

Du sang neuf pour l'enseig

VALÉRIE PÉREZ ET PHILIPPE BONTEMPS^[1]

Avec la mise en place de la filière STI2D se pose la question du choix des nouveaux équipements didactiques, en particulier pour le laboratoire d'étude des systèmes en enseignement transversal. On les souhaite représentatifs de la technologie actuelle, recouvrant les trois domaines matière, énergie et information, facilement observables et accessibles financièrement. Autant de qualités qui rendent leur sélection complexe. Le salon Educatec 2011 nous permettra de rencontrer les éditeurs de matériels pour mieux faire notre « marché ». L'Hemomixer présenté ici fera partie des produits exposés.

Les modalités d'enseignement en STI2D privilégient les activités pratiques d'analyse de systèmes techniques réels et actuels ainsi que le projet. Et la mise en œuvre du programme implique d'associer étroitement l'observation du fonctionnement et des solutions constructives d'un système, l'expérimentation et la simulation de tout ou partie du système ainsi que le raisonnement théorique pour l'exploitation et la compréhension des résultats.

L'Hemomixer fait partie de la catégorie des systèmes réels, mis à disposition dans le pôle « étude des systèmes » pour l'enseignement transversal. La fonction d'usage facilement abordable et l'identification aisée des chaînes fonctionnelles et structurelles facilitent la mise en œuvre des activités d'observation, d'expérimentation, de configuration et d'analyse technologique.

Un produit mécatronique de santé publique

L'Hemomixer est un automate de prélèvement sanguin dédié aux collectes mobiles **1**. Il existe deux méthodes pour effectuer une collecte mobile de dons du sang : utiliser un véhicule spécifique – un camion de collecte – qui se rend sur le lieu de prélèvement, ou mettre en place au sein d'un lieu public (école, salle des fêtes...) ou privé, une structure de collecte pour une journée ou une demi-journée.

[1] Respectivement, professeure agrégée de génie mécanique au lycée Voillaume d'Aulnay-sous-Bois (93), et responsable technique chez Didastel. Courriel : p.bontemps@didastel.fr.

mots-clés
équipement
didactique, lycée
technologique,
travaux
pratiques



1 L'automate dans son contexte

Dans les deux cas, il est nécessaire que l'automate de prélèvement soit compact, rapide à mettre en œuvre et autonome en énergie (absence de câbles d'alimentation au sol).

L'Hemomixer répond parfaitement à ce cahier des charges. Il est conçu et fabriqué en France par la société Hemopharm (www.hemopharm.fr), leader français pour la fourniture de

matériel de collecte fixe ou mobile, qui développe son activité commerciale dans plus de 25 pays en Europe, en Afrique, au Moyen-Orient et en Amérique latine. Trois mille unités sont produites actuellement par an.

La richesse technologique du support

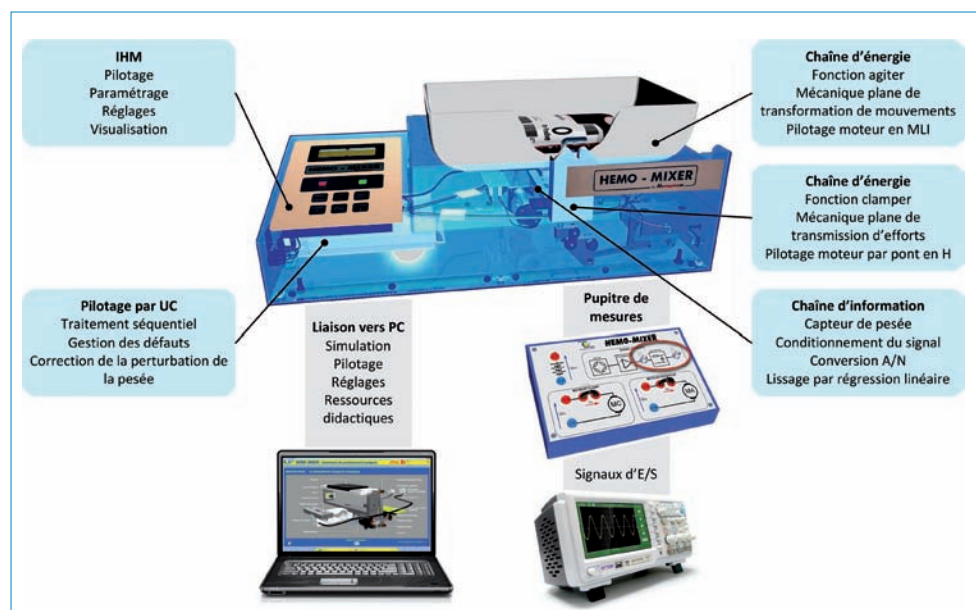
Ce produit est riche d'un grand nombre de technologies les plus fréquentes sur les produits mécatroniques manufacturés **2**. Son intérêt pédagogique réside dans le fait qu'il est produit industriellement, mais pas en très grande série. Par conséquent son intégration, non optimisée, rend sa technologie très visible et donc facilement observable par les élèves.

Dans l'Hemomixer, on identifie aisément deux principaux sous-ensembles fonctionnels (ou chaînes d'énergie) **3** : « peser et agiter le prélèvement », et « clamber la tubulure ».

La fonction « peser et agiter le prélèvement »

Elle est constituée de deux parties distinctes :

- un dispositif mécanique de type « quatre barres » transformant le mouvement de rotation d'un motoréducteur



2 La technologie variée et très observable de l'automate

nement technologique

en un mouvement oscillant transmis au plateau d'agitation. Cette agitation permet de mélanger l'anticoagulant – déjà présent dans la poche – au sang prélevé sur le donneur. La fréquence d'agitation est de 10 oscillations par minute. La carte électronique « agitation » est équipée d'un émetteur-récepteur infrarouge qui détecte la position horizontale du plateau ;

- **un capteur de pesage** à jauges de déformation embarqué sur le dispositif mécanique qui supporte le plateau d'agitation. Ce capteur permet de connaître et contrôler le volume prélevé, après qu'un traitement de l'information a été effectué pour convertir le poids mesuré en volume.

→ Le point de vue pédagogique

Cette chaîne fonctionnelle, avec cette conception singulière où le mécanisme oscillatoire embarque la jauge de contrainte, génère dans la mesure une perturbation causée par le transfert de masse durant le mouvement oscillatoire. Cette architecture nécessite donc un traitement particulier, très intéressant à faire étudier aux élèves, au niveau de la commande pour réguler le volume de sang à prélever au donneur.

Les compétences abordées en TP sur la chaîne d'énergie « agitation » sont :

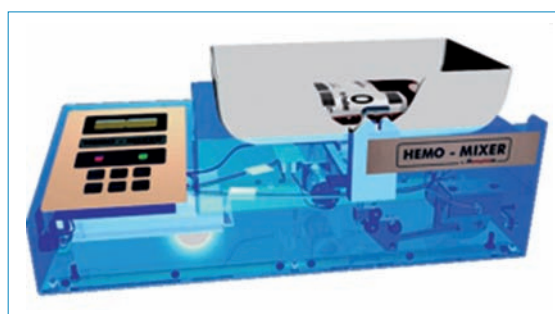
- la caractérisation des liaisons mécaniques de la chaîne cinématique ;
- la relation entre les mouvements, la déformation du corps d'épreuve de la jauge et les efforts.

La fonction

« clamber la tubulure »

Elle est constituée de deux éléments distincts :

- **un dispositif mécanique** proche du type bielle-manivelle (la bielle étant un ressort) transformant le mouvement de rotation du motoréducteur en un mouvement linéaire alternatif transmis à la tige de clamping. La force de serrage du clamp est limitée par le ressort présent dans la chaîne



3 Une identification aisée des chaînes fonctionnelles

cinématique, et la valeur du serrage est fonction du coefficient de raideur de ce ressort ;

- **un dispositif de détection** constitué de deux couples émetteurs-récepteurs infrarouges et permettant de connaître les trois positions possibles du clamp (haut pour libérer le tube flexible, milieu pour rendre le tube flexible captif et bas pour pincer ou clamber le tube).

→ Le point de vue pédagogique

Cette chaîne fonctionnelle de clamping est réalisée par un mécanisme plan, ce qui rend son étude par des élèves de première aisée. De plus, la solution est originale, avec une bielle réalisée par un ressort de limitation d'effort.

Les connaissances abordées en TP sur la chaîne d'énergie « clamber » concernent l'équilibre des solides : la modélisation des liaisons de la chaîne cinématique, les actions mécaniques, le principe fondamental de la statique et la résolution d'un problème de statique plane.

La motorisation

Deux moteurs courant continu 2,5 W à réducteur à pignons droits alimentés en 8 V assurent les mouvements d'agitation et de clamping.

Deux sens de marche sont nécessaires pour le clamping : le moteur est commandé par un pont en H directement alimenté par la tension batterie.

L'agitation ne nécessite qu'un seul sens de rotation du moteur : un régulateur, piloté en TOR par une sortie

on/off du microcontrôleur, alimente le moteur. Une deuxième sortie du microcontrôleur pilote un Mosfet qui force la mise en court-circuit du moteur à l'arrêt et assure une fonction de freinage pour maintenir la position horizontale (le moteur en court-circuit se transforme en génératrice à courant de Foucault).

La chaîne d'information

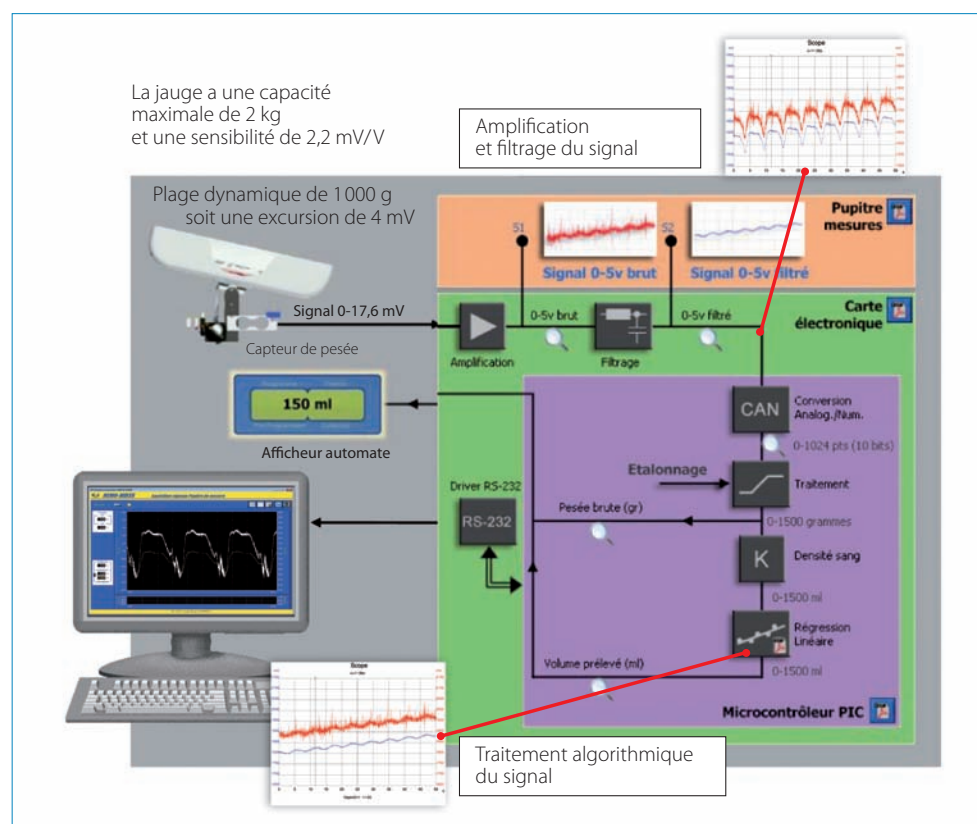
L'automate doit garantir une précision de la pesée de 4 ml en statique et de 2 % en agitation.

Le capteur de pesée a une capacité maximale de 4 kg et une sensibilité de 2,2 mV/V. Dans le cas de l'Hemo-mixer, le capteur est utilisé sur une plage dynamique de 1 000 g, soit une excursion de 4,4 mV. Ce signal de pesée est amplifié puis filtré (filtre RC) afin d'avoir une excursion suffisamment précise sur le convertisseur AN de 10 bits du microcontrôleur 4. Un potentiomètre (réglé en production) permet d'ajouter un *offset* pour effectuer le réglage du zéro afin de faire coïncider la dynamique de pesée dans la plage 0-5 V du microcontrôleur et donc de compenser le poids de l'étrier, du support de plateau et du plateau. Une calibration permet de déterminer un paramètre enregistré en EEPROM qui sert à convertir directement le résultat du convertisseur analogique-numérique (CAN) en millilitres en intégrant un coefficient K correspondant à la densité du sang (1,06 ml/gr).

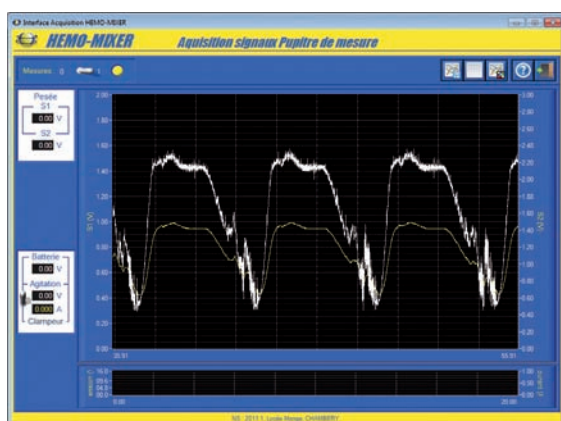
Par l'intermédiaire de l'afficheur de l'automate ou de l'interface PC (via le *driver* RS232 intégré à la carte), deux informations sont alors disponibles : la mesure de pesée brute en grammes ; le volume de liquide prélevé en millilitres obtenu après correction de la perturbation par régression linéaire pendant la phase de prélèvement.

→ Le point de vue pédagogique

Les connaissances abordées en TP sur la chaîne d'information sont les suivantes :



4 La chaîne d'information « pesée » avec conditionnement et traitement du signal



5 Le signal de pesée avant et après filtrage



6 Le logiciel ressources

de prélèvement et la commande du cycle de prélèvement.

Une didactisation poussée

L'intérêt de l'étude d'un système réel ne vaut que si son fonctionnement est observable, si les grandeurs physiques caractéristiques sont mesurables, si les paramètres de fonctionnement sont modifiables et si les algorithmes de commande du système sont reprogrammables.

Un soin particulier a été apporté à la réponse à ces exigences, par la possibilité de s'interfacer avec le système, le développement d'outils logiciels pertinents et la fourniture d'un pupitre de mesures **2**.

L'observation du fonctionnement du système est possible grâce à un fond en Plexiglas transparent permettant de voir la jauge de contrainte et les deux mécanismes en mouvement.

Le pupitre de mesures, qui peut être équipé d'une carte d'acquisition numérique National Instruments, permet l'acquisition du signal de pesée amplifié avant et après filtrage ainsi que la mesure du courant et de la tension des deux moteurs CC. Un logiciel d'acquisition a été développé spécifiquement pour ces mesures **5**. La mesure par oscilloscope sur douilles BNC en façade du pupitre reste possible quelle que soit la version du pupitre.

Un logiciel ressources interactif avec navigation intuitive propose de multiples aides multimédias à la présentation et à la compréhension de la technologie ainsi qu'un guide interactif pour la mise en œuvre du système [6](#). On accède ainsi à une description fonctionnelle complète en vue 3D à partir d'un éclaté, une identification de tous les sous-ensembles constitutifs du système, une description détaillée de chaque sous-ensemble fonctionnel avec animations 3D, un synoptique complet de la chaîne d'information et de traitement du signal avec une représentation de l'évolution temporelle du signal, aux synoptiques complets des chaînes d'énergie avec schémas de principe et schémas structurels complets, aux graphes d'états et algorithmes du process interactifs, à la description SysML complète.

- Capteurs : approche qualitative des capteurs, grandeur mesurée et grandeurs d'influence (parasitage, sensibilité, linéarité);
- Conditionnement et adaptation du capteur à la chaîne d'information, échantillonnage, blocage;
- Filtrage de l'information : types de filtres (approche par gabarit).

Le point fort du système, c'est le capteur de pesée dynamique avec échantillonnage, traitement de l'information, filtrage et calcul de l'information utile avec des activités élèves possibles tout le long de la chaîne d'information.

L'alimentation en énergie et l'IHM

La batterie NiMH (nickel-hydrure métallique), 10 éléments, 12 V, 3,8 Ah, assure une autonomie de 74 heures grâce à une gestion de l'énergie faite par le microcontrôleur (réf. PIC18F4520-I/P) et identifiable sur les graphes d'état.

Le système est équipé d'une interface homme-machine (IHM) à clavier tactile permettant le paramétrage de l'appareil, le réglage de la séquence

Un troisième logiciel de type IHM est fourni. Connecté au système via un port RS232 ou USB, il permet l'accès aux réglages des paramètres et du cycle de fonctionnement, le forçage et le pilotage des actionneurs en mode manuel, la visualisation des informations des capteurs en temps réel, et un mode de fonctionnement simulé. La partie opérative non connectée, le logiciel permet une simulation du cycle de fonctionnement intéressante pour la compréhension des graphes d'états (description de l'étape en cours, description des étapes suivantes possibles).

Les exploitations pédagogiques possibles

- À partir de la chaîne d'énergie caractérisée par un « mouvement », caractérisation des liaisons sur les systèmes, relation avec les mouvements/déformations et les efforts,
 - À partir de la chaîne d'énergie caractérisée par un « effort », équilibre des solides : modélisation des liaisons, actions mécaniques, principe fondamental de la statique, résolution d'un problème de statique plane,
 - Capteurs : approche qualitative des capteurs, grandeur mesurée et grandeurs d'influence (parasitage, sensibilité, linéarité)
 - Conditionnement et adaptation du capteur à la chaîne d'information, échantillonnage, blocage
 - Filtrage de l'information : types de filtres (approche par gabarit). À partir de la chaîne d'information dynamique avec échantillonnage, traitement de l'information filtrage et calcul de l'information utile : activités élèves tout au long de la chaîne d'information
 - Approche comportementale : modèle de comportement simulé
 - Principes généraux d'utilisation, identification et limites des modèles de comportement, paramétrage associé aux progiciels de simulation
 - Identification des variables du modèle, simulation et comparaison des résultats obtenus avec ceux du système réel ou de son cahier des charges
- Un modèle Matlab/Simulink à différents niveaux de finesse doit être proposé avec des activités élèves associées.

L'instrumentation doit permettre une comparaison évolutive entre le système réel, ses modèles et le cahier des charges.

Tous les outils d'exploitation nécessaires à la mise en œuvre de ces activités pédagogiques sont fournis : la modélisation SysML complète (au format source MagicDraw, ou HTML), le modèle SolidWorks complet, les plans 2D de fabrication, les schémas structurels en intégralité, le schéma-bloc du modèle de simulation et le fichier Matlab/Simulink du modèle de simulation.

Pour des activités de projet en enseignement de spécialité SIN (Systèmes d'Information et Numérique), l'équipement didactique permet également une reprogrammation de tout ou partie du microcontrôleur, grâce à un port RS232 sur le système. Une interface de reprogrammation compatible avec tout outil Microship est fournie, ainsi que l'OS compilé. On peut également utiliser un compilateur C en mode monitoring.

Une activité en enseignement transversal de 1^{er} : l'étude de la chaîne d'information « pesée »

Cette activité pratique de 4 heures est scindée en deux TP de 2 heures chacun. Le premier TP porte sur la mesure, le relevé des courbes de tension en différents points de la chaîne, et l'étalonnage de la chaîne de pesée.

Le second TP, que nous présentons ici, porte sur l'amplification et le

filtrage du signal de pesée. À l'issue de la séance, l'élève doit être capable de caractériser les blocs intervenant dans cette chaîne et d'identifier leur rôle.

Le cadre du TP

- **Références au programme** (BO spécial n° 3 du 17 mars 2011) :

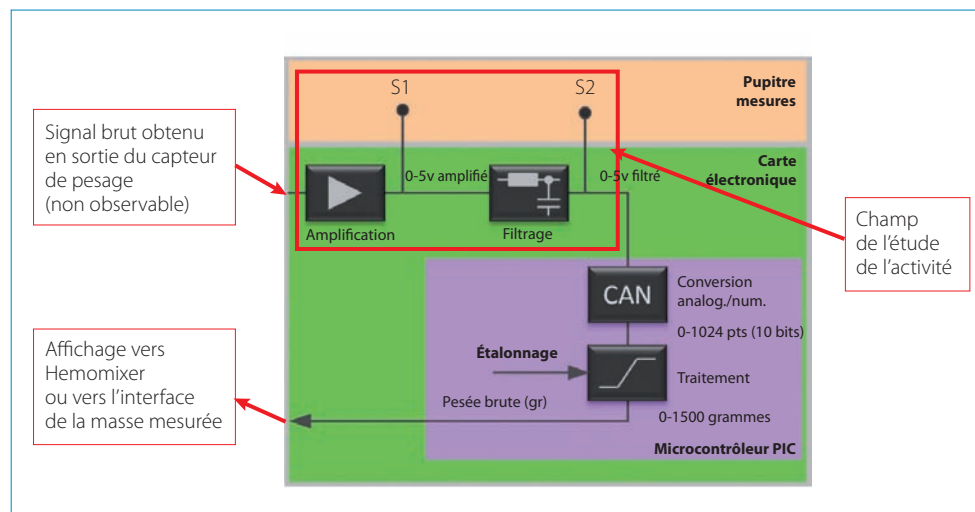
O4. Décoder l'organisation fonctionnelle, structurelle et logicielle d'un système

CO4.1. Identifier et caractériser les fonctions et les constituants d'un système ainsi que ses entrées/sorties

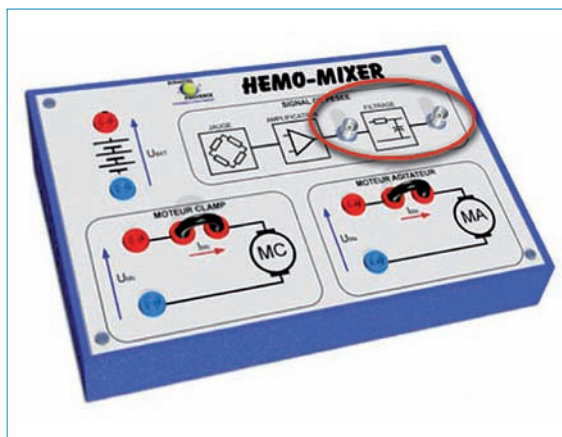
CO4.4. Identifier et caractériser des solutions techniques relatives aux matériaux, à la structure, à l'énergie et aux informations (acquisition, traitement, transmission) d'un système

- **Thématique** : Conditionnement et traitement de l'information

- **Intentions pédagogiques** : À l'aide de l'interface communicante et des appareils de mesure adéquats, l'élève va pouvoir visualiser les signaux à différents points de la chaîne et en déduire le comportement de chaque constituant de la chaîne. Il sera amené à étalonner la chaîne et à comprendre à quoi sert cet étalonnage. À l'issue de l'activité, l'élève sera capable de répondre aux questions suivantes : À quoi sert un étalonnage ? Un bloc d'amplification ? Un bloc de filtrage ? Comment traite-t-on l'information dans un microcontrôleur ?



7 La chaîne de mesure de la masse de la poche de sang



8 La localisation du filtrage et des points de mesure sur le pupitre

Ce TP de 2 heures propose de mener l'étude de la chaîne de mesure du poids sur le plateau de l'Hemomixer **7**. La présentation qui en est faite ici est synthétique et ne reprend pas, en particulier, toutes les explications de mise en œuvre de l'activité ainsi que l'assistance apportée par l'aide multimédia interactive.

L'étude du filtrage

Cette activité va nécessiter de faire des mesures. Pour cela, l'élève devra connecter deux appareils de mesure adéquats sur les deux sorties du pupitre de mesures, repérées S1 et S2 **8**. La visualisation de la forme des deux signaux se fera donc avec un oscilloscope 2 voies à enregistrement ou une centrale d'acquisition.

Après la mise en place d'un poids de 500 g sur le plateau, il est demandé de réaliser le relevé des deux signaux, avant et après filtrage, et de joindre les relevés au compte rendu **9** **10**.

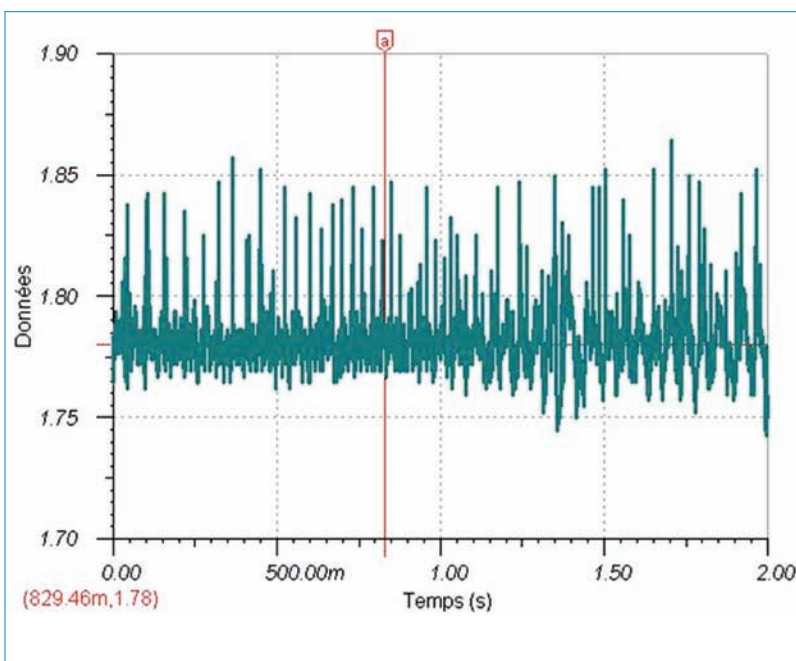
La mesure des tensions moyennes des deux signaux donne :

Tension moyenne avant filtrage :
1,78 V

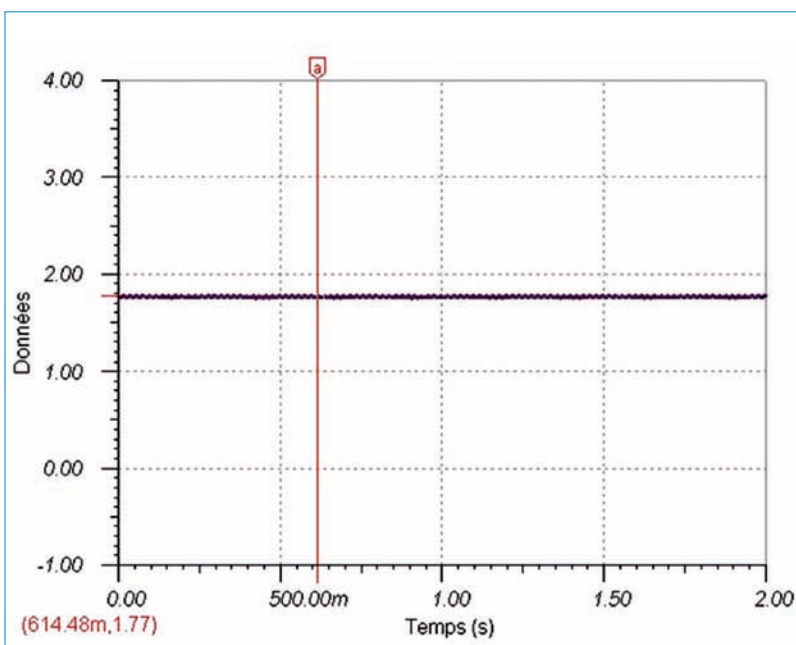
Tension moyenne après filtrage :
1,77 V

La comparaison de ces tensions moyennes doit induire la réflexion suivante quant au rôle du filtre :

Elles sont sensiblement les mêmes (1,78 V et 1,77 V) : le filtre ne modifie pas la tension moyenne (les basses fréquences...).



9 La mesure du signal avant filtrage obtenue par l'élève



10 La mesure du signal après filtrage obtenue par l'élève

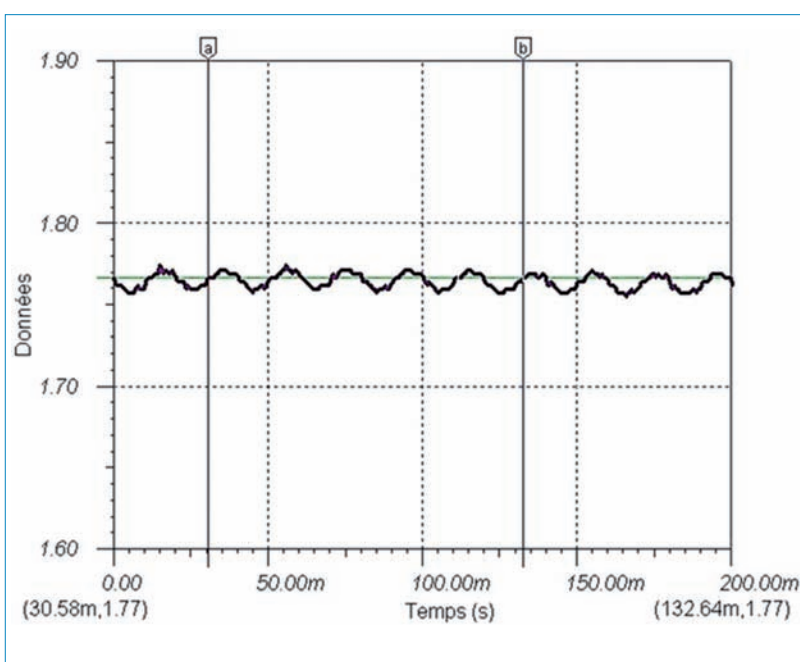
Il y a autour de la tension moyenne du signal avant filtrage de fortes variations aléatoires (que l'on appelle du bruit de mesure, amplifié tout comme le signal). Que deviennent-elles ?

Elles ont disparues : elles ont été filtrées.

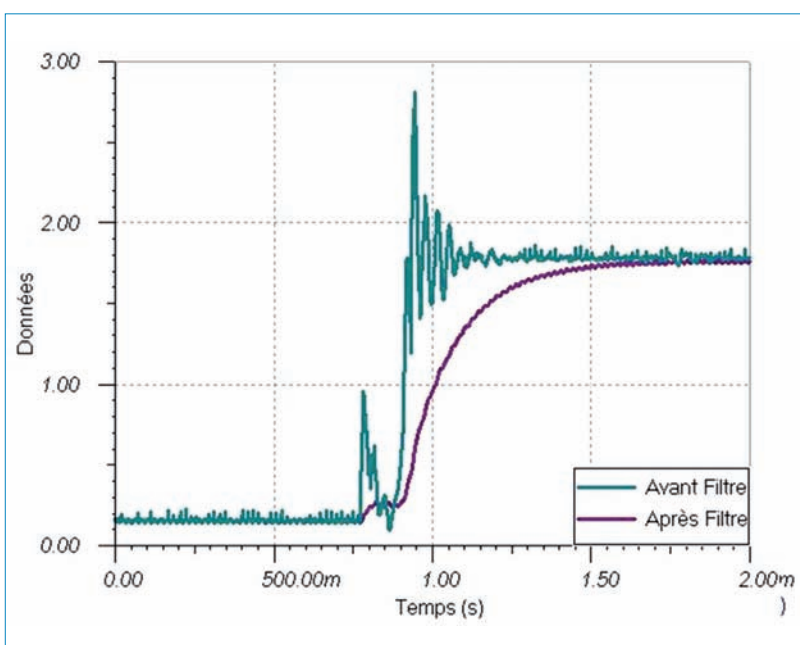
Des oscillations « résiduelles » persistent toujours, de période fixe **11**. À quoi ces oscillations peuvent-elles

être dues ? (Pour répondre à cette question, il est nécessaire de mesurer la période de ces oscillations.)

Elles sont dues aux perturbations du réseau 50 Hz (période 20 ms) qui se superposent au signal (perturbations par l'alimentation des blocs actifs, par couplage capacitif dû au routage de la carte...). Ces oscillations sont atténuées et non filtrées, car de fréquence trop faible par rapport au filtre.



11 Les oscillations résiduelles



12 La mesure des deux signaux lors d'une charge brusque

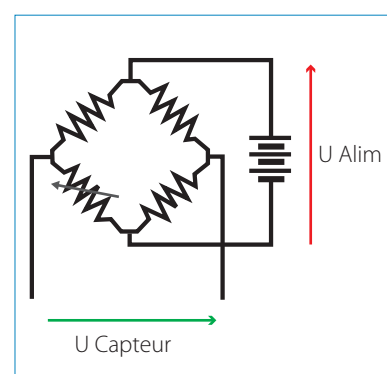
On se propose par la suite d'observer l'évolution du signal lorsque l'on modifie soudainement la masse sur le plateau. Pour cela, il est demandé de faire l'acquisition des deux signaux en respectant la procédure suivante 12 :

- Démarrez l'acquisition des signaux plateau vide (début d'enregistrement).
- 1 s après environ, déposez le poids de 500 g sur le plateau (doucement...).

- 1 s après environ, arrêtez l'acquisition (relevé à joindre dans le compte rendu).

Que peut-on dire de la forme du signal en sortie du filtre par rapport à celui en entrée ?

On voit bien que toutes les perturbations, oscillations, fortes variations sont « lissées » pour finalement obtenir un signal plus « propre ». Cela se verra sur l'affichage, où on aura une



13 Le montage de la jauge dans le pont de Wheatstone

montée progressive mais continue de la masse mesurée, alors que sans cela nous aurions des valeurs fluctuant en permanence et une mesure non stabilisée à la fin (bruit additif). On a donc « nettoyé » le signal de tous ses polluants, et on permet une mesure précise lorsque le signal est stabilisé.

Après avoir rempli le tableau de synthèse suivant, l'élève doit conclure que l'on a affaire à un filtre de type passe-bas.

Gamme de fréquences	Basses fréquences (tension moyenne)	Hautes fréquences (fortes variations)
Action du filtre	Laisse passer	Coupe

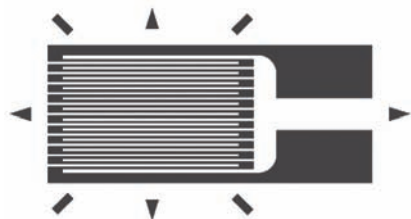
L'étude de l'amplification

Le capteur, appelé jauge de déformation ou encore jauge extensométrique (voir encadré p. 66), est un capteur délivrant une tension proportionnelle à la force exercée sur le matériau du corps d'épreuve. Cette force étant engendrée par le poids de la poche de sang, il est aisé d'en déduire la masse du sang prélevé. Ce capteur est constitué d'une résistance déformable, collée sur la zone de déformation du corps d'épreuve, et qui est intégrée dans un pont de Wheatstone, nécessitant une alimentation externe 13.

La sensibilité de la jauge de l'Hemo-mixer est de 2,2 mV/V pour une charge nominale de 4 kg. Cela signifie que pour une tension de 1 V d'alimentation et

Les jauges de déformation

Le but des extensomètres à fils résistants ou jauges de déformation (*strain gauges*) est de traduire la déformation d'une pièce mécanique, appelée corps d'épreuve, en variation de résistance électrique (plus la jauge s'étire, plus sa résistance augmente). Les jauges sont constituées de spires rapprochées et généralement fabriquées à partir d'une mince feuille métallique (quelques μm d'épaisseur) et d'un isolant électrique, que l'on traite comme un circuit imprimé, par lithographie ou par attaque à l'acide. La mesure de résistance avec un ohmmètre ne peut s'effectuer directement, car les variations de conductibilité de la jauge



sont trop faibles. Il est nécessaire de faire un montage en pont de Wheatstone.

La jauge est collée sur le corps d'épreuve qui subit les déformations. Il faut donc utiliser un matériau facilement déformable afin d'obtenir un signal de forte amplitude, tout en évitant de sortir de son domaine élastique.

Certains aciers alliés (E4340 par exemple) donnent une bonne précision et une excellente résistance à la fatigue. Il est également possible d'utiliser des corps d'épreuve en aluminium pour des capteurs de faibles capacités, comme dans le cas de l'Hemomixer.

une charge de 4 kg, la jauge délivre une tension de 2,2 mV.

Afin d'obtenir la tension en sortie de la jauge pour une tension d'alimentation quelconque, et une charge de 1 g, il suffit alors de multiplier cette sensibilité par la tension d'alimentation, et de diviser cette valeur par la charge nominale, exprimée en grammes (ici 4 kg).

Calculer la tension en sortie de la jauge pour une charge de 1 g, sachant que l'alimentation du capteur est de 8 V :

$$2,2 \text{ mV} \times 8 / 4\,000 = 4,4 \text{ } \mu\text{V}$$

Calculer la tension en sortie de la jauge pour un poids de 1 000 g (penser à ajouter la masse du plateau, mesurée dans la précédente activité, et se rappeler que la tension est proportionnelle à la masse) :

$$4,4 \text{ } \mu\text{V} \times 8 / 1\,048 = 4,6 \text{ mV}$$

La seule opération que réalise le bloc d'amplification est de multiplier la tension d'entrée par un coefficient pour obtenir une tension exploitable en sortie. Ainsi, on peut relier la sortie à l'entrée par la relation suivante, où A est le coefficient d'amplification :

$$\text{Tension}_{\text{sortie}} = A \cdot \text{Tension}_{\text{jauge}}$$

En reprenant la mesure de la tension faite en sortie du filtre pour un

poids de 1 000 g (qui sera considérée comme la tension présente en sortie du bloc d'amplification), calculer la valeur de l'amplification A (attention aux unités) :

$$A = 3\,389 / 4,6 = 736$$

On parle d'amplification quand le coefficient A est supérieur à 1, car ainsi le signal de sortie est supérieur au signal d'entrée. Cette appellation est-elle justifiée ici ?

Oui, largement. On peut même parler ici de forte amplification ! D'ailleurs, on amplifie d'autant le bruit...

Justification du bloc d'amplification

Nous avons vu précédemment que le bloc de filtrage nous permettait d'obtenir un signal « propre » et stable, afin de faire une mesure précise. Nous allons maintenant tenter de comprendre pourquoi un bloc d'amplification est utile dans cette chaîne de mesure.

La chaîne de mesure n'est prévue que pour une charge maximale de 1 500 g. Quelle est la tension délivrée en sortie de la jauge pour cette masse ?

$$4,4 \text{ } \mu\text{V} \times 1\,548 = 6,8 \text{ mV}$$

Le CAN en entrée du microcontrôleur fonctionne sur une plage de 0 à 5 V, et la précision de la mesure (1 024 valeurs

dans cette plage) n'est assurée que si le signal d'entrée varie dans cette plage-là. Si l'on désire que la masse maximale (1 500 g sur le plateau) corresponde à la tension maximale (5 V) en entrée du CAN, quel doit être le coefficient à appliquer sur la tension en sortie de la jauge ?

$$5 \text{ V} / 6,8 \text{ mV} = 735$$

En comparant cette valeur au coefficient A de l'amplification, conclure quant à l'utilité d'un tel bloc.

Le bloc d'amplification sert à adapter le signal à la mesure. On parle généralement de « conditionnement de signal », car on conditionne le signal mesuré à la mesure qu'on en fait.

Conclusion

Ce système simple d'utilisation, rapide à mettre en œuvre et correctement interfacé permet de mener un grand nombre d'activités de formation dans les trois domaines que sont la matière, l'énergie et l'information (MEI). Les solutions technologiques présentent sur l'Hemomixer illustrent bien ce concept de MEI.

Le didacticiel développé est d'une grande richesse et systématiquement pensé pour servir d'accompagnement aux activités pédagogiques et démarches d'investigation. De nouvelles activités pédagogiques sont actuellement en cours de développement, et les travaux pratiques actuels sont déjà téléchargeables sur le site du fabricant du produit didactique (www.didastel.fr). ■

