels de la synchronisation (comme l'échantillonnage de l'échantillonneur bloqueur, du convertisseur analogique numérique ...). De plus, dans le cas d'une chaîne à plusieurs voies, ce module assure la gestion temporelle du multiplexeur.

### 2.2 – Niveau 1: modélisation des modules

Le dimensionnement de chacun des composants d'une chaîne d'acquisition passe par l'étude de leurs performances respectives. Si des compromis sont à trouver parmi les larges gammes de modules proposés par les constructeurs (il suffit de regarder la diversité des catégories d'amplificateurs pour s'en convaincre), c'est qu'il n'existe pas de composant parfait au sens où ils sont définis dans les cours d'électronique : la modélisation de leur comportement et de leurs propriétés est le rôle principal du niveau 1.

A partir d'ici, nous parlerons des propriétés d'un module au sens large englobant par exemple des notions aussi différentes que le bruit thermique d'une résistance, la tension de décalage d'un amplificateur, le temps d'ouverture d'un échantillonneur-bloqueur, le bruit de quantification d'un convertisseur analogique-numérique etc.

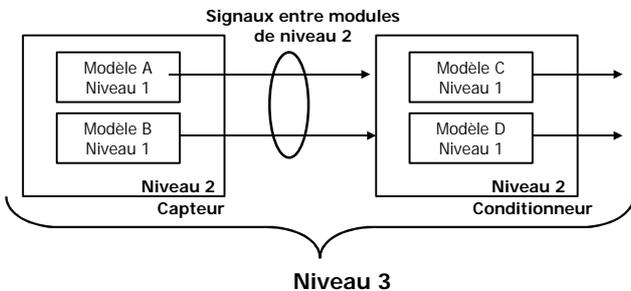
L'influence des propriétés d'un module sur la "qualité" du signal de sortie a été modélisée par une approche comportementale de manière à s'abstraire de leur origine physique exacte. Par exemple, la modélisation du slew rate (vitesse de balayage) d'un amplificateur consistera simplement en une limitation de la pente maximale du signal de sortie et non en une modélisation électrique précise des capacités internes dont la charge empêche une variation instantanée de ce même signal. A cet effet, toutes les données nécessaires à la modélisation de ces propriétés sont exclusivement extraites des notices d'utilisation des composants de ma-

nière à pouvoir reproduire fidèlement leur comportement.

### 2.3 – Niveau 2: mesure de performance

Pour résumer, nous avons jusqu'à présent introduit deux niveaux différents dans la chaîne servant d'une part à en définir la topologie et d'autre part à modéliser les imperfections inhérentes aux différents modules. Afin de fournir aux étudiants un moyen de mesurer les performances relatives de plusieurs modules de niveau 1 et de leur permettre de comprendre l'impact de leur choix sur la qualité du signal délivré par la chaîne, nous introduisons un niveau intermédiaire appelé "expérimentation".

Chaque module de niveau 2 reprend explicitement les différents modèles de niveau 1 à comparer lesquels nécessitent chacun un signal d'entrée et de sortie. Sur base du nombre de signaux transmis entre les modules de niveau 2 (via le niveau 3 cf. *fig 2*) et de leur signification, nous identifions plusieurs variantes de niveau 2.



*fig 2 : hiérarchie des 3 niveaux*

La description de ces variantes fait l'objet du chapitre suivant.

## 3 – VARIANTES DE MESURE DU NIVEAU 2

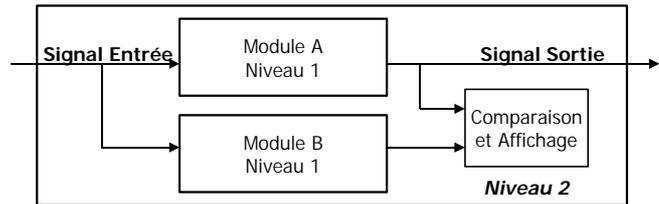
Etant donné que le nombre et la signification des signaux transitant par le niveau 2 diffèrent en fonction du type de mesure effectué, nous avons isolé quatre variantes correspondant à des problématiques bien distinctes. Cette classification présente le double avantage pour l'étudiant de devoir explicitement identifier parmi ces catégories le type de mesure qu'il cherche à effectuer et de mettre à sa disposition des formes canoniques de niveau 2 bien définies. Les quatre variantes sont définies dans la suite.

### 3.1 - La variante "comparaison locale"

Cette variante permet de comparer localement différents modules de façon quantitative (calcul de leur performance relative) et qualitative (affichage simultané des deux signaux de sortie).

La *fig 3* illustre ceci pour deux modules A et B de niveau 1 de même fonctionnalité mais aux propriétés différentes (par exemple deux convertisseurs analogique numérique de résolution différente ou deux filtres de fréquence de coupure différente). Un seul des deux modules voit son entrée et sa sortie reliées à l'extérieur de sorte qu'un signal unique se propage au niveau 3 : la

comparaison entre les modules A et B est donc bien locale.

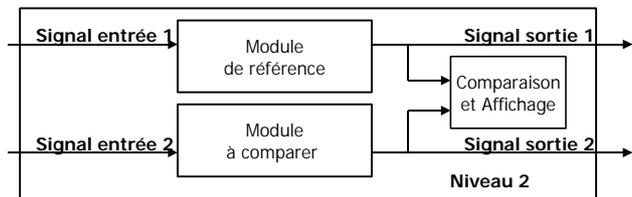


*fig 3 : comparaison locale du signal*

L'interprétation de la différence mesurée entre les deux modules dépend de leur nature respective : pour deux modules aux propriétés différentes, il s'agira simplement d'une comparaison de performance alors que dans le cas d'un module sujet au bruit et du même module non bruité, la différence sera le signal rapport à bruit.

### 3.2 - La variante "comparaison globale"

A la différence de la variante locale, la variante comparaison globale propage à travers toute la chaîne autant de signaux que de modules de niveau 1 présents dans le module de niveau 2. La *fig 4* illustre ceci dans le cas de deux modules (un de référence et un autre de comparaison) : chacun des deux signaux passe par un module de niveau 1 spécifique au sein du chaque module de niveau 2. De cette manière, nous constituons deux chaînes complètes en parallèle toutes deux soumises au même signal d'entrée issu du processus physique.



*fig 4 : comparaison globale du signal*

Tout l'intérêt de cette variante est de montrer comment l'information présente au sein du signal est dégradée au fur et à mesure de la chaîne par l'adjonction de bruit, parasites et dégradations diverses dues aux limitations des différents modules.

### 3.3 - La variante "mesure de bruit"

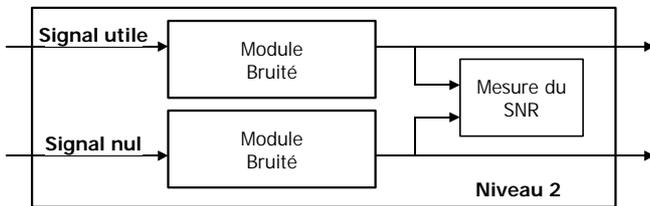
Cette variante a été introduite pour reproduire le mode opératoire lié à une mesure expérimentale du bruit. En pratique, un opérateur désirant mesurer le bruit ajouté par les modules au signal utile procéderait en deux étapes successives :

- Soumettre le signal utile provenant du capteur à la chaîne ;
- Imposer un signal nul à son entrée.

Le résultat de la première expérience aboutit au signal utile dégradé par le bruit ajouté par tous les modules par lequel il est passé alors que la deuxième donne, en l'absence de signal utile, une indication sur le bruit in-

trinsèque généré par les modules. La combinaison de ces deux résultats aboutit à une mesure liée à la puissance relative du signal utile par rapport au bruit (et sous certaines conditions au rapport signal à bruit conventionnel).

fig 5 : mesure pratique du bruit



Ce mode opératoire est exactement celui mis en place dans cette variante du niveau 2 (fig 5) à la différence près que les deux expériences se déroulent en parallèle ce qui simplifie leur comparaison et le calcul des résultats. Deux instances d'un même module soumis au bruit sont donc présentes dans chaque niveau 2 : le premier traite le signal utile au fur et à mesure de son avancement dans la chaîne alors que le second voit à son entrée un signal résultant du passage d'un signal initial nul à travers tous les modules amont.

### 3.4 - La variante "relevé de la caractéristique"

Dans une version simple d'utilisation du niveau 2, il est intéressant de pouvoir relever la caractéristique de transfert d'un module afin de mieux cerner sa fonctionnalité. Cette variante de niveau 2 un peu particulière ne fait donc transiter aucun signal vers l'extérieur.

La méthode de relevé est très simple : il suffit d'imposer au module une rampe balayant toute la gamme de valeurs d'entrée et de mettre en correspondance la valeur de sortie mesurée pour chacun de ces points.

### 3.5 - La mesure de l'erreur

Chacune des variantes de niveau 2 comporte une partie dédiée à la mesure de l'erreur entre les modules concernés. Au sein de la chaîne virtuelle, aucune restriction n'existe quant à la manière de calculer cette erreur : les différentes versions possibles sont par exemple les suivantes :

- erreur moyenne ;
- erreur quadratique ;
- erreurs extrêmes (minimum et maximum) ;
- variance ;
- rapport signal à bruit (valeur efficace du signal utile -ou somme de la valeur efficace du bruit et du signal utile selon la définition utilisée- divisée par la valeur efficace du bruit) ;
- Taux de distorsion harmonique (rapport entre la somme des énergies des harmoniques d'un signal et son énergie totale).

L'affichage permet quant à lui de représenter sur un même graphe les signaux issus des différents modules.

## 4 – CAS D'ETUDES

Afin de démontrer l'intérêt et l'applicabilité de notre formalisme, nous présentons ici deux exemples en mettant l'accent sur les problématiques spécifiques liées à l'instrumentation qu'elles permettent d'illustrer.

### 4.1 Caractéristique d'un convertisseur analogique numérique

Ce premier exemple illustre une des variantes de mesure du niveau 2 : le relevé de caractéristique sur un exemple simple de convertisseur analogique numérique (section 3.4). Comme nous pouvons l'observer (fig 6), la caractéristique d'un convertisseur 4 bits est comparée celle d'un convertisseur "parfait" (soit une droite de pente unitaire).

Les différents paramètres de réglage sont les suivants : nombre de bits du convertisseur, décalage de la caractéristique (exprimé en LSB), erreur de gain (pente non unitaire) et erreur de linéarité (définie dans cette version simplifiée comme l'écart maximum relatif entre la caractéristique linéaire et non-linéaire).

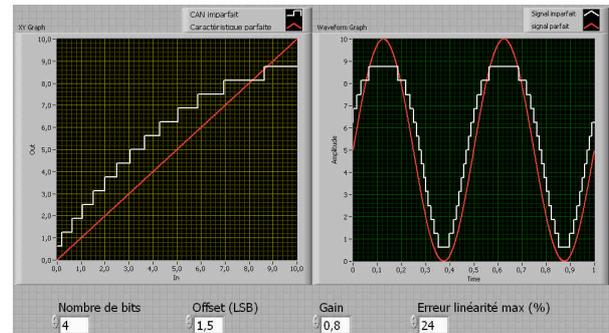


fig 6 : Caractéristique d'un convertisseur analogique numérique et allure du signal de sortie numérisé

Cette application pourtant très simple à programmer permet d'illustrer la fonctionnalité d'un convertisseur analogique numérique de même que les erreurs principales dont il souffre et la manière dont elles agissent sur la caractéristique de sortie. Afin de visualiser encore mieux ceci, il est possible de mettre en parallèle la caractéristique du convertisseur avec l'allure d'un signal sinusoïdal qui serait quantifié en amplitude après son passage dans ce même convertisseur (partie droite de la fig 6).

Lorsque la simulation fonctionne de manière continue, l'étudiant peut modifier de manière interactive les paramètres et voir la caractéristique se modifier en temps réel.

### 4.2 Chaîne d'acquisition simple

Dans cet exemple, nous construisons au niveau 3 une chaîne d'acquisition simple constituée d'un capteur délivrant une tension sinusoïdale suivi d'un amplificateur de tension, d'un filtre passe-bas et enfin du convertisseur analogique numérique présenté précédemment. Le niveau 2 est quant à lui basé sur la variante "comparaison globale" (section 3.2) : deux signaux transitent à

travers tous les modules de la chaîne, le premier étant issu d'un capteur dont la sortie est une sinusoïde parfaite, le second étant la même sinusoïde à laquelle nous ajoutons un niveau de bruit réglable. A la sortie de chacun des blocs, nous pouvons donc mesurer le rapport signal à bruit et voir comment celui-ci évolue en fonction des traitements que subit le signal tout au long de la chaîne. Différents phénomènes intéressants en instrumentation peuvent ainsi facilement être observés et quantifiés sur base de cet exemple :

- Le rapport signal à bruit augmente avec l'ajout du filtre passe-bas qui atténue le bruit, ce qui permet de quantifier le gain de cette solution par rapport à la version sans filtre.
- Lorsqu'un signal bruité est converti en numérique, il n'est pas nécessaire d'avoir un pas de quantification inférieur à l'amplitude du bruit: en effet au delà d'une certaine résolution, les bits les moins significatifs n'apportent plus d'information sur le signal utile mais fluctuent seulement à cause du bruit. A amplitude de bruit donnée, notre exemple illustre ce phénomène : une augmentation du nombre de bits du convertisseur fait croître le rapport signal à bruit de manière à tendre vers le rapport signal à bruit du signal à son entrée ; lorsqu'il y a égalité, le convertisseur est correctement dimensionné.
- Le fait d'amplifier un signal initialement bruité n'augmente pas la quantité d'information qu'il contient (puisque le signal et le bruit sont amplifiés de la même manière) et donc la valeur de son rapport signal à bruit à la sortie de l'amplificateur, d'où l'utilité de limiter un maximum le bruit dans les premiers étages d'amplification.
- Le choix du gain de l'amplificateur s'opère de manière à ce que le signal entrant dans le convertisseur analogique numérique exploite un maximum de la plage de conversion. Notre simulation nous montre en effet qu'une diminution du gain par rapport à la valeur optimale occasionne une diminution du rapport signal à bruit.

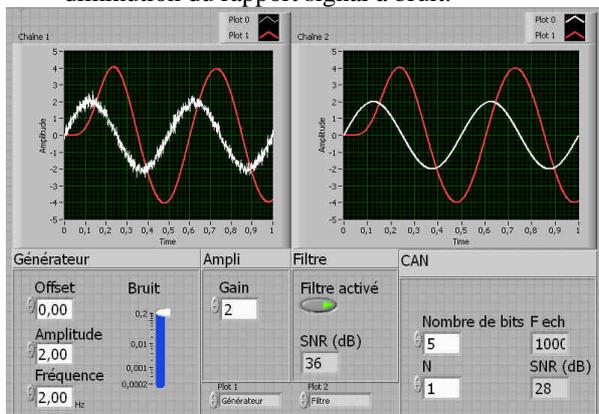


fig 7 : Exemple de chaîne d'acquisition virtuelle

## 5 - CONCLUSIONS ET TRAVAIL FUTUR

Dans cet article, nous avons présenté d'importantes améliorations à notre chaîne d'acquisition virtuelle sur LabVIEW développée pour l'apprentissage de l'instrumentation. Nous avons introduit un formalisme à trois niveaux permettant :

- la mise en place d'une chaîne d'acquisition de manière flexible et rapide
- la modélisation des imperfections d'un module
- la mesure de la qualité d'un signal de même que la représentation de la caractéristique d'un module.

L'intérêt de ce formalisme a ensuite été illustré sur deux exemples concrets à savoir la caractéristique d'un convertisseur analogique numérique et une chaîne d'acquisition simple.

Dans l'avenir, les améliorations de la chaîne d'acquisition porteront sur les points suivants :

- Introduction de problématiques liées à la compatibilité électromagnétique (couplage magnétique et galvanique, câblage des masses,...)
- Utilisation de la chaîne virtuelle pour le dimensionnement d'une chaîne réelle
- Enrichissement des bibliothèques de module

## 6 – BIBLIOGRAPHIE

1. F. Robert, C. Boey Conception d'une chaîne d'acquisition virtuelle à but didactique In *proceedings of CETIS 2003* (November, 13-14, 2003, Toulouse)
2. G. Asch et al., "Les capteurs en instrumentation industrielle", Dunod, Paris, 1999, ISBN 2-1000-4758-2
3. John G. Webster et al., "The measurement, instrumentation and sensors handbook", CRC Press LLC, 1999, ISBN 0-8493-8347-1
4. <http://www.ni.com/labview/>