

## Apprentissage par projet :

# L'utilisation conjointe de chaînes d'acquisition réelle et virtuelle pour enseigner l'instrumentation

Antoine Nonclercq, Kevin De Cuyper, Erwan Leroy, David Lopez Martinez, Frédéric Robert  
Université Libre de Bruxelles  
Bio, Electro and Mechanical Systems (BEAMS), CP165/56  
Avenue F.D. Roosevelt 50, B1050 Bruxelles (Belgique)  
{anoncler, kedecuyper, eleroy, dlopezma, frobert}@ulb.ac.be

**RESUME :** L'apprentissage par projet a été choisi pour les laboratoires du cours d'instrumentation. Deux chaînes d'acquisition ont été conçues de manière à fournir aux étudiants deux outils les aidant à réaliser leur projet. La première est une chaîne d'acquisition virtuelle permettant une compréhension rapide et globale des principaux problèmes de l'instrumentation. La seconde est une chaîne modulaire réelle qui permet de les concrétiser facilement. L'impact pédagogique du laboratoire – et en particulier des deux chaînes d'acquisition – a été évalué grâce à un questionnaire d'appréciation remis aux étudiants. Il a permis de conclure que les étudiants ont apprécié le laboratoire.

**Mots clés :** instrumentation, chaîne d'acquisition, simulation, apprentissage par projet

## 1 INTRODUCTION

### 1.1 L'instrumentation

L'instrumentation est une discipline fort répandue chez les ingénieurs : 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 transducteur transforme la grandeur physique désirée en une grandeur électrique "brute" (courant, charge, tension, impédance, ...).

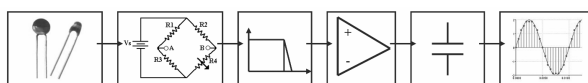


fig 1 : Une chaîne d'acquisition

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 L'apprentissage par projet

L'apprentissage par projet a été choisi comme type de pédagogie pour les laboratoires du cours d'instrumentation donné dans différentes sections des deux dernières années de la formation (2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> année de master) à l'Ecole Polytechnique de l'Université Libre de Bruxelles.

Le projet proposé aux étudiants consiste à prendre la place d'experts d'instrumentation biomédicale. Les étudiants doivent, par groupe de trois, répondre à la demande d'une entreprise externe qui désire renouveler son électrocardiogramme (ECG) actuel, dont le tracé est obtenu sur papier, par un nouveau dispositif numérique. Quelques informations de base sont données, tant sur les spécifications de l'ECG actuel que sur celles du nouvel ECG. Le problème reste toutefois ouvert et le cahier des charges volontairement peu défini.

Cette approche rentre dans le cadre de l'apprentissage par projet à plus d'un titre :

- Le problème posé est large et en rapport avec la vie quotidienne. En effet, l'instrumentation médicale est une des branches les plus complexes de ce domaine. Réaliser un ECG est une tâche concrète, réaliste et que les étudiants peuvent visualiser ; c'est aussi une des tâches qu'un ingénieur peut être amené à réaliser au cours de sa carrière.
- Le projet utilise une technologie actuelle. Les étudiants sont amenés à utiliser des outils récents (LabVIEW par exemple, voir plus bas) et la qualité de l'ECG proposé par les étudiants doit être comparable à celle d'un ECG du marché.
- Le projet est dirigé par les étudiants. En effet, ceux-ci, sont totalement autonomes et prennent en charge leur emploi du temps.
- Les étudiants travaillent par groupe de trois et peuvent demander l'avis d'un « ingénieur senior », c'est-à-dire un superviseur.
- Le projet est multidisciplinaire. Réaliser un ECG requiert la maîtrise de différentes compétences, comme l'instrumentation, l'électronique et, pour pouvoir le mettre dans son contexte, la physiologie.

- Le projet se réalise sur une période relativement longue, à savoir 4 périodes de 4 heures.
- Le projet est centré sur le résultat final. L'évaluation se fait sur base de la proposition finale des étudiants. Les étudiants défendent leur projet lors d'une présentation orale à la fin des quatre séances.

### 1.3 Les deux chaînes d'acquisition

Deux chaînes d'acquisition ont été conçues de manière à fournir aux étudiants deux outils qu'ils peuvent utiliser comme bon leur semble.

Le premier outil est une chaîne d'acquisition virtuelle ([1] et [2]) qui permet de simuler l'ensemble du processus d'acquisition sous LabVIEW. Celle-ci offre les possibilités suivantes:

- choisir des modules existants dans une librairie,
- modifier les modules existants ou développer ses propres modules,
- assembler les modules pour former une chaîne d'acquisition complète,
- visualiser le signal et mesurer la qualité de celui-ci en tout point de la chaîne,
- modifier en fonctionnement les propriétés de chaque module et voir l'impact de ces modifications sur la qualité du signal (interactivité).

Le second outil est une chaîne d'acquisition modulaire réelle qui permet de réaliser concrètement la plupart des configurations modélisées virtuellement. Elle permet de choisir des modules existants, de les assembler pour former une chaîne complète et de visualiser le signal à sa sortie. La visualisation du signal obtenu se fait sous Matlab. Il est aussi envisagé d'utiliser LabVIEW, de manière à pouvoir comparer les deux chaînes dans le même programme.

Nous pensons que les deux chaînes sont complémentaires. Une chaîne d'acquisition peut être, en premier lieu, modélisée afin de visualiser rapidement le signal obtenu et par la suite implémentée grâce aux modules matériels fournis, de manière à affiner les résultats, à confronter les étudiants avec des effets qui ne sont pas modélisés et à leur montrer que le signal idéal n'existe pas dans le monde réel. La chaîne d'acquisition virtuelle permet donc une compréhension rapide et globale des principaux problèmes de l'instrumentation et la chaîne modulaire permet de les concrétiser plus facilement que lors d'un laboratoire classique. De plus, la chaîne modulaire familiarise l'étudiant avec le processus de réalisation d'une chaîne d'acquisition réelle.

## 2 INTERET PÉDAGOGIQUE

### 2.1 Objectifs pédagogiques du laboratoire

Le laboratoire a pour objectifs de permettre aux étudiants de proposer des solutions de qualité à un problème complexe, de les défendre grâce à des arguments solides, d'exercer leur esprit critique et enfin de mettre en évidence les liens pertinents entre le problème posé et la théorie générale de l'instrumentation.

Pour ce faire, le laboratoire vise à faire travailler les étudiants sur des hauts niveaux cognitifs, c'est-à-dire [3]:

- l'analyse (identifier et organiser des éléments),
- l'évaluation (émettre un jugement basé sur des critères explicites),
- la création (mettre des éléments ensemble pour former un tout cohérent et fonctionnel, réorganiser les éléments dans une nouvelle structure).

### 2.2 Intérêt pédagogique des deux chaînes

De manière générale, les deux chaînes d'acquisition permettent aux étudiants:

- de visualiser et de comprendre de manière aussi intuitive que possible les phénomènes clés de l'instrumentation (bruit, amplification, filtrage, échantillonnage, quantification, séquençage des opérations, repliement spectral, etc.) ainsi que les relations existant entre les différents modules de la chaîne,
- de construire leur propre chaîne d'acquisition en réponse à un cahier des charges donné par l'enseignant et d'évaluer eux-mêmes la qualité des solutions qu'ils proposent.

Dans le cadre de l'apprentissage par projet, les étudiants sont amenés à utiliser différents concepts de base de manière à construire un projet complexe. De même, les deux chaînes d'acquisition permettent aux étudiants d'utiliser des modules simples pour construire une chaîne d'acquisition complexe. La conception du laboratoire rentre donc bien dans le cadre de l'apprentissage par projet.

De plus, ces deux chaînes sont des outils que les étudiants utilisent comme bon leur semble et de manière ouverte. Il n'est jamais prévu, par exemple, de leur faire suivre un chemin prédéfini. De cette manière, les chaînes d'acquisition permettent de laisser une marge de manœuvre suffisante aux étudiants, ce qui rentre aussi dans les critères de l'apprentissage par projet.

Enfin, les deux chaînes d'acquisition permettent de se focaliser sur la fonctionnalité des modules plutôt que d'avoir à les concevoir et à les réaliser. Outre le coût et les problèmes pratiques que représenterait une telle réalisation, elle demanderait aussi un temps important

lors du laboratoire. Les deux chaînes d'acquisition permettent d'attribuer ce temps de manière plus ciblée aux objectifs définis au paragraphe 2.1.

### 3 LA CHAÎNE D'ACQUISITION VIRTUELLE

La chaîne d'acquisition virtuelle est un outil de simulation permettant de modéliser rapidement une chaîne complexe à base de modules simples.

#### 3.1 Avantages

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, convertisseurs et autres conditionneurs existants [4,5]. Notre outil se focalise 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 modules trouvant leur 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 aisément isoler certains facteurs de dégradation du signal, ce qui serait impossible 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.

#### 3.2 Les trois niveaux de formalisme

La chaîne d'acquisition virtuelle est structurée suivant un formalisme à trois niveaux. Ils se divisent de la manière suivante :

- *Niveau 3 : assemblage de la chaîne*  
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.
- *Niveau 1 : modélisation des modules*  
Le dimensionnement de chacun des compo-

sants 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.

- *Niveau 2 : mesure des performances*  
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".

### 4 LA CHAÎNE D'ACQUISITION REELLE

Bien entendu, une simulation ne peut remplacer un travail sur dispositif réel. En complément de la chaîne d'acquisition virtuelle, les étudiants ont à leur disposition une chaîne d'acquisition réelle modulaire. Celle-ci permet d'affiner les résultats et de confronter les étudiants avec des effets qui ne sont pas modélisés.

Les différents modules disponibles sont décrits ci-dessous. Un exemple de la chaîne est montré à la fig 2.

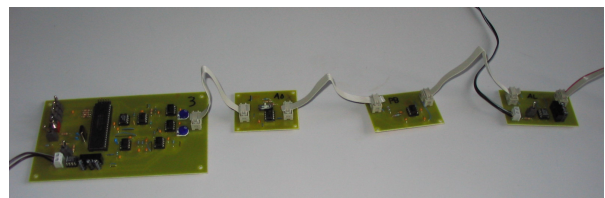


fig 2 : Exemple de modules de la chaîne

#### 4.1 Le générateur de signaux ECG

Afin de fournir le signal d'entrée de la chaîne, un générateur de signaux a été conçu. Il permet de générer un sinus ou un signal ECG typique (10mV crête-à-crête). De plus, il est possible d'ajouter au signal différentes composantes :

- des parasites – représentant ici le parasitage dû au réseau à 50Hz –, de manière à pouvoir montrer aux étudiants qu'un SNR (rapport signal sur bruit) infini est inatteignable et que la chaîne d'acquisition doit être dimensionnée en tenant compte du bruit d'entrée sur le signal
- un offset – représentant l'offset physiologique –, qui permet de montrer aux étudiants que l'amplification du module d'entrée est le fruit d'un compromis entre un bon SNR et une absence de saturation du signal

- du mode commun – représentant la tension de l'électrode de référence – de manière à montrer aux étudiants son impact sur la qualité du signal.

#### 4.2 Les amplificateurs et les filtres

Divers éléments de conditionnement du signal sont mis à disposition des étudiants. Ces éléments sont :

- deux amplificateurs à gain ajustable (5, 20 ou 100)
- un amplificateur d'instrumentation (différentiel) à gain ajustable (2, 11 ou 101)
- un filtre passe-bas d'ordre 2 et de fréquence de coupure égale à 90Hz.
- un filtre passe-haut d'ordre 2 et de fréquence de coupure égale à 0.16Hz

De par la nature modulaire de l'ensemble, ceux-ci peuvent être placés à n'importe quel maillon de la chaîne d'acquisition. Ceci permet aux étudiants de trouver une combinaison « optimale » des modules qui leur permettra d'obtenir au final un signal propre et de bonne qualité. Selon la nature du signal d'entrée du générateur, la solution peut être différente.

En marge de ces modules de traitement, il appartient également aux étudiants de placer un module permettant d'alimenter l'ensemble de la chaîne. Selon son emplacement, des bruits plus ou moins importants peuvent être observés sur le signal de sortie.

#### 4.3 La carte d'acquisition

Les étudiants ont à leur disposition une carte d'acquisition permettant de digitaliser le signal et de le rapatrier vers le PC.

### 5 IMPACT PÉDAGOGIQUE

L'impact pédagogique du laboratoire – et en particulier des deux chaînes d'acquisition – a été évalué grâce à un questionnaire d'appréciation qui a été remis aux étudiants. De plus, les notes attribuées aux étudiants ont été prises en compte. Enfin, lors de l'examen écrit (fin juin 2008), une évaluation de la répartition des résultats en fonction du niveau de processus cognitif demandé sera effectuée.

L'évaluation a été effectuée sur les étudiants de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> année de master ayant participé au projet. Le nombre d'étudiants était de 50.

Ces deux évaluations permettent de déterminer dans quelle mesure les objectifs définis aux paragraphes 2.1 et 2.2 ont été atteints. De manière synthétique, ces objectifs peuvent se diviser en deux catégories :

- les deux chaînes d'instrumentations doivent aider l'étudiant à visualiser les concepts d'instrumentation, être simple d'utilisation, interactives, complètes et complémentaires.

- le laboratoire vise à faire travailler les étudiants sur des hauts niveaux cognitifs et à leur donner de nouvelles compétences d'expert tout en passant un minimum de temps sur des tâches de mise en œuvre de modules de base.

#### 5.1 Le questionnaire d'appréciation

La table 1 reprend la liste des questions posées aux étudiants ainsi que la note moyenne donnée par ceux-ci.

Il leur a été demandé de donner une note d'appréciation entre 1 et 5 ; '1' correspondant à un profond désaccord, '3' à un avis neutre et '5' à un accord total.

| Critère   | Note |
|---|------|
| <i>La chaîne d'acquisition virtuelle</i>  |      |
| m'a aidé à visualiser des concepts d'instrumentation  | 3,9  |
| est facile d'utilisation  | 3,5  |
| est interactive   | 3,5  |
| est complète  | 3,0  |
| est un outil globalement utile  | 3,9  |
| <i>La chaîne d'acquisition modulaire</i>  |      |
| m'a aidé à visualiser des concepts d'instrumentation  | 4,0  |
| est facile d'utilisation  | 4,3  |
| est interactive   | 4,2  |
| est complète  | 3,8  |
| est un outil globalement utile  | 4,2  |
| <i>Les deux chaînes d'acquisition</i>   |      |
| m'ont permis de visualiser rapidement des concepts (grâce à la chaîne virtuelle) et d'aller plus en détail (grâce à la chaîne hardware) | 3,9  |
| sont complémentaires  | 3,9  |
| m'ont permis de gagner du temps par rapport aux outils d'un laboratoire classique   | 3,8  |
| m'ont aidé à comprendre les principes d'instrumentation   | 4,3  |
| m'ont aidé à mettre en œuvre une chaîne d'acquisition   | 4,1  |
| m'ont aidé à analyser les différents modules et interactions  | 4,1  |
| m'ont aidé à évaluer la qualité d'une chaîne d'acquisition  | 4,0  |
| <i>Le laboratoire</i>   |      |
| m'a permis de développer des nouvelles compétences  | 3,8  |
| m'a permis de passer moins de temps à des tâches moins intéressantes  | 4,0  |
| est une approche nouvelle pour un laboratoire   | 4,2  |
| m'a apporté plus qu'un laboratoire traditionnel   | 4,1  |
| était globalement bon   | 4,1  |

table 1 : Questionnaire rendu aux étudiants

De manière générale, les étudiants ont apprécié le laboratoire (la note globale du laboratoire est de 4,1 et la moyenne sur les questions vaut 3,9), et ce, de manière relativement identique pour tous les points (l'écart type vaut 0,3).

Ce questionnaire permet aussi de prendre en compte les remarques des étudiants dans le but d'améliorer le laboratoire.

En ce qui concerne les deux chaînes d'acquisitions (et principalement pour la chaîne d'acquisition virtuelle), le principal reproche des étudiants est qu'elles ne sont pas complètes.

Un module additionnel de génération du signal a été réalisé pour la chaîne d'acquisition virtuelle de manière à pallier ce manque. Les modules de gain et filtres variables seront réalisés prochainement pour compléter la chaîne modulaire réelle. Les deux chaînes d'acquisitions devraient être complètes lors du prochain laboratoire proposé aux étudiants en 2008/2009.

Les points les plus positifs de la chaîne d'acquisition virtuelle sont son utilité globale et son aide à visualiser les principes d'instrumentation. Celui de la chaîne d'acquisition modulaire est sa facilité d'utilisation. Cela correspond bien avec l'intérêt pédagogique voulu au point 2.1. L'utilisation conjointe des deux chaînes a manifestement été d'une grande aide dans la compréhension des principes d'instrumentation, ce qui correspond bien au premier objectif pédagogique du point 2.2.

Les étudiants ont globalement apprécié le laboratoire et ont estimé qu'il s'agissait là d'une approche nouvelle.

## 5.2 Les résultats obtenus par les étudiants au laboratoire

Les critères de cotations sont répartis en quatre volets :

- Le respect des consignes (l'échéance est respectée, les consignes de présentation sont respectées).
- Le contenu (l'objectif technique du projet est globalement atteint, les solutions proposées sont de bonne qualité, une discussion suffisante des diverses solutions est présente, l'argumentation est adéquate/le groupe fait preuve d'esprit critique, les liens entre théorie de l'instrumentation et solution proposée sont clairs et corrects).
- La présentation (le support de présentation est adéquat et bien utilisé, les explications sont claires et bien structurées).
- La méthodologie (le groupe est capable de formuler la méthodologie suivie, la méthodologie est adéquate, tous les membres du groupe ont un niveau de maîtrise équivalent).

- Les réponses aux questions (les réponses apportées sont claires et adéquates).

La moyenne réalisée par les étudiants au laboratoire est de 14/20, avec un écart type de 3. Les étudiants ont donc réussi à présenter leur projet en défendant leurs solutions grâce à une bonne argumentation. Ceci est donc un point positif par rapport aux objectifs pédagogiques fixés au point 2.1 et au deuxième objectif du point 2.2.

## 6 CONCLUSIONS

Le laboratoire d'instrumentation a permis aux étudiants de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> année de master qui y ont participé de réaliser un projet à l'aide de deux chaînes d'acquisition : l'une virtuelle – permettant une compréhension rapide et globale des principaux problèmes de l'instrumentation – et l'autre réelle et modulaire – leur permettant de les concrétiser facilement.

Les résultats obtenus par les étudiants ont été globalement bons, ce qui montre qu'ils ont pu répondre au problème posé, proposer des solutions de qualité, les défendre grâce à des arguments solides, faire preuve d'esprit critique et mettre en évidence les liens pertinents entre le problème posé et la théorie générale de l'instrumentation.

De plus, le dépouillement du questionnaire d'évaluation a mis en évidence que les étudiants ont largement apprécié la nouvelle formule de laboratoire. En outre, les deux chaînes d'acquisition leur ont permis de comprendre et d'illustrer les principes de base de l'instrumentation.

On peut donc conclure que les objectifs visés lors de la conception de ce laboratoire ont été globalement atteints.

## Bibliographie

- [1] F. Robert, C. Boey, "Conception d'une chaîne d'acquisition virtuelle à but didactique", *Actes du 6<sup>ème</sup> Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes (CESTIS-EEA'03), Toulouse (France), Novembre 2003.*
- [2] A. Vander Biest, C. Boey, A. Nonclercq, F. Robert, "Développement d'une chaîne d'acquisition virtuelle suivant un formalisme à trois niveaux", *Actes du 8<sup>ème</sup> Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes (CESTIS-EEA'03), Nancy (France), Octobre 2005.*
- [3] L. Anderson, and D. Krathwohl, "A taxonomy for learning, teaching and assessing: a revision of Bloom's taxonomy of educational objectives", *abridged edition ed. Addison Wesley Longman, 2001.*
- [4] G. Asch et al., "Les capteurs en instrumentation industrielle", *Dunod, Paris, 1999, ISBN 2-1000-4758-2*
- [5] J. G. Webster et al., "The measurement, instrumentation and sensors handbook", *CRC Press LLC, 1999, ISBN 0-8493-8347-1*