

SYSTÈME DISTRIBUÉ DE SURVEILLANCE DE TEMPÉRATURE POUR ÉQUIPEMENTS RÉFRIGÉRÉS

SERGE CLOUTIER ET JACQUES CÔTÉ, CENTRE DE TECHNOLOGIES DES SYSTÈMES ORDINÉS, CÉGEP LIONEL-GROULX

RÉSUMÉ

La collaboration entre le Centre des technologies des systèmes ordinés et la compagnie Micro Thermo a débuté en 1992. Le projet engagé sur Échelon en 1994 était le premier réalisé par la CETSO. Le mandat du CETSO dans le projet était de réaliser la partie matérielle et logicielle d'un prototype de pré-production du système distribué de surveillance de température pour équipements réfrigérés. Plusieurs défis techniques étaient associés au projet dont le principal consistait à développer un concept d'architecture modulaire et ouverte permettant de répondre aux besoins d'un système de base acceptant des options. L'architecture devait également prendre en compte les applications futures et le réseau de communication devait être normalisé. Le projet du Système de surveillance de température est innovateur sur le plan de l'intégration de systèmes et original dans l'utilisation d'une technologie générique en émergence. La migration d'un système fermé et centralisé vers un système ouvert, distribué, évolutif et adaptable, utilisant des modules interopérables est en soi une innovation dans ce champs d'application. Les résultats ont été, pour l'entreprise, de doubler ses profits tout en offrant à sa clientèle un nouveau produit. D'autres retombées ont consisté en la création de 17 emplois techniques, une percée fulgurante sur le marché américain et, pour le CETSO, le renforcement de son expertise sur Échelon

INTRODUCTION

La collaboration entre le Centre de technologies des systèmes ordinés et la compagnie Micro Thermo a débuté en 1992. C'est en 1994 que les objectifs du présent projet ont été présentés au personnel du CETSO. Fait à souligner, ce document représentait la troisième version de la présentation initiale. En effet, lors de la présentation du projet, en septembre 1994, auprès des conseillers du CNRC, certaines faiblesses avaient été soulignées. C'est alors que le CETSO avait proposé, pour l'atteinte des objectifs, le recours à une technologie relativement nouvelle à cette époque, l'approche Échelon.

Le projet engagé sur Échelon était le premier réalisé par le CETSO. Il lui a fallu, avec la participation de Micro Thermo, acquérir les premiers équipements pour amorcer le début des travaux. Les chercheurs et techniciens impliqués ont également dû se former pour intégrer ce nouvel environnement aux outils de développement du Centre et innover dans son application à ce cas concret. " C'est dire à quel point le CETSO a été un pionnier de cette technologie, avec Micro Thermo, qui en a pris le risque " (M. Jacques Côté, directeur général, Micro Thermo).

L'objectif du projet était de réaliser un système de surveillance de température qui allie toutes les caractéristiques et fonctions des systèmes possédés par Micro Thermo et pouvant répondre qualitativement et quantitativement à une plus grande gamme de besoins exprimés par sa clientèle cible. Les niveaux multiples de température des comptoirs réfrigérés, la nouvelle tendance exprimée alors par Provigo Distributions, Club Price et Loblaw d'unifier les divers systèmes des établissements en un seul panneau de contrôle ainsi que le raffinement des analyses sur la conservation des aliments sont quelques-uns de ces besoins. De plus, la tendance qui s'exprime depuis quelques années d'offrir des supermarchés à très grande surface impose la mise en place d'un très grand nombre de points de surveillance dépassant rapidement la capacité du système précédemment offert par Micro Thermo constitué essentiellement de deux unités, soit le « MT8 » et le « MTSwitch ». Le MT8 supporte la supervision de 8 unités réfrigérées et le MTSwitch permet de cascader 8 MT8 pour une supervision maximum de 64 unités réfrigérées. La personnalisation de ce système aux besoins des clients était difficile à réaliser et l'accès et la présentation des données très peu ergonomiques.

Après deux ans de réflexion et de remise en question, l'émergence d'une nouvelle technologie, la technologie " Échelon " proposée par le CETSO, a permis de cristalliser les objectifs de Micro Thermo. En effet, l'utilisation de la technologie Échelon, une technologie offrant tout le support pour l'implantation d'un réseau de contrôle distribué intelligent basé sur le modèle OSI à 7 couches, a permis de développer un système ouvert de surveillance

de température, nommé MT2000, qui non seulement permet de répondre aux besoins actuels des clients mais également d'évoluer pour satisfaire à d'autres exigences sans nécessiter une révision complète des acquis.

DESCRIPTION DE L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE

Le mandat du CETSO dans le projet était de réaliser la partie matérielle et logicielle d'un prototype de pré-production du " Système distribué de surveillance de température pour équipements réfrigérés ". Ce nouveau système de surveillance se devait de :

1. Répondre aux besoins des supermarchés canadiens, américains et mexicains dont la surface et le nombre d'unités à surveiller requièrent un système de surveillance de température possédant une capacité de 128 sondes;
2. Réaliser une économie d'échelle (coût du raccordement), en utilisant une configuration réseau, pour le raccordement des différentes unités de surveillance de température;
3. Offrir la possibilité de diversifier les applications de surveillance (humidité, ammoniac, fréon, ...);
4. Offrir la possibilité de surveiller le statut des compresseurs et autres dispositifs de contrôle;
5. Avoir une minuterie et suffisamment de mémoire pour tenir compte des événements cycliques d'une semaine.

Dans la mise au point et la réalisation du système distribué de surveillance de température les objectifs techniques et les résultats attendus s'énonçaient comme suit:

1. Conserver l'essentiel des réclamations contenues dans le brevet américain détenu par Micro Thermo;
2. Développer une interface usager en français, anglais et espagnol afin de répondre aux différents marchés d'exportation;
3. Développer un système convivial, afin de maintenir les opérations de l'utilisateur à des actions simples et facilement identifiables;
4. Rechercher la simplicité dans l'installation, la programmation et la maintenance du système afin de réduire les coûts;
5. Développer un système possédant une architecture modulaire (système de base + options dépendant des besoins du client);
6. Normaliser le réseau de communication entre les différents modules ou unités du système afin de pouvoir l'adapter aux besoins du client;

7. Utiliser un protocole indépendant du médium de communication;
8. Prévoir l'utilisation de différents médiums de communication afin d'accroître la souplesse du réseau de communication;
9. Développer un système performant à un prix compétitif.

Dans cette perspective, les défis techniques généraux du projet étaient définis comme suit :

1. Développer un concept d'architecture modulaire et ouverte permettant de répondre aux besoins d'un système de base acceptant des options. L'architecture doit également prendre en compte les applications futures et le réseau de communication doit être normalisé pour permettre :
2. d'interconnecter les différents modules selon la configuration désirée.
3. de respecter la compatibilité avec d'autres systèmes ou modules disponibles commercialement;
4. d'implanter une topologie à géométrie variable adaptée à la surface et aux besoins des différents supermarchés;
5. d'utiliser un système de communication supportant plusieurs médiums de façon transparente pour l'application.
6. Intégrer toutes les fonctions existantes dans les nouveaux modules et doubler la capacité de surveillance de chacun par rapport aux anciens modules.
7. Développer un module d'affichage et de commande de dimension réduite qui réponde à toutes les fonctions contenues dans le MTSwitch et qui offre la possibilité d'une interface usager en français, en anglais et en espagnol;
8. Développer un module de communication et un module d'alimentation avec horloge en temps réel qui répondent à toutes les exigences de fiabilité et de sécurité exigées.
9. Intégrer dans le circuit initial un degré de programmabilité suffisant pour modifier ou rajouter des fonctions de contrôle sans avoir à dessiner à nouveau le produit;
10. Intégrer toutes les fonctions dans un rapport coût/performance optimale;
11. Concevoir une structure " Fail Safe " pour les fonctions critiques;
12. Immuniser le système d'acquisition de données analogiques contre les interférences parasites;
13. Développer la méthode de sauvegarde des paramètres dans un PC en y intégrant toutes les fonctions du module de commande;
14. Maintenir l'interface usager et les opérations de l'utilisateur à des actions simples, facilement

repérables; la convivialité du système doit couvrir tous les aspects pour permettre à l'utilisateur dans un court laps de temps, de se sentir à l'aise avec les concepts. Cette convivialité est un facteur important pour maintenir l'avantage compétitif du système;

15. Développer des outils simplifiant l'installation et le raccordement du système.

DESCRIPTION DE L'ORIGINALITÉ DE L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE

Le projet du « Système de surveillance de température » est innovateur sur le plan de l'intégration de systèmes et original dans l'utilisation d'une technologie générique en émergence. La migration d'un système fermé et centralisé vers un système ouvert, distribué, évolutif et adaptable, utilisant des modules interopérables est en soit une innovation dans ce champs d'application. De plus les modules développés dans le cadre du projet, comme les cartes d'interfaces et de conditionnement de signal basées sur une puce « neurone » d'Échelon, sont très versatiles et peuvent être configurées (par logiciel) pour s'adapter à divers types de capteurs (0-10V, 4-20mA, contact sec, et capteur PTAT 1 $\mu\text{A}/^\circ\text{C}$). Des procédures implantées directement sur les cartes en facilitent l'installation, la configuration et la calibration. Un effort supplémentaire au niveau de l'outil d'installation du réseau de surveillance, exécuté à partir d'un PC, à même permis d'augmenter la capacité demandée de 128 sondes à 192 sondes. L'interface usager minimale prévue dans le devis d'origine a évolué et pris une place beaucoup plus importante. En fait elle est devenue l'élément clé des arguments de vente, les clients trouvant beaucoup plus compréhensibles les présentations dynamiques des états et conditions régnant dans le magasin, surtout lorsqu'elles respectent la disposition géographique des éléments supervisés présentés sur une interface graphique très visuelle. La convivialité des écrans de l'interface a même contribué à transformer chez les utilisateurs le syndrome souvent associé à l'implantation d'une nouvelle technologie, en fierté de pouvoir la maîtriser et la manipuler du bout des doigts.

L'introduction d'un " réseau basé sur des puces neurones " est une nouveauté dans les systèmes de surveillance de température. Cette technologie a un impact considérable dans le développement de systèmes distribués. Le faible coût des puces, combiné à la normalisation (LON-MARK) du réseau de communication (le protocole LONTALK supportant plusieurs médiums) permet de distribuer l'intelligence à un coût avantageux dans diverses applications commerciales et industrielles.

Plusieurs compagnies (on en compte maintenant près de 3500 utilisant la technologie) ont déjà normalisé leurs

produits de façon à faciliter le développement et l'intégration de ces derniers dans divers secteurs d'applications, comme le HVAC, l'immotique/domotique, le contrôle de procédés industriels, l'acquisition de données, les systèmes d'alarme, etc.

L'expertise acquise par le CETSO dans le cadre de ce projet s'inscrit dans un créneau que celui-ci voulait privilégier et a continué à privilégier au cours des années subséquentes.

Le passage d'une technologie de systèmes modulaires à microprocesseurs à un système où l'intelligence est distribuée (communication " peer to peer "), appuyé par la réussite d'un tel projet, représente une percée aussi importante pour la gestion de l'énergie et de l'environnement des édifices commerciaux (supermarchés dans le cas présent) qu'a représenté la venue des ordinateurs personnels il y a vingt ans. La maîtrise de cette technologie implique les compétences du génie électrique, de l'ingénierie logiciel et de l'informatique. En réalisant un premier produit issu de cette technologie, l'entreprise partenaire dans ce projet, s'est propulsée, non seulement au Québec, mais aussi au Canada, à l'avant garde du mouvement d'interopérabilité dans le domaine du contrôle des procédés. La possibilité d'offrir différents médiums de communication, paire de fils torsadés, courant porteur, ondes RF, fibre optique, etc., la flexibilité de topologie du réseau, la personnalisation de chaque installation ajoutent au caractère novateur du produit.

Le prototype développé et mis à l'essai sur un site bêta s'est avéré satisfaisant et Micro Thermo est vite passé en production pour répondre à la demande de ses clients. Le transfert technologique s'est effectué en cours de projet, grâce à l'insertion d'une ressource de Micro Thermo au sein de l'équipe de développement du CETSO et s'est poursuivi après pour assurer une autonomie à la compagnie dans sa démarche de personnalisation des applications. Ce qui a réussi puisque Micro Thermo à poursuivi le développement en se dotant d'outils pour automatiser le processus de personnalisation des applications et pour simplifier l'installation des nœuds du réseau de surveillance. Cet outil est tellement efficace que l'entreprise a pu développer une méthode d'installation en usine qui ne requiert aucun autre outil logiciel chez le client. Il a suffi de mettre en place un adressage particulier de chaque nœud pour qu'il soit possible de remplacer un nœud par un autre, du même type, sans configurer à nouveau le réseau. Cet aspect favorise la distribution et l'installation du MT2000, hors Québec.

Parmi les réalisations rendues possibles par ce projet, signalons:

1. la possibilité de personnaliser chacune des interfaces graphiques pour chaque type d'installation physique;
2. la possibilité de modéliser la température des produits réfrigérés; modèle développé selon les théorèmes thermodynamiques sur le transfert de la chaleur entre les corps permettant ainsi au client soucieux de la qualité de ses produits de pouvoir obtenir le maximum de rendement de ses équipements réfrigérés;
3. la possibilité d'archiver, avec une résolution d'une minute, les températures pour une période s'étendant jusqu'à 7 jours avec possibilité de "zoom" pour chacune des heures de cette période;
4. une diminution appréciable du coût de revient de chacun des modules;
5. l'accès à de multiples vendeurs grâce au caractère d'interopérabilité certifiable de la technologie,
6. enfin, et principalement, ce projet a permis à Micro Thermo de faire un pas important pour rentabiliser sa pénétration actuelle dans le domaine des supermarchés d'alimentation en lui permettant, avec le CETSO, de se positionner, au moins deux ans avant tout le monde, dans un rôle d'intégrateur de systèmes. Cette option, qui exige des efforts soutenus d'ingénierie, sous-tend une croissance exceptionnelle dont les impacts se font déjà sentir.

PRÉSENTATION DES PARTENAIRES

La réalisation de ce projet a été rendue possible grâce aux efforts conjugués des trois parties identifiées en introduction. D'abord le client du CETSO, la firme Micro Thermo, ensuite le soutien du Conseil national de la recherche du Canada (CNRC) et ses conseillers techniques, enfin la vision et l'audace des ingénieurs et chargés de projet du Centre des technologies des systèmes ordinés.

Micro Thermo Inc.

La firme MicroThermo Inc. fabrique et distribue des systèmes de surveillance de température, pour lesquels elle détient un brevet américain, pour les équipements réfrigérés dans les supermarchés, boucheries, restaurant et hôpitaux.

Fondée en 1986, la compagnie présente aujourd'hui un chiffre d'affaire près de 1,2 M\$.

Micro Thermo emploie 21 personnes réparties comme suit :

- R&D : 7 personnes à temps plein
- Opérations, fabrication et installation : 8 personnes à temps plein.
- Administration, direction et ventes : 6 personnes

- Personnel à sous-contrats et employés d'été : 6 personnes.

Clients majeurs :

Épiciers-Unis Métro Richelieu, Provigo Distributions Inc., Hudon & Deaudelin (IGA), Oshawa Foods, National Grocers (Loblaws, Y.I.G, Zehrs), Longo's, Commisso's.

Micro Thermo a bénéficié de la collaboration et de la participation des organismes suivants au cours des trois dernières :

CNRC, CETSO, Banque de Développement du Canada (formation en développement stratégique), CRIQ, CRIM, Ministère de l'industrie, du commerce et de la technologie du Québec, Ministère des Affaires extérieures du Canada, Laval Technopole, Canmet

En 1994, MicroThermo s'était déjà engagée sur le marché de l'exportation. Une étude de marché avait permis de recueillir des données relativement aux nouveaux besoins et convaincu la compagnie de développer un nouveau système de surveillance de température mieux adapté aux besoins des clients et ce à un prix compétitif.

Le CETSO

Le CETSO œuvre dans le domaine des systèmes des contrôles industriels depuis 1986. Il a à son acquis plusieurs réalisations dans les secteurs de l'automatisation industrielle, des arts de la scène et de la domotique/immotique.

Ressources affectées au projet :

Alberto de Sousa,
technicien responsable du développement des cartes d'interfaces à base de puces neurons.

Sylvain Guillemette,
ingénieur responsable du développement de l'interface usager.

Serge Cloutier,
chargé de projet responsable des sections logicielles impliquées dans les accès au réseau LONWorks d'Échelon, de l'installation et de la configuration des nœuds.

Jean-Raymond Touchette,
gestionnaire et coordonnateur du projet.

DESCRIPTION DES EFFETS DE L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE SUR LA PERFORMANCE DU PARTENAIRE

Deux retombées majeures sont à signaler relativement à la réalisation de cette innovation technologique. La première, à caractère régional, porte sur la création de plusieurs emplois à haute teneur technologique au sein de l'entreprise. La seconde concerne l'ouverture de nouveaux marchés pour Micro Thermo et la consolidation des acquis.

Pour le Centre des technologies des systèmes ordonnés, ce projet a assuré le développement et le renforcement de son expertise dans le domaine de la domotique/immotique et a contribué à accroître la reconnaissance de ses compétences dans la réalisation de projets sur la plateforme Échelon.

Au cours des trois dernières années, Micro Thermo a triplé son chiffre d'affaires, a créé 17 nouveaux emplois, passant de 4 à 21 employés, a créé un département de R&D qui emploie 7 personnes à temps plein (0 avant 1994), a mis un nouveau système sur le marché, développé autour de la plus récente technologie réseau. L'entreprise a également doublé ses profits tout en offrant à sa clientèle un nouveau produit, à valeur ajoutée importante, à un coût de détail inférieur de 8 à 10% à l'ancien système. Jusqu'au début de 1994, l'entreprise ne possédait aucun personnel formé et qualifié dans les domaines de nouvelle technologie et n'avait eu, jusqu'alors, aucun contrôle sur le développement de ses produits ni sur sa production. Cependant elle connaissait bien sa clientèle qu'elle servait depuis plus de six ans et elle était demeurée à l'écoute de ses besoins. Tout a débuté au moment où l'entreprise a fait appel à un conseiller du CNRC qui l'a orientée vers un partenaire public en R&D, le Centre des technologies des systèmes ordonnés.

Avec la réalisation du projet du MT2000, Micro Thermo a pu envisager affronter des marchés de plus grandes envergures et côtoyer des joueurs majeurs dans l'industrie. Elle est présentement en très bonne posture pour faire une percée fulgurante sur le marché américain. Enfin, outre la création d'emploi dans la région, et l'embauche d'un étudiant de génie électrique du Collège Lionel-Groulx, il y eu contribution spécifique du projet au développement régional, notamment en ce qui a trait aux contrats de sous-traitance. Quant à l'expertise acquise par le CETSO dans l'utilisation de la technologie Échelon, elle sert à la réalisation de projets génériques au bénéfice de d'autres entreprises qui font appel à ses services

PRÉSENTATION DE L'AMPLEUR DE LA DIFFUSION DES RÉSULTATS DE L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE

Dans le cadre d'un projet de cette nature, c'est-à-dire d'un contrat de R&D avec une entreprise, la diffusion des résultats est essentiellement du ressort de l'entreprise cliente, puisque propriétaire de l'innovation technologique et critique en matière de confidentialité.

Une augmentation des ventes de 85%, une réduction des coûts d'installation de 70% et de fabrication de 40% sont autant de facteurs de diffusion. De même, la mise en place d'un nouveau projet de R&D qui, à sa conclusion, positionnera avantageusement Micro Thermo sur le marché mondial, témoigne de l'ampleur du rayonnement de cette innovation. En effet, l'entreprise a démarré, à l'automne 1995, la première phase d'un projet ambitieux de gestion globale de la consommation en énergie dans les supermarchés. Ce faisant la compagnie s'est assurée la participation du chargé de projet du CETSO responsable du premier développement, lequel agit comme expert auprès de la compagnie. Celle-ci investira 1.2 M\$ au cours des deux prochaines années, pour réaliser l'intégration de tous les systèmes de contrôle et de surveillance d'un supermarché, à partir d'une seule et unique plateforme à architecture ouverte. Ce projet met de l'avant une interface usager très conviviale, des outils logiciels de configuration de réseau et d'installation qui seront accessibles à n'importe quel technicien spécialisé à travers le monde. De plus, ce système permettra l'inclusion de n'importe quel produit (normalisé selon la certification LONMARK) disponible sur le marché mondial. L'interopérabilité est le critère central.

L'intérêt marqué des clients pour ces nouveaux produits et pour les aspects d'économie et d'accès aisés à l'information qu'ils offrent a éveillé les fournisseurs de systèmes aux possibilités offertes par cette approche. De nouvelles alliances technologiques sont à se former avec des partenaires qui, il y a un an à peine, étaient vus comme des concurrents. Les innovations réalisées ont amené Micro Thermo à profiter des nouveaux leviers reliés à la mondialisation des marchés.

Du côté du CETSO, on peut considérer que la diffusion se mesure au transfert technologique réalisé auprès du client et au sein du CNR. À cet égard, la participation du personnel technique de la compagnie Micro Thermo dans le projet a permis d'assurer le transfert technologique au sein de l'entreprise. L'effort de R&D engagé avec la participation du CETSO a apporté suffisamment de connaissances pour que Micro Thermo puisse prendre en charge les prochaines étapes de son développement technologique.

LABORATOIRE VIRTUEL D'EXPÉRIMENTATION ET D'APPRENTISSAGE DE SYSTÈMES HYDRAULIQUES ET PNEUMATIQUES: APPROCHE DE MODÉLISATION EN SIMULATION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR¹

DANIEL CERVERA, PASCAL BIGRAS ET TONY WONG DU COLLÈGE DE VALLEYFIELD

RÉSUMÉ

Nous présenterons un environnement informatisé d'apprentissage, véritable laboratoire virtuel d'expérimentation permettant de construire et d'observer, en temps réel, le comportement de systèmes complets (avec mécanismes et charges). Cet environnement supporte l'étude qualitative et quantitative des systèmes, en régime permanent et transitoire (dynamique), et rend intelligibles les phénomènes et les lois qui régissent ce comportement, selon une approche de modélisation fondée sur une théorie des circuits analogue à celle des circuits électriques. Il comporte un banque de leçons et d'exercices d'expérimentation.

INTRODUCTION

Dans cette communication, nous exposerons les résultats de nos travaux de développement d'un environnement informatisé d'apprentissage, un véritable laboratoire virtuel d'expérimentation permettant de construire et d'observer, en temps réel, le comportement de systèmes hydrauliques et pneumatiques complets, c'est-à-dire lorsqu'ils agissent sur divers types de mécanismes et des charges. Cet environnement a été conçu et créé pour supporter l'étude qualitative et quantitative des systèmes en régime permanent et transitoire (dynamique). Il permet de rendre intelligibles les phénomènes qui se produisent dans les systèmes et les interactions entre les diverses variables, selon une approche didactique de modélisation. Cette approche met aussi à contribution un cadre théorique (analogue à celui des circuits électriques) qui rend explicites les lois qui régissent le comportement des fluides dans les circuits. En plus de ses capacités de simulation avancées, cet environnement informatisé d'apprentissage permet de présenter des contenus théoriques et comporte une banque d'exercices d'expérimentation.

Nous exposerons d'abord succinctement les principaux éléments de la problématique qui est à l'origine de nos

travaux, soit les fausses représentations conceptuelles des étudiants et la situation épistémologique qui prévaut dans l'enseignement de cette discipline. Nous présenterons ensuite les principaux objectifs didactiques que nous poursuivions durant le développement de cet environnement d'apprentissage, ainsi que ses principales caractéristiques technologiques, ce qu'il permet de réaliser et ce qu'il comporte.

LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS DE LA PROBLÉMATIQUE

Nos travaux se fondent sur deux aspects problématiques principaux. Le premier concerne les difficultés d'apprentissage qu'éprouvent les étudiants avec les phénomènes physiques qui se produisent dans les systèmes d'énergie des fluides industriels (hydraulique et pneumatique); ces difficultés se concrétisent par la persistance de nombreuses fausses représentations conceptuelles chez les étudiants. Le deuxième aspect concerne la situation épistémologique qui prévaut dans l'enseignement de la discipline, notamment le constat d'une absence de cadre théorique permettant d'articuler une étude cohérente et structurée du fonctionnement des systèmes en question. En fait, nous pensons qu'il existe un lien de cause à effet entre ces deux éléments; l'absence de cadre théorique serait, dans une certaine mesure, à l'origine des difficultés d'apprentissage.

Les fausses représentations conceptuelles des étudiants

Le comportement des systèmes hydrauliques et pneumatiques industriels est complexe et sa compréhension ne relève pas de la simple évidence. Les étudiants éprouvent des difficultés d'apprentissage reliées au fait que la plupart des phénomènes qui s'y produisent ne sont pas directement observables et au fait que leur déroulement obéit aux interactions qui ont lieu à l'intérieur des systèmes, ce qui leur confère un caractère particulièrement abstrait et complexe.

¹ Une partie de la recherche qui est à la base de cette communication a été subventionnée par le ministère de l'Éducation dans le cadre du Programme d'aide à la recherche sur l'enseignement et l'apprentissage.