

Un château d'eau pour futurs ingénieurs

A. Barel et J. Tiberghien

Vrije Universiteit Brussel
2 avenue de la plaine
B-1050 Bruxelles, Belgique

Un château d'eau pour futurs ingénieurs

Alain Barel, Sciences Appliquées, Vrije Universiteit Brussel, Avenue de la Plaine 2, B1050 Bruxelles. abarel@vub.ac.be

Jacques Tiberghien, Sciences Appliquées, Vrije Universiteit Brussel, Avenue de la Plaine 2, B1050 Bruxelles. tiberghien@info.vub.ac.be

Résumé :

Au cours de la seconde année des études d'ingénieur à la VUB, les étudiants doivent participer à un projet. Nous avons souhaité donner à ce projet un objectif triple : tout d'abord une immersion de quelques semaines dans le cœur de la profession d'ingénieur, la conception de systèmes ; ensuite la confrontation avec un travail de programmation non triviale et enfin la découverte des problèmes associés à un système de régulation en boucle. Pour ce faire nous avons fourni à nos groupes d'étudiants un modèle réduit de système de distribution d'eau, une collection de capteurs et d'actionneurs qui pouvaient mesurer et influencer le niveau dans le château d'eau et un ordinateur personnel connectable aux actionneurs et capteurs. La mission des étudiants était de développer un système de contrôle qui maintiendrait le niveau constant, quel que soit la consommation. Dans cet article nous aborderons successivement les motivations du projet, le matériel et les logiciels de support, la problématique de l'évaluation du travail et enfin les conclusions après une première année de mise en œuvre.

Mots clés : formation d'ingénieurs, projets pratiques, travail en groupe, régulation, programmation, temps réel.

1 INTRODUCTION

A l'heure actuelle les études d'ingénieur en Belgique ont une durée de cinq ans. Les deux premières années sont communes, ensuite les étudiants doivent choisir entre plusieurs spécialités. La VUB leur propose les constructions civiles, l'électromécanique, l'électronique, et la chimie. Les deux premières années sont essentiellement consacrées à l'acquisition de bases scientifiques solides en mathématiques, physique, chimie et informatique. Cette approche est de moins en moins appréciée par les étudiants qui se plaignent de passer deux années en purgatoire avant de pouvoir commencer les études qu'ils ont choisies. Ils regrettent également que les deux premières années n'aident pas ceux qui ont encore des doutes quant à leur spécialisation future.

Pour répondre quelque peu à ces critiques, sans changer fondamentalement la structure des études, un remaniement en profondeur du programme des premières années a été entrepris. Il consiste essentiellement en deux volets, le premier consiste en la réduction dans les cours fondamentaux des sujets dont l'intérêt pour de futurs ingénieurs est difficilement démontrable et l'illustration, pour les sujets épargnés, de leur utilité pratique. Le second, en l'adjonction à la fin de la seconde année, de quatre projets, d'une durée d'environ 7 jours chacun, orientés vers les quatre spécialisations proposées. Cette structure pourra très probablement être maintenue lors de l'introduction des titres de Bachelor et Master, prévue pour 2004, car il y aura à la VUB, un seul "Bachelor" en sciences de l'ingénieur, avec une spécialisation à partir de la fin

de la deuxième année. Le projet décrit ici correspond à la spécialisation électronique, qui aborde essentiellement l'utilisation des électrons et des photons pour transporter et traiter l'information.

2 LE CHATEAU D'EAU

2.1. Motivations du choix.

Comme un grand nombre des heures libérées provenaient des exercices d'informatique, il était de prime abord clair que le projet devait avoir une composante sérieuse dans le domaine de la programmation. Comme d'autre part, le cours théorique sur les fonctions de transfert et les algorithmes de réglage de la troisième année paraissait assez ésothérique à beaucoup d'étudiants, il semblait souhaitable d'inclure dans ce projet une introduction pratique au réglage en boucle fermée. Le contrôle par ordinateur d'un processus physique simple était donc un thème tout indiqué. Restait à trouver un processus non trivial, visuellement parlant, économiquement réalisable et dont les constantes de temps se situaient dans une gamme limitée vers le haut par la durée des séances de laboratoire et la patience des étudiants et vers le bas, par les temps de réponse somme toute fort modestes qu'on est en droit d'attendre d'un algorithme de réglage programmé sur un ordinateur personnel sans provisions particulières pour le temps réel. Un frigo de table fut abandonné à cause de sa lenteur, un système de lévitation magnétique à cause de sa rapidité. Une maquette de système de distribution d'eau, avec un temps de remplissage du château d'environ une minute semblait répondre à toutes les

spécifications. Le risque de débordement ajoutait une petite dimension ludique à l'ensemble du projet.

2.2. Le système hydraulique

La figure 1 montre le système hydraulique ainsi que les capteurs et actionneurs qui y sont associés.

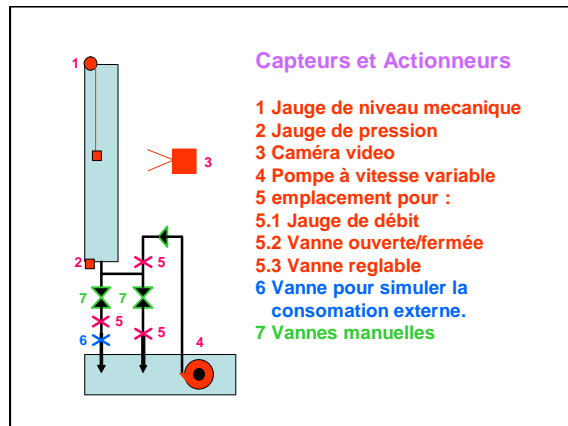


Fig.1 Le système hydraulique avec capteurs et actionneurs

Les vannes et jauges de débit sont munis de raccords coniques qui peuvent sans difficulté être assemblés ou démontés à la main et qui assurent une orientation hydraulique correcte des composants. L'alimentation réglable par triacs de la pompe est montée dans un boîtier étanche à l'arrière du château d'eau et commandée par signaux digitaux via deux fibres optiques en polymères, de façon à séparer galvaniquement et physiquement les circuits de commande du réseau électrique.

2.3. Les interfaces

Les jauges de niveau mécaniques ainsi que les jauges de niveau manométriques (après amplification adéquate) donnent un signal compris entre 0 et 5V; les jauges de débit délivrent 57 impulsions digitales par litre; la commande de la pompe exige 50 impulsions optiques par seconde, synchrones avec le réseau alternatif mais avec un déphasage réglable; les vannes réglables sont commandées par un courant continu variable entre 4 et 20 mA et enfin les vannes non réglables sont ouvertes par application d'une tension continue de 24V. Pour pouvoir connecter de façon simple tous ces capteurs et actionneurs à l'ordinateur, des interfaces spécifiques ont été conçues. Toutes ces interfaces se connectent via un bus ad hoc à une porte série de l'ordinateur. Seul la caméra vidéo se connecte directement à une porte USB de l'ordinateur.

Toutes les interfaces spécifiques ainsi que le convertisseur de bus ont été basés sur un microcontrôleur PIC de la firme Microchip. Ce contrôleur offre, au prix de quelques Euros, un convertisseur analogique digital, un convertisseur digital analogique, trois temporisateurs

programmables, une vingtaine d'entrées-sorties digitales, un émetteur récepteur pour communications sérielles et un processeur capable d'exécuter quelque 5 millions d'instructions par seconde. Le processeur a une architecture de Harvard, avec une mémoire pour programme électriquement reprogrammable d'une capacité de 2048 instructions de 13 bits et une mémoire pour données d'environ 200 octets.

Dans la conception des interfaces, l'accent a été mis sur l'aspect didactique. chaque interface est équipée de deux affichages à sept segments qui permettent aux étudiants de suivre visuellement la valeur des mesures et des commandes analogiques et de 16 diodes électroluminescentes qui montrent, sous forme binaire, les messages échangés entre l'interface et l'ordinateur. Il va de soi que ces affichages sont de peu d'utilité quand des centaines de messages par seconde sont échangés, mais ils se sont avérés très précieux lors de la mise au point par les étudiants de leurs logiciels de mesure et de commande.

Aussi bien du point de vue matériel que logiciel, les interfaces ont une structure très modulaire. La communication avec le bus et la partie affichage est commune à toutes les interfaces, seule la partie qui assure la liaison avec le capteur ou l'actionneur étant spécifique. Le matériel spécifique de chaque interface est monté sur une petite plaquette qui s'enfiche sur la carte qui porte le contrôleur et les affichages. Le logiciel des interfaces est écrit en assembleur et structuré sous la forme de plusieurs machines à états finis concurrentes. Grâce à cette structure, les parties communes et les parties spécifiques de chaque logiciel ont pu être maintenues bien distinctes et quasi indépendantes.

2.4 Le bus EIA 485.

Jusque 14 interfaces, identifiées par un numéro d'identité compris entre 1 et 14, peuvent être utilisées dans une même configuration du château d'eau. Toutes ces interfaces sont connectées à un bus EIA485. Il s'agit d'un bus bifilaire bidirectionnel simple, robuste et économique qui est intégralement commandé par l'ordinateur au travers d'une porte série de celui-ci. Comme la porte série utilise des circuits séparés pour l'émission et la réception, il a fallu construire, également à l'aide d'un contrôleur PIC, un convertisseur spécifique pour gérer le bus bidirectionnel. La communication s'effectue uniquement à l'initiative de l'ordinateur, qui envoie un message long de trois octets contenant, entre autres, l'identité du destinataire. Ce dernier doit alors répondre aussitôt par un autre message, également de trois octets. Il est également possible à l'ordinateur d'envoyer un message à toutes les interfaces en employant l'identité réservée 15. A un tel message aucune interface ne peut répondre, car

sinon différentes interfaces risqueraient d'accéder le bus simultanément.

Si, à l'avenir, les portes série devaient disparaître des ordinateurs personnels, ou simplement devenir inaccessibles à partir de programmes d'application, il serait facile de modifier le convertisseur de bus de façon à pouvoir le raccorder à une porte USB.

2.5. L'ordinateur.

Chaque château d'eau est équipé d'un ordinateur personnel, avec le système d'exploitation Windows et un environnement de programmation en Java, JCreator. Cet ordinateur dispose d'une connexion à l'Internet de façon à permettre la consultation de la documentation des fabricants des capteurs et des actionneurs, la recherche et le chargement de logiciels qui pourraient être utiles pour l'accomplissement de la tâche imposée, l'accès à des serveurs de fichiers centralisés dans le centre de calcul de l'université ou chaque étudiant dispose d'un espace de stockage privé, la communication par courrier électronique entre membres du groupe et la consultation, également par courrier électronique, du corps enseignant qui s'était engagé à répondre rapidement aux questions posées.

3 ORGANISATION DU PROJET.

3.1. Les équipes.

Pour ce projet les étudiants devaient former des groupes de six ou sept étudiants. Ils étaient libres de constituer et d'organiser les groupes comme bon leur semblait mais étaient collectivement responsables de la bonne fin de leur tâche. Chaque équipe disposait de son château d'eau pendant la période prévue à l'horaire de ce groupe pour le projet. Le même château d'eau pouvait être utilisé à d'autres moments par d'autres groupes. En fait, durant la première édition de cet enseignement, chaque château d'eau a été utilisé par trois groupes différents ce qui a obligé les groupes à reconfigurer leur château d'eau au début de chaque séance de travail expérimental et à sauvegarder les logiciels développés sur les serveurs centraux.

3.2. La tâche

La tâche imposée consistait à choisir des capteurs et des actionneurs et à les mettre en oeuvre de telle façon que le niveau d'eau dans le château reste constant quelles que soient les variations de la consommation d'eau. Le logiciel à réaliser devait non seulement maintenir un niveau constant mais devait également afficher sur l'écran de l'ordinateur un tableau synoptique qui permet d'observer l'état du système. Comme il sera mentionné dans le paragraphe suivant, chaque capteur et chaque

actionneur avait un prix et dans l'évaluation de la solution il était tenu compte du prix total. Il était toutefois possible d'obtenir pour quelques heures "en démonstration" les différents capteurs et actionneurs afin d'en évaluer les possibilités. Différents groupes pouvaient, s'ils le désiraient, s'associer pour partager le travail d'évaluation des composants.

3.3. L'organisation du travail

Les équipes pouvaient s'organiser comme elles l'entendaient mais devaient tenir un journal qui renseignait au jour le jour le jour qui faisait quoi. A la fin de la première journée de travail chaque équipe devait présenter un plan de travail comportant au moins deux étapes clairement définies. Chacune de ces étapes devait donner lieu à une brève présentation du travail déjà effectué et des résultats obtenus. Le journal et les présentations intermédiaires étaient destinées à permettre, si nécessaire, une rectification du cours avant qu'il ne soit trop tard.

4. L'EVALUATION.

La grande difficulté avec le travail en groupe est qu'il faut encourager la solidarité au sein des équipes tout en évitant que des "parasites" n'obtiennent de bonnes notes sans avoir contribué tant soit peu au travail collectif. Nous avons adopté un système d'évaluation qui attribue 60% de la note au groupe solidaire et 40% au membres individuels.

4.1. L'évaluation de l'équipe.

L'évaluation des équipes s'est faite sur plusieurs bases distinctes, de façon à objectiver autant que possible les scores et à montrer aux étudiants que les objectifs d'un projet peuvent être variés. Chacune de quatre bases d'évaluation a reçu un poids identique dans le décompte final.

4.1.1. La qualité technique de la solution.

Cette évaluation, faite par les membres du corps enseignant qui ont observé l'élaboration des solutions, tenait compte de la conception globale du système, des algorithmes de réglage utilisés, de la convivialité du logiciel et du coût total des capteurs et actionneurs mis en oeuvre.

4.1.2. La présentation orale.

Chaque équipe devait, en une vingtaine de minutes, convaincre les membres du corps enseignant de la qualité de leur travail. Cette présentation devait être professionnelle, avec support visuel de qualité, et pouvait même adopter le style de la présentation commerciale d'un produit. L'équipe entière devait être présente lors de la présentation mais le choix

des orateurs était entièrement libre. Les questions posées par les membres du corps enseignant pouvaient, par contre, être adressées à un membre spécifique du groupe.

4.1.3. Le rapport écrit.

Chaque équipe devait fournir un rapport écrit dans lequel le système réalisé était décrit en détail, les options techniques justifiées et l'effort consenti évalué quantitativement sur base du journal. Un CD contenant le texte du rapport ainsi que le code source des logiciels développés et le support visuel de la présentation devaient être joints au rapport. Certains groupes, ont préféré envoyer le tout par courrier électronique, sans inclure de version sur papier. Cette approche a été tolérée, à condition que le tout soit reçu au moins 24h avant la présentation orale.

4.1.4. La compétition.

Pour évaluer comparativement les performances obtenues par les différentes équipes, et pour ajouter un caractère ludique à l'ensemble du projet, une compétition a été organisée. A l'aide d'une vanne réglable et d'une jauge de niveau manométrique à haute résolution, tous deux connectés à un ordinateur portable supplémentaire, le comportement du système de réglage a été évalué quantitativement pendant une période d'une quinzaine de minutes au cours de laquelle la consommation a varié de façon pseudo aléatoire. La qualité du système de réglage a été évaluée en calculant chaque seconde la somme des carrés des différences entre le niveau mesuré et le niveau de référence. Les points ont été attribués aux équipes en fonction de leur classement et pour encourager les équipes une bouteille de champagne et des boîtes de chocolats attendaient les vainqueurs.

4.2. L'évaluation individuelle.

Les travaux pratiques du cours d'informatique ayant été absorbés par ce projet, l'examen sur la théorie de ce cours a été combiné avec l'évaluation de la contribution individuelle au projet. Au cours d'un examen oral, outre les questions sur l'informatique, des questions spécifiques visant à évaluer la participation de chacun et chacune au travail de l'équipe ont été posées. La cohérence des réponses des membres d'une même équipe s'est révélé un bon indicateur de l'implication de chacun dans l'effort collectif.

5. LES PREMIERS RESULTATS.

Une première génération d'étudiants a été exposée au château d'eau en 2002-2003. Au total 9 groupes de 6 ou 7 étudiants ont participé. Tous les groupes ont construit un système qui fonctionnait convenablement. Les choix techniques ont été

suffisamment différenciés que pour pouvoir donner lieu à une véritable émulation et à une compétition passionnante, riche en surprises.

5.1. Les choix des étudiants.

La mesure de niveau par flotteur et potentiomètre a partagé les faveurs des étudiants avec la mesure par jauge manométrique. La caméra de télévision n'a été utilisée que par un seul groupe, qui, par ailleurs, a conquis la seconde place lors de la compétition. Huit des neuf groupes se sont limités à un réglage qui ne tenait compte que du niveau de l'eau. Un groupe a eu l'idée d'ajouter une mesure du débit de sortie pour améliorer la vitesse de réaction du régulateur. Après la compétition, qui comportait de longues séquences à débit de sortie constant, plusieurs groupes sont arrivés à la conclusion qu'il eût fallu qu'une accumulation de petites erreurs systématiques affecte la consigne de réglage.

5.2. Les évaluations.

Globalement l'évaluation des étudiants sur base d'une note pour équipe combinée avec une note individuelle s'est avérée satisfaisante. Seul un petit nombre de très bons étudiants, n'ont pas pu, arithmétiquement, voir leur efforts individuels pleinement récompensés dans la note finale, à cause du poids de 60% de la note collective de l'équipe

5.3. Les acquis.

Un premier acquis pour quasi tous les étudiants est un apprentissage satisfaisant de la programmation objet en Java, alors que leurs connaissances antérieures étaient limitées à des concepts de programmation introduits au travers du langage Modula 2.

Le second acquis a été la découverte de la marge qu'il y a entre le monde idéal de la théorie et toutes les vicissitudes du frottement d'un flotteur contre une paroi ou des vibrations d'une vanne qui affectent une mesure manométrique. Découverte qui résultait d'ailleurs le plus souvent d'une première expérience de recherche logique de la cause de comportements apparemment inexplicables.

Et enfin, l'acquis le plus précieux pour la suite des études, est sans doute la métamorphose très positive de l'attitude des étudiants vis à vis de l'enseignement et des professeurs. Un réel partenariat a remplacé les relations hiérarchiques qui existaient encore lors de la première journée du projet.

6. REMERCIEMENTS.

Les auteurs voudraient, ici encore, remercier tous ceux, collègues, assistants, techniciens et étudiants, qui ont contribué à cette passionnante aventure.