

Modèle de comportement

THIERRY AURIER ET GÉRARD COLOMBARI ^[1]

Dans l'académie d'Aix-Marseille, une formation de grande ampleur a été organisée pour accompagner la réforme STI2D. Dans ce cadre, Thierry Aurier et Gérard Colombari ont réalisé un module de deux journées consacré aux modèles de comportement – inscrits au programme de l'enseignement transversal –, au moyen duquel ils ont formé une centaine d'enseignants. Retour sur une expérience qui mérite un écho national.

Nous connaissons assez bien les outils informatiques (Matlab et Scilab) permettant de créer et d'exécuter des modèles de comportement. Nous utilisons régulièrement ces outils avec nos élèves de classes préparatoires dans le cadre de l'étude des systèmes automatiques continus.

L'un des objectifs de cette nouvelle série STI2D est d'ouvrir les voies de l'orientation vers des formations scientifiques supérieures au plus grand nombre d'élèves issus de cette filière. En effet, sur les plans scientifique et technologique, le titulaire du baccalauréat STI2D sera détenteur de compétences étendues, car liées à un corpus de connaissances des trois domaines matière, énergie et information, suffisantes pour lui permettre d'accéder à la diversité des formations scientifiques de l'enseignement supérieur : université, écoles d'ingénieurs, CPGE technologiques et toutes les spécialités de STS et d'IUT.

Les modèles de comportement, et les notions connexes associées, introduits par ce nouveau programme se situent dans l'axe de cet objectif en ouvrant l'étude des systèmes à une approche plus scientifique, mais toujours complémentaire de l'approche technologique propre à ce baccalauréat. En effet, les modèles de comportement s'appuient sur des modèles de connaissance issus des principes physiques mis en jeu dans les systèmes, principes qui donnent lieu le plus souvent à des équations différentielles qui seront simulées par des logiciels mathématiques – tels Matlab ou Scilab –, appelés aussi logiciels de simulation multiphysique. Cet aspect est le plus délicat à traiter pédagogiquement, les élèves de la filière STI2D ne possédant évidemment pas le bagage mathématique qui permet d'aborder de manière déductive ces connaissances. Mais les modèles de comportement ne se limitent pas à leur modèle de connaissance.

mots-clés

fluides, modélisation, simulation, thermique

Nous présentons ici la formation proposée aux enseignants de STI2D qui n'ont pas abordé ces sujets lors de leur formation initiale. Ses contenus ne peuvent être proposés directement aux élèves. Nos objectifs sont les suivants :

- Présenter les concepts principaux.
- Isoler les points intéressants pour les sciences industrielles et abordables avec les élèves.
- Proposer une démarche inductive d'acquisition à partir de la confrontation réel-modèle conduisant à un affinement du modèle.
- Donner des arguments contre certaines idées reçues sur ces notions, souvent jugées trop difficiles pour ce public.

Quelques points intéressants ont été soulevés par notre auditoire ; ils seront résumés en conclusion.

La relation au programme

Le contenu

Le programme de STI2D propose sous le titre « Approche comportementale » un paragraphe consacré aux modèles de comportement **1**. Ces modèles permettent une approche sur les évolutions temporelles des systèmes. Cette étude du comportement complète donc le triptyque classique : fonction, structure, évolution.

Le niveau d'acquisition et de maîtrise des contenus est le niveau 2, le niveau « d'expression ». Il s'agit sur les deux années de formation de découvrir ce qu'est un modèle de comportement, et de développer des capacités à intervenir sur certains points d'un modèle de comportement fourni.

Les modalités

Les modalités d'enseignement sont d'une grande importance pour ce type d'élèves ; il faut en effet privilégier une approche concrète des concepts proposés, surtout lorsque, comme c'est le cas pour les modèles de comportement, les connaissances théoriques d'appui ne sont pas totalement maîtrisées par les élèves.

Ces modalités vont bien sûr dans le sens d'une démarche inductive, privilégiant l'étude de modèles de systèmes réels *in situ*. Il est souhaitable de partir d'une comparaison modèle-réel pour montrer l'intérêt du modèle.

Les principaux concepts

La constitution

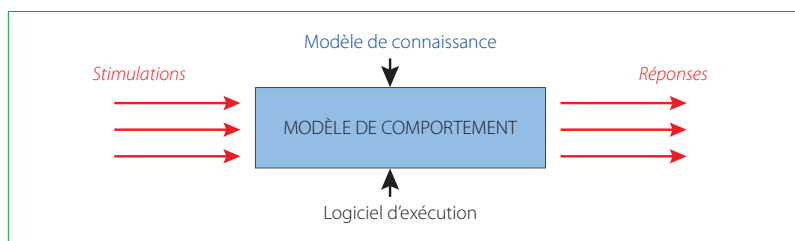
Un modèle de comportement de système se présente sous la forme d'un programme informatique exécutable sur un logiciel dédié **2**. Il est bâti sur un modèle de

^[1] Professeurs de chaire supérieure en classe préparatoire au lycée Thiers de Marseille (13001).

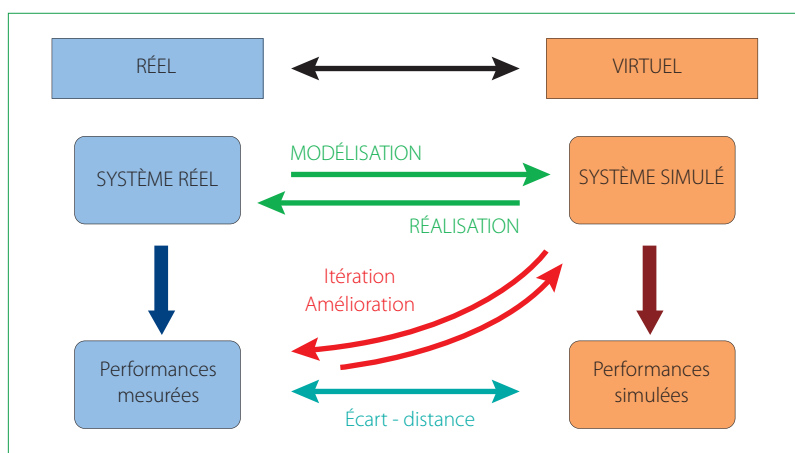
et simulation numérique

	1 ^{re} /T	Tax.	Commentaires
2.3 Approche comportementale			
2.3.1 Modèles de comportement			
Principes généraux d'utilisation			
Identification et limites des modèles de comportements, paramétrage associé aux progiciels de simulation	1 ^{re}	2	<i>Il s'agit de proposer une approche simple permettant de justifier l'utilisation d'un modèle de comportement, pouvant s'appuyer sur une simulation, permettant de justifier le paramétrage, les objectifs associés (justification de performance, prédiction d'un comportement) et la comparaison avec le réel</i>
Identification des variables du modèle, simulation et comparaison des résultats obtenus au système réel ou à son cahier des charges	1 ^{re} /T	2	<i>Il s'agit de faire une analyse permettant de mettre en évidence l'influence du paramétrage sur la pertinence des résultats de la simulation</i>

1 Extrait du programme de STI2D



2 Le schéma fonctionnel du modèle de comportement



3 Virtuel et réel

connaissance – généralement des équations différentielles issues de principes physiques. Lors de son exécution, on le soumet à des stimulations et on obtient des réponses (voir les exemples traités plus loin).

Les activités

La figure 3 met en évidence les activités possibles autour de la création et de l'utilisation des modèles de comportement. Compte tenu du programme proposé en STI2D, seules les activités d'itération et d'amélioration sont possibles en autonomie pour ces élèves. Cependant, il faut qu'ils aient conscience d'évoluer dans ce cadre (niveau 2).

Exemples utilisés pour la formation des enseignants

En propos liminaire, il semble nécessaire de rappeler certaines définitions, pour définir un langage commun.

● Modèle de connaissance

En le restreignant au strict cadre qui nous intéresse ici, un modèle de connaissance est généralement élaboré soit à partir des principales lois de conservation de la physique (mécanique, électromagnétisme, thermodynamique...) soit à partir de relations empiriques. Ces modèles se présentent sous forme d'équations différentielles dont les paramètres représentent des grandeurs caractéristiques du phénomène étudié. En toute rigueur, si la détermination de ces paramètres peut s'effectuer d'une manière théorique, on préfère souvent illustrer l'influence de ces échelles caractéristiques sur la réponse temporelle ou fréquentielle du modèle de simulation associé à partir d'éléments graphiques remarquables (valeur asymptotique, tangente à l'origine...).

Bien qu'il soit toujours préférable d'établir un modèle de connaissance, cela peut se révéler délicat, voire difficile, dès lors que le phénomène physique à modéliser (ou encore le processus à commander) est complexe ou mal connu. Dans ce cas, on a recours à l'écriture d'un modèle de comportement qualifié par nombres d'auteurs de « modèle de boîte noire ».

● Modèle de comportement

En complément (et non pas en opposition) au modèle de connaissance, le modèle de comportement du système se présente sous la forme d'une relation mathématique donnant la réponse temporelle en fonction, entre autres, de *facteurs* – différents des paramètres – qui sont sans lien physique avec le phénomène étudié. Ainsi, on écrira :

$$s = f(t, a_1, a_2, \dots, a_i)$$

s : sortie

$a_1, \dots, a_i$: facteurs

Dans la pratique, l'écriture du modèle consiste à postuler l'existence d'une forme pour f faisant intervenir des facteurs qui pourront être identifiés numériquement à l'aide de méthodes graphiques développées dans la littérature (Broïda, Strejc, analyse fréquentielle...) et s'appuyant sur les courbes expérimentales validées en quelques points. Bien que déterministe et invariant, le modèle de comportement obtenu possède un domaine de validité limité (contrairement au modèle de connaissance) rendant son utilisation plus délicate. Ce dernier est principalement lié aux incertitudes de mesure et approximations. Dans un souci d'efficacité, on cherchera naturellement à limiter le nombre de facteurs intervenant dans le modèle proposé. Dans le cas de processus simples, le modèle de comportement rejoint le modèle de connaissance.

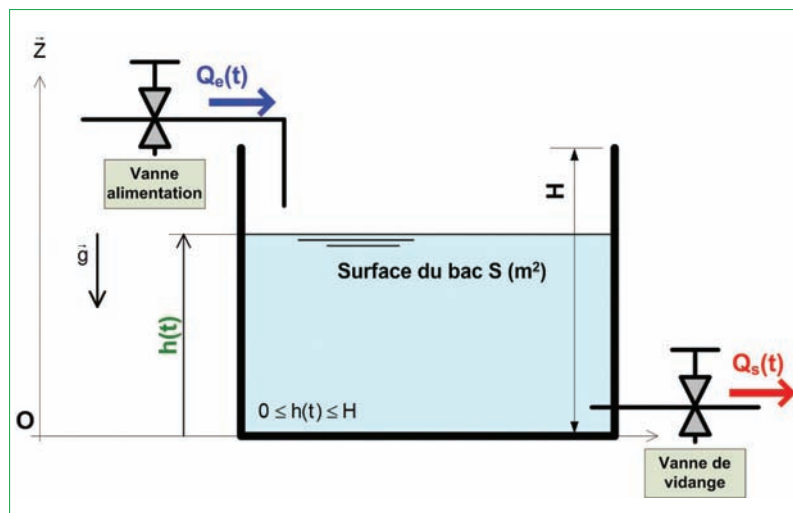
● Modèle hybride ou mixte

Très souvent, malgré bien des efforts, il n'est pas possible d'établir un modèle complet de connaissance, certains phénomènes physiques se révélant difficiles à appréhender. Dans ce cas, on complète ponctuellement le modèle global grâce à certaines lois de comportement obtenues expérimentalement. Cette approche permet d'allier la rigueur du modèle de connaissance (identification indispensable des différents phénomènes physiques maîtrisés mis en jeu) avec la capacité d'ajustement du modèle de comportement.

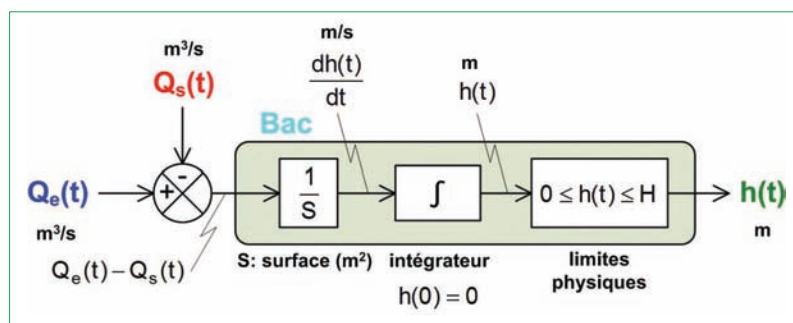
Construire et simuler un modèle de connaissance : un premier exemple basique

Nous avons choisi un premier exemple volontairement simple, partant d'un phénomène physique facilement compréhensible, afin de préciser les différentes étapes de l'élaboration d'un modèle de simulation. Au préalable, définissons donc ce qu'est, pour nous, un modèle de simulation.

● **Modèle de simulation** : Le modèle posé (de connaissance et/ou de comportement), il est logique que l'on cherche à en tirer des résultats numériques sous forme de courbes, de tableaux, de tendance... que ce soit avec un objectif de validation (surtout dans le cas du modèle de comportement) ou avec un objectif de prédiction (et non de prévision). Pour cela, on programme dans l'environnement du logiciel le modèle de connaissance et/ou de comportement, qui devient alors le modèle de simulation. On peut alors estimer que ce modèle de simulation se comporte comme un équipement expérimental virtuel ; à ce titre, il doit posséder un comportement au plus proche de celui du système étudié. Cependant, contrairement à une campagne expérimentale, le modèle de simulation autorise une grande variété de sollicitations ainsi que la possibilité de faire varier tous les paramètres et facteurs séparément, ce qui constitue un atout très précieux, notamment lors d'une analyse phénoménologique. *A contrario*, le résultat issu de cette simulation numérique ne peut être totalement validé



4 Le schéma de principe du système hydraulique



5 La représentation temporelle

que par comparaison avec une mesure expérimentale réalisée dans des conditions similaires (si possible). C'est ce que l'on nomme la *phase de calage*.

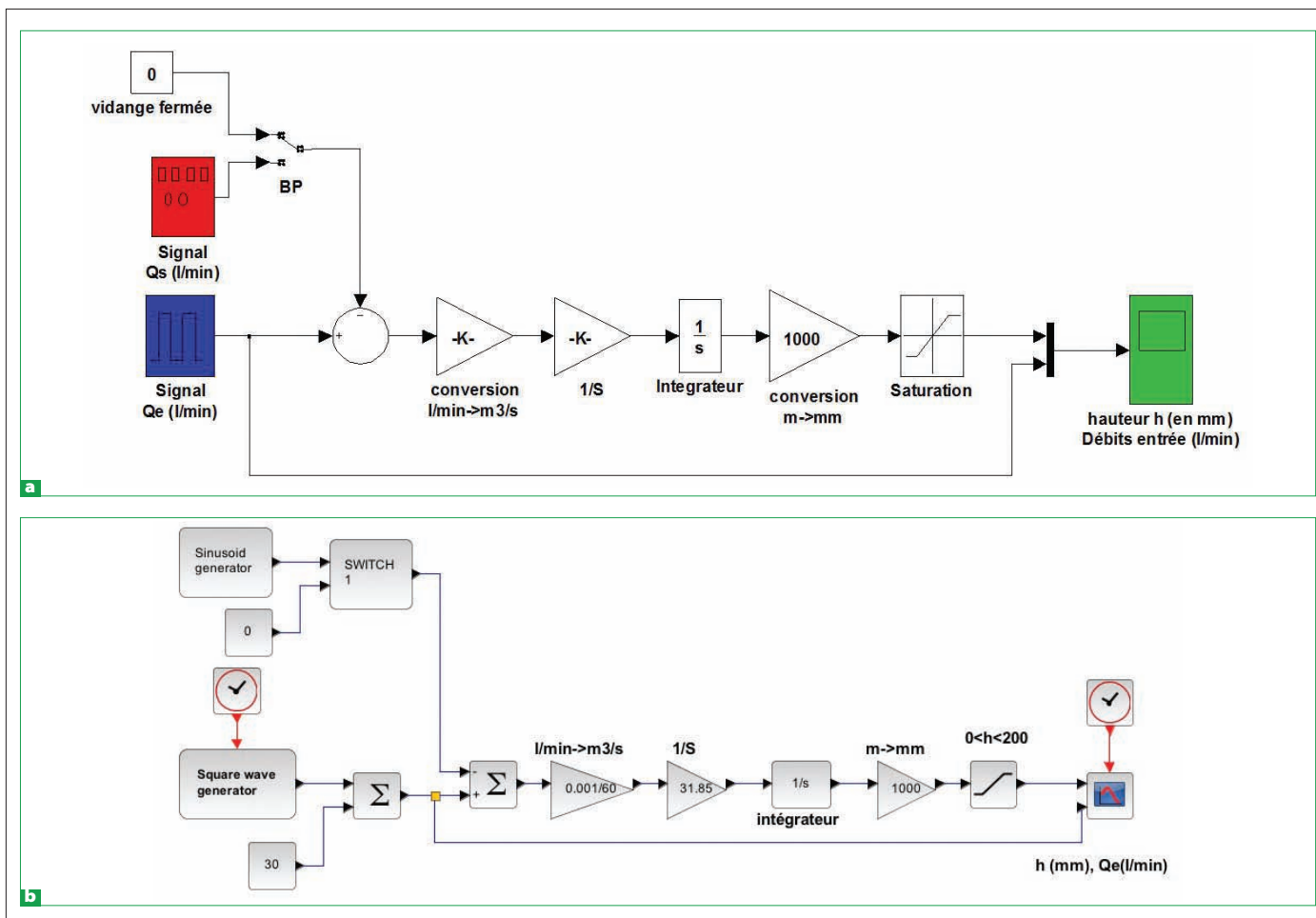
Bien que secondaire, le choix de l'environnement de programmation ne doit pas être sous-estimé. Celui-ci doit être modulaire, intuitif et robuste (au sens de la méthode numérique implémentée).

Nous présenterons des résultats de simulation issus indifféremment de deux logiciels de calcul très utilisés : Simulink associé à l'environnement Matlab et Xcos associé à l'environnement Scilab. Il est hors de propos de décrire ici le fonctionnement et l'utilisation de ces deux logiciels, ni même de comparer leurs performances. Nous renvoyons le lecteur aux tutoriels respectifs. Mais il est bon de préciser que la démarche de construction et d'élaboration d'un modèle de simulation est indépendante du choix de l'environnement de calcul.

Le schéma de principe

Soit le système hydraulique dont le schéma de principe est donné en 4. Il est composé d'un bac de grandes dimensions contenant un fluide et se remplissant par l'intermédiaire d'une vanne d'alimentation. On note $Q_e(t)$ le débit volumique d'entrée. La hauteur de fluide dans la cuve est notée $h(t)$. Le bac peut être vidangé grâce à l'ouverture d'une seconde vanne. On note $Q_s(t)$ le débit volumique de sortie.

Il existe des limites physiques à l'évolution de la hauteur de fluide $h(t)$, qui est toujours comprise entre



6 Le modèle de simulation, a Sous Matlab/Simulink, b Sous Scilab/Xcos

0 et H (hauteur du bac) ; elles devront être prise en compte par le modèle de simulation (principe de réalité).

Le modèle de connaissance : la phase primaire

Le principe de conservation de la masse $m(t)$ appliqué au système « bac U fluide » permet d'écrire l'équation différentielle suivante :

$$d m(t) / dt = \rho Q_e(t) - \rho Q_s(t)$$

ρ : masse volumique de l'eau

On suppose le fluide isovolume, ce qui permet d'écrire le bilan sous la forme suivante :

$$S d h(t) / dt = Q_e(t) - Q_s(t)$$

Compte tenu de nos objectifs de formation, nous avons choisi de représenter cette relation par le schéma-bloc 5, toujours dans le domaine temporel. Cette approche très modulaire permet de séquencer la phase de construction du modèle de simulation et de séparer les différents termes en blocs distincts. Il semble en effet raisonnable de toujours débiter par un modèle relativement simple susceptible d'être validé (sur des cas tests appelés *benchmark*) et de produire rapidement des résultats, qu'il sera facile d'affiner au fur et à mesure de l'étude en fonction des besoins (ce que l'on nomme couramment la phase d'apprentissage adaptatif).

Cette forme de représentation est très importante. Elle permet clairement de faire apparaître les deux

débits d'entrée et de sortie (à gauche), le bloc intégrateur où figure la condition initiale à prendre en compte – équation différentielle du 1^{er} ordre, nous avons choisi qu'à $t = 0$, $h(0) = 0$ –, un bloc modélisant les limites physiques du bac à remplir, et le signal de sortie $h(t)$ en bout à droite. Pédagogiquement, elle permet de mieux justifier l'équation de bilan, de faire apparaître les unités des variables qui transitent entre les blocs.

Ce travail préparatoire effectué, il est temps de traduire ce modèle dans l'espace virtuel du calculateur afin de procéder à sa simulation.

Le modèle de simulation

En codant ce schéma-bloc sous les environnements Matlab/Simulink et Scilab/Xcos, nous obtenons les modèles de simulation 6. Ce travail est facilité par le fait que la plupart des blocs nécessaires (gain pur, intégrateur, saturateur...) sont présents dans la bibliothèque et paramétrables. Là encore, nous renvoyons le lecteur aux tutoriels des deux environnements utilisés (Simulink et Xcos).

Ce qui en revanche est très important, c'est qu'il n'est absolument pas nécessaire de faire appel à des concepts mathématiques complexes (par exemple les transformées de Laplace) pour le codage. C'est la conséquence du travail préliminaire décrit précédemment. De plus, la totale similitude (sur le plan graphique) du modèle de simulation codé sous environnement informatique

avec le schéma-bloc **5** facilite grandement sa lisibilité et l'identification des blocs, et accrédite auprès des élèves le lien entre le modèle et la simulation.

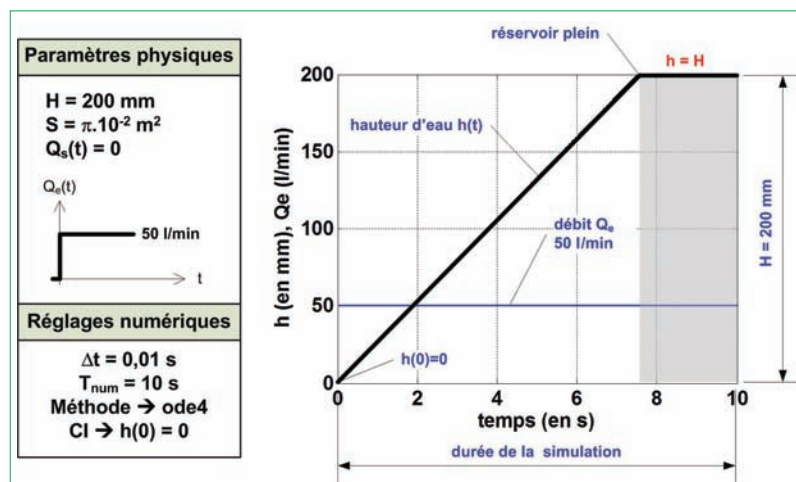
Les résultats de la simulation numérique

Une fois le modèle de simulation réglé (choix de la méthode numérique et pas de temps), il est facile d'obtenir l'évolution temporelle de la hauteur $h(t)$ sous la forme d'une courbe **7**. Celle-ci, obtenue dans une configuration très simple, permet de valider notre approche (il faudra souvent se poser cette question : « Devant cette courbe, les résultats numériques obtenus sont-ils cohérents ? »), de nous assurer de la bonne prise en compte des conditions initiales ou encore d'ajuster les réglages de la simulation. C'est une étape fondamentale, et elle ne doit surtout pas être éludée, ni même sous-estimée. En effet, s'il est très facile d'obtenir une courbe, il convient de garder en tête que ce résultat est issu d'un processus itératif fondé sur l'utilisation d'une méthode numérique approchée.

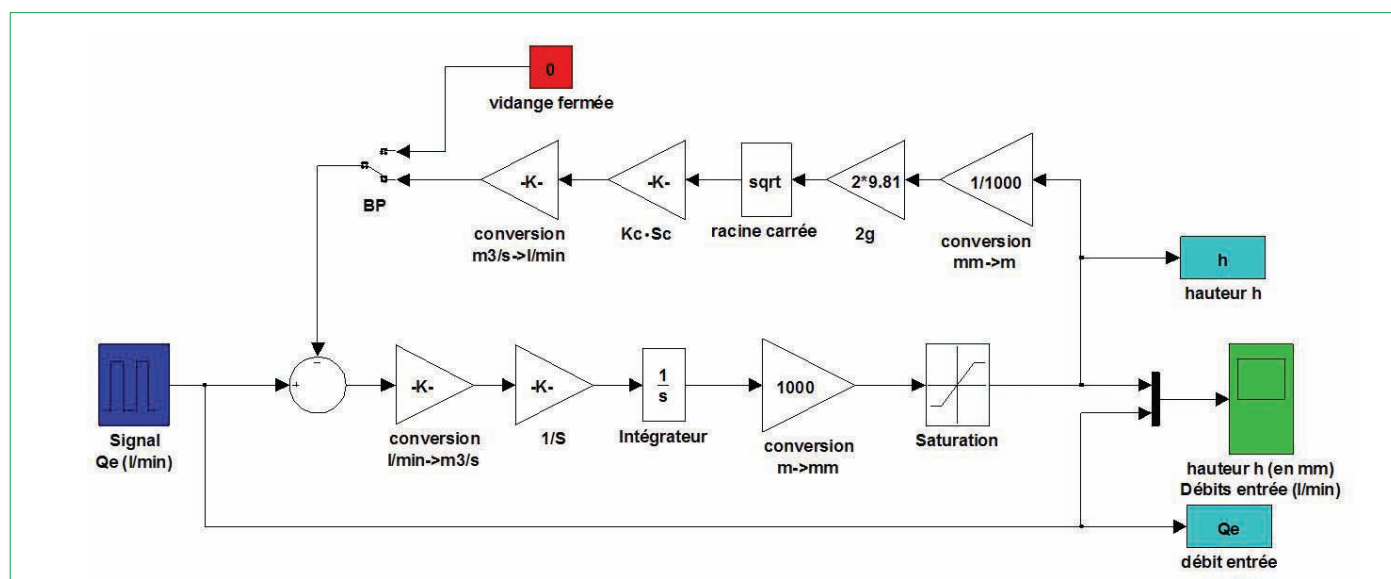
Pour être parfaitement complète et efficiente, l'étude numérique pourra être couplée à des résultats expérimentaux. Une fois cette étape franchie, le modèle de simulation permet de mener une vaste campagne d'essais, ce qui n'empêchera pas de demeurer vigilant sur les résultats produits. Il faut dans ce domaine faire preuve de beaucoup de « bon sens physique ».

Ce modèle primaire est considéré comme validé. La présence de blocs de conversion permet d'imposer en entrée un débit exprimé dans une unité usuelle (ici en litres par minute), ce qui pédagogiquement est très intéressant. La condition initiale est respectée, et le bloc « saturation » limite correctement la hauteur d'eau $h(t)$ à la taille du bac. Enfin, au bout de 7,6 secondes d'une évolution linéaire, le bac est plein.

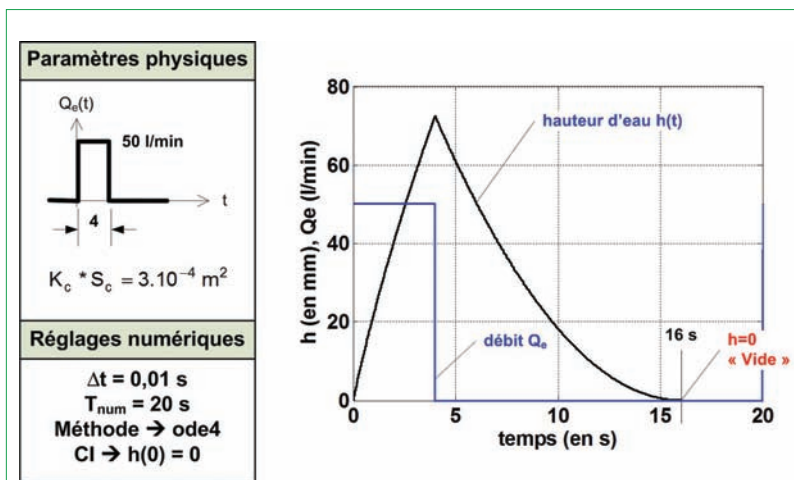
On pourrait s'étonner d'avoir recours à un système informatique sophistiqué afin de résoudre un problème aussi simple et facilement intégrable. À cela, on peut apporter deux réponses. *Primo*, l'existence d'une solution exacte permet justement de valider ce premier modèle de simulation. Une fois la courbe obtenue, on peut demander aux élèves de déterminer le temps de remplissage (lecture sur la courbe et calcul analytique). Une nouvelle configuration plus complexe avec, par exemple, un débit de fuite de type périodique permettra de convaincre les plus sceptiques du potentiel de la simulation numérique (pas de calcul, on donne du sens). On peut même envisager le cas inverse où l'on cherche la forme optimale (modèle de commande) du débit d'entrée assurant des performances prédéfinies. *Secundo*, le modèle numérique permet avec rigueur d'identifier chacun des termes intervenant dans l'équation de bilan, de lui affecter un poids relatif, de tracer son évolution. Toutes ces opérations permettent d'enrichir le processus de modélisation. Pourront alors être discutées les hypothèses émises sur la linéarité (ou non-linéarité)



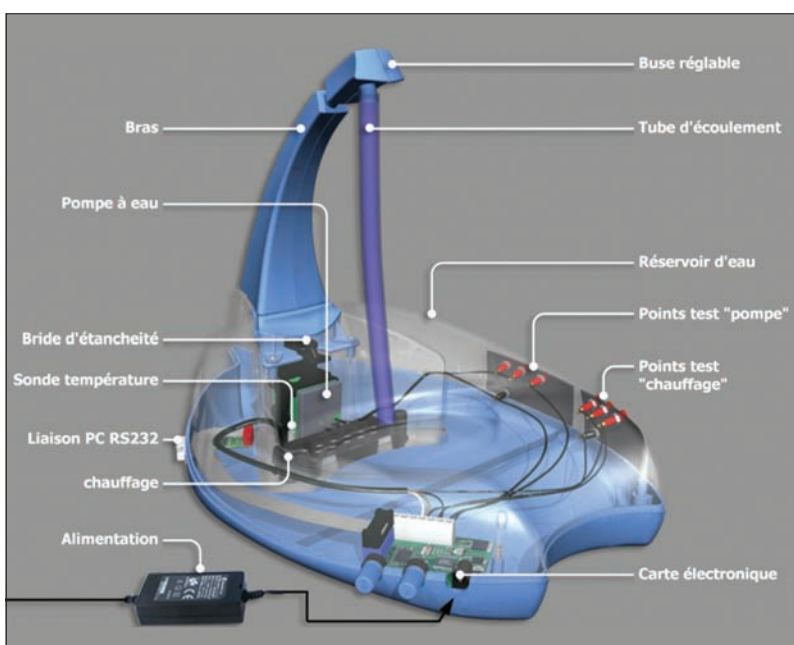
7 Les résultats de la simulation (version primaire)



8 Le modèle de simulation affiné



9 Les résultats de la simulation (version 2)



10 Vue générale du système

des modèles, leur invariance, la présence d'un régime dynamique, l'existence de perturbations...

Affiner le modèle : rien de plus facile !

Il est dans la logique de vouloir augmenter le degré de sophistication du modèle primaire créé, soit pour améliorer la qualité des résultats fournis soit pour le compléter en prenant en compte des phénomènes que l'on avait auparavant rejetés. Afin d'illustrer la capacité à faire évoluer facilement le modèle de simulation, on considère que la vanne de vidange est ouverte. En faisant un certain nombre d'hypothèses, il est possible de proposer (et de justifier) un modèle pour le débit de fuite $Q_s(t)$, ce qui donne :

$$Q_s(t) = K_c S_c \sqrt{2g h(t)}$$

K_c : coefficient de contraction

K_c dépend principalement de la forme de l'orifice de sortie (carré, circulaire, rentrant dit de Borda, en mince paroi...). On peut donner une valeur à K_c grâce à des abaques établis expérimentalement.

La structure modulaire du modèle primaire permet très facilement d'en proposer une nouvelle version. Il suffit d'ajouter quelques blocs et de les relier judicieusement. On obtient alors la figure 8, en prenant bien soin de respecter les unités des variables qui transitent entre les blocs.

La relation du débit de fuite est non linéaire, et obtenir « à la main » et rapidement l'expression de $h(t)$ dans ces nouvelles conditions se révèle une entreprise assez complexe. Le modèle de simulation ainsi établi permet de s'affranchir de ces difficultés en recentrant les efforts sur l'interprétation des résultats plutôt que sur les aspects purement calculatoires – ce qui correspond bien à une démarche d'ingénieur.

La figure 9 présente les résultats de la simulation ; on remarque que, dans une première phase, le débit d'entrée étant supérieur au débit de fuite, le niveau d'eau dans la cuve augmente. Au bout de 4 secondes, on n'alimente plus la cuve qui se vide alors en 16 secondes.

En conclusion, établir un modèle de simulation est obligatoirement le résultat d'un travail préparatoire qui mobilise bon nombre de compétences et de savoir-faire propres à une démarche d'ingénieur, ce qui est en parfaite adéquation avec les ambitions du programme de STI2D. Nous avons voulu montrer qu'il fallait travailler de manière itérative et concentrique. Il faut partir d'un modèle simple que l'on affine progressivement. Attention toutefois, un modèle simple ne signifie pas simpliste. Et, *a contrario*, un modèle sophistiqué à outrance n'est guère exploitable et peut même être pédagogiquement dangereux.

Auprès de l'élève, il faut faire passer le message qu'en s'affranchissant des contraintes du calcul (ce que la machine sait faire) on valorise les capacités et les compétences du modéleur (ce que la machine ne sait pas faire).

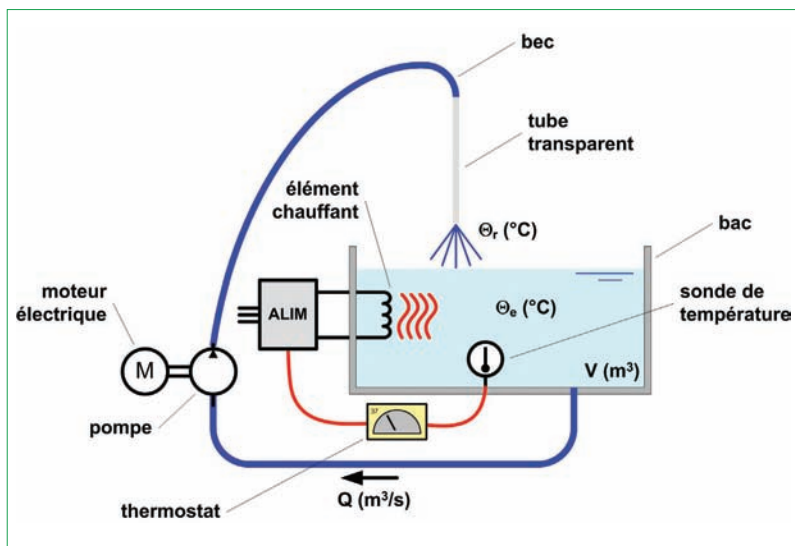
Franchir une étape : confronter le modèle simulé avec un système réel pluritechnique

En continuité avec l'exemple développé précédemment, il semblait primordial (en accord avec le programme de la formation STI2D) de montrer comment aborder le cas d'un système réel et pluritechnique. Nous avons donc choisi d'utiliser un système développé par la société Didastel Provence : le Shirodhara 10. Sommairement, il s'agit d'un appareil de relaxation dont le principe repose sur la régulation en température d'un fluide (de l'huile) qui s'écoule sur le front de l'utilisateur. Le système didactisé est en tout point identique à celui commercialisé ; seuls des points de test ont été ajoutés pour les besoins de l'expérimentation.

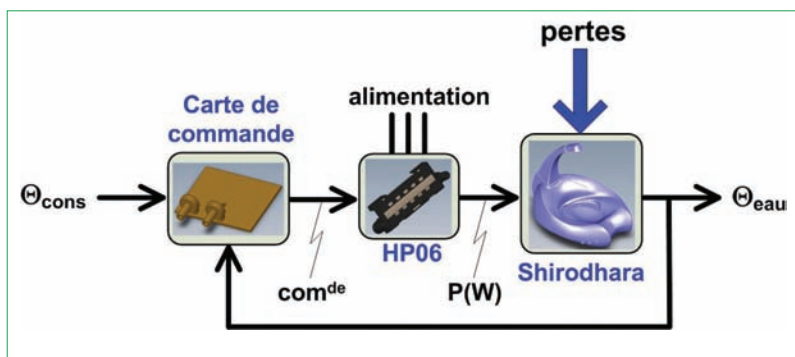
Il serait hors de propos de présenter en détail ce système. Nous renvoyons plutôt le lecteur au site internet du constructeur (www.didastel.fr), où il pourra trouver toutes les ressources nécessaires.

Le schéma de principe

Le principe de fonctionnement du Shirodhara est représenté très schématiquement en 11. On y retrouve une



11 Le principe de fonctionnement du Shirodhara



12 La boucle de régulation de température

cuve contenant un fluide (dans notre cas, de l'eau) qui peut être mis en mouvement par l'intermédiaire d'une pompe centrifuge, elle-même actionnée par un petit moteur électrique. Cette eau, aspirée dans la cuve, se trouve refoulée en partie supérieure par l'intermédiaire d'un bec, puis retombe dans la cuve sous forme d'un filet d'eau.

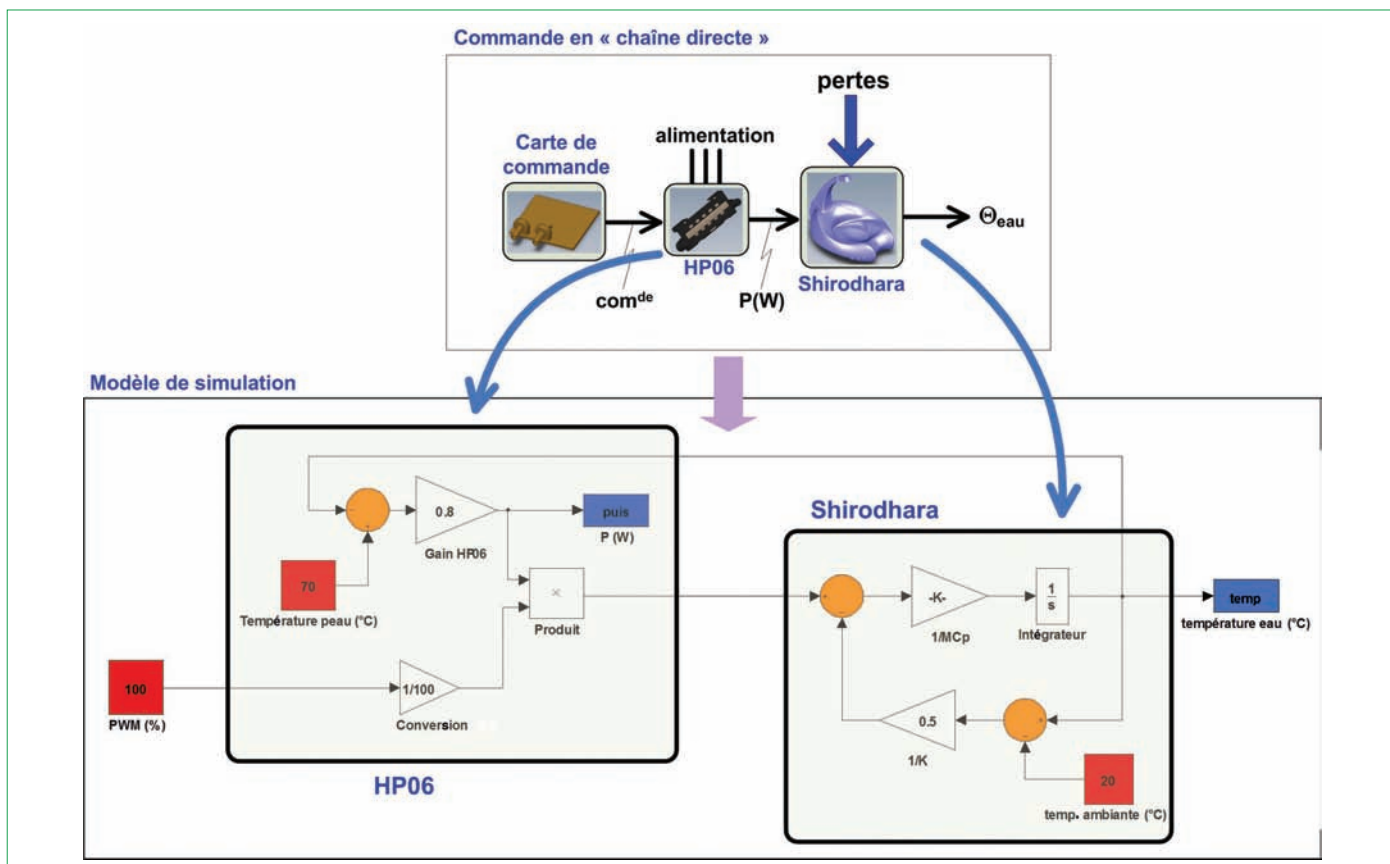
Pour une meilleure efficacité, le fluide doit être chauffé et maintenu en température malgré les déperditions thermiques. Il est possible d'assigner une température de consigne au fluide via un système de régulation qui se compose d'une résistance chauffante HP06 placée à l'intérieur de la cuve et en contact direct avec l'eau, d'un capteur de température et d'un thermostat pour la régulation 12.

Sur le système didactisé, une interface homme-machine (IHM) reliée à un PC permet de piloter facilement le Shirodhara, d'imposer différentes consignes, de modifier la forme du régulateur et d'en régler les différents paramètres.

Différents signaux sont récupérés et peuvent faire l'objet de courbes d'évolution, en particulier la température du fluide dans la cuve.

Le modèle de connaissance

On cherche à construire un modèle de simulation réaliste de la boucle de régulation. Bien que les phénomènes de transfert thermique soient très délicats à aborder,



13 Le modèle de commande et de simulation

il est envisageable de le faire en utilisant les principes d'analyse définis précédemment. Ainsi, pour la cuve, on utilise le principe de conservation de l'énergie, ce qui peut se traduire par la relation suivante :

$$d\Theta_{\text{eau}}(t) / dt = [\mathcal{P}_{\text{chauffage}}(t) - \mathcal{P}_{\text{pertes}}(t)] / M_{\text{eau}} C_p$$

$M_{\text{eau}} C_p$: caractéristiques du fluide

La puissance de chauffage (en watts) est délivrée par la résistance chauffante. La difficulté de cette équation de bilan vient des pertes régulières, dont il faut proposer une modélisation. Il est assez classique de considérer qu'au premier ordre ces pertes sont proportionnelles à l'écart de température entre l'eau et la température extérieure (ambiante), ce qui se traduit par le modèle de comportement suivant :

$$\mathcal{P}_{\text{pertes}}(t) = [\Theta_{\text{eau}}(t) - \Theta_{\text{ext}}] / K$$

K : coefficient de pertes

Par convention, plus K est grand, plus les pertes sont faibles.

Pour la puissance de chauffage, les documents fournis par le constructeur (disponibles en ressource) suggèrent un modèle de comportement de la résistance chauffante. Le transfert de chaleur s'effectue principalement par convection via la surface d'échange S , ce qui se traduit par le modèle suivant :

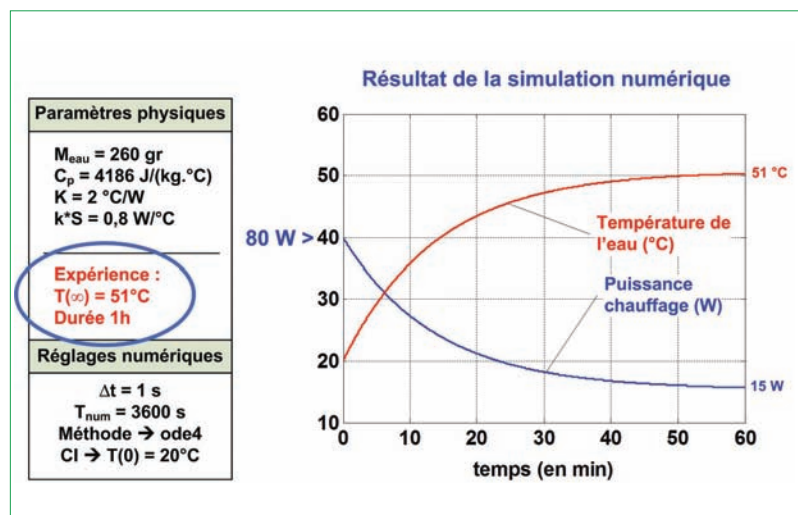
$$\mathcal{P}_{\text{chauffage}}(t) = k S [\Theta_{\text{conv}} - \Theta_{\text{eau}}(t)]$$

Ces modèles font intervenir bon nombre de paramètres. Certains sont fournis par le constructeur, d'autres font appel à des caractéristiques du fluide mis en mouvement, ou encore sont à caler expérimentalement. Comme démontré précédemment, devant la complexité des phénomènes mis en jeu, on cherche à séparer leurs effets afin de mieux valider les différents modèles proposés.

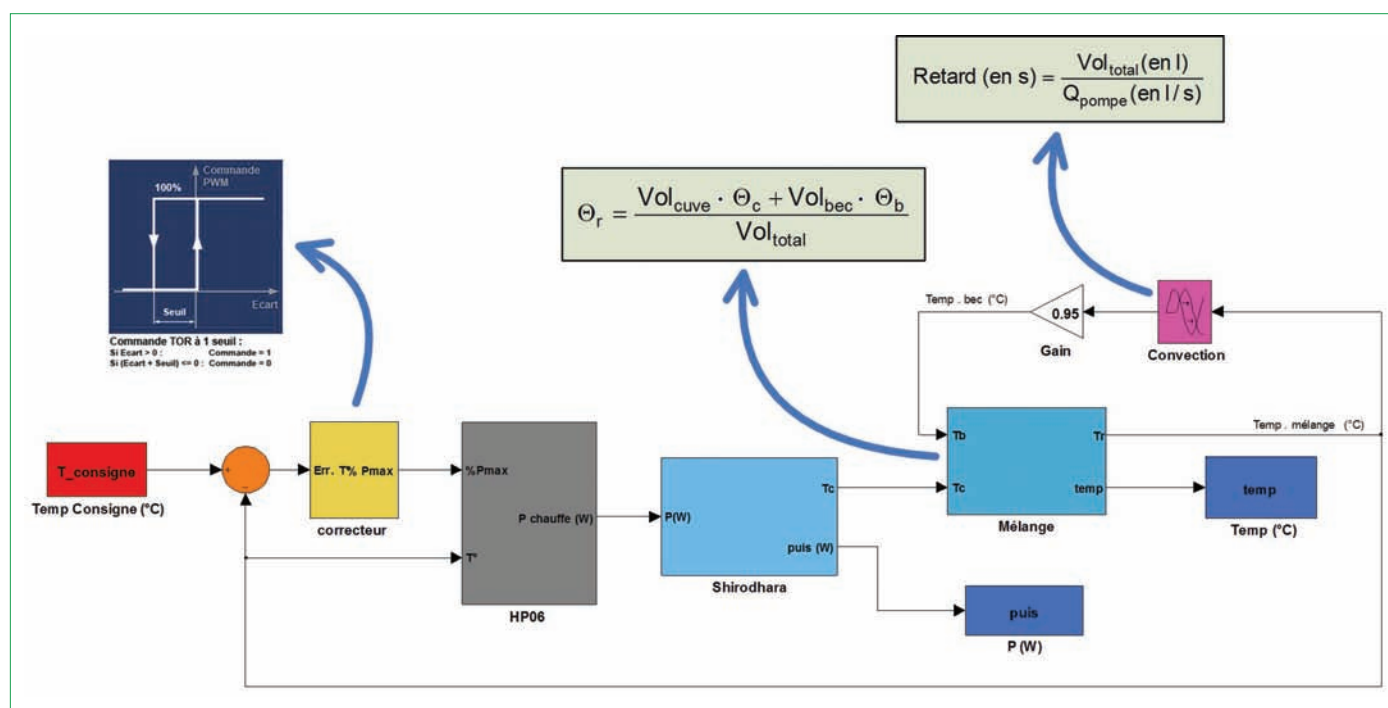
Par exemple, dans le cas d'une commande en chaîne directe, le régulateur n'est pas opérationnel, et la résistance fournit alors une puissance de chauffage nominale. En analysant l'équation de bilan énergétique, en régime stationnaire, la température du fluide doit se stabiliser, traduisant ainsi l'égalité entre la puissance fournie et la perte.

Naturellement, il est possible de modifier le type de commande (via l'IHM) en shuntant la sonde de température afin de se trouver dans une configuration « chaîne directe ».

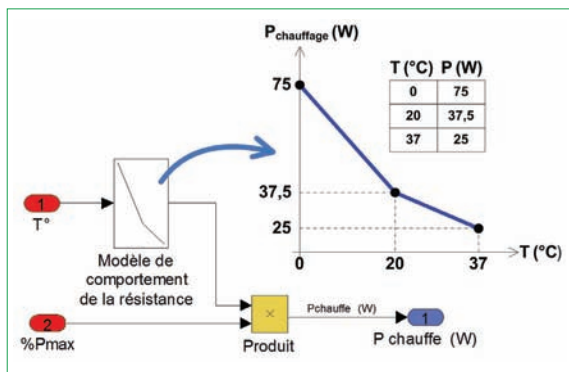
Le modèle de simulation associé au modèle de représentation **12** est donné en **13**.



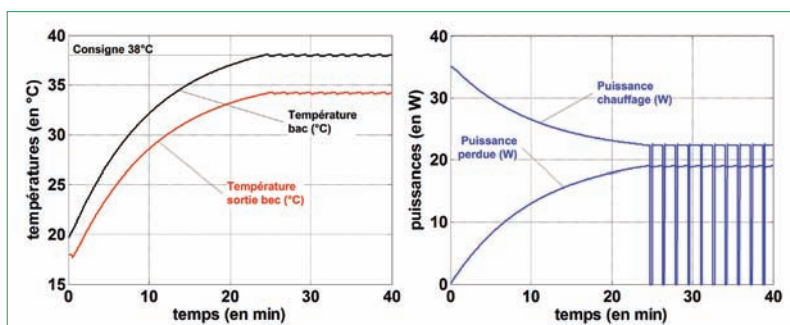
14 Les résultats de la simulation numérique



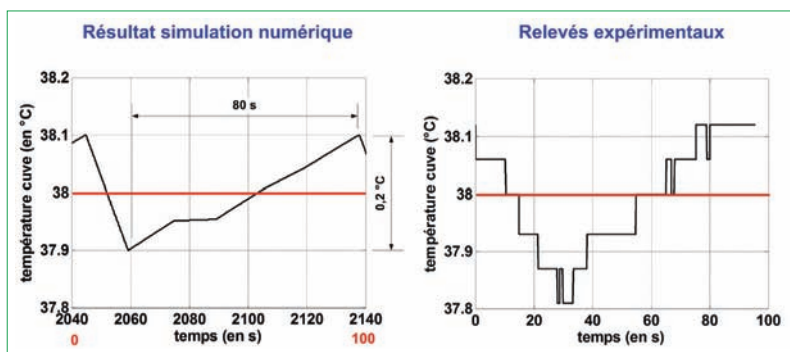
15 Le modèle de simulation affiné



16 Le modèle de comportement de la résistance électrique



17 Les résultats de la simulation numérique



18 Comparaison et validation

Les blocs d'entrée (en rouge) sont paramétrables. La commande PWM (*Pulse Width Modulation*) est réglée à 100 % (au maximum), ce qui imposera une puissance de chauffage initiale maximale. Le gain et la température de la peau sont extrapolés à partir des données du constructeur. Pour ce qui est du modèle lié à la cuve, seule la valeur de K (coefficient de pertes) est *a priori* inconnue. Il est nécessaire de réaliser une mesure afin de caler sa valeur au mieux.

La figure 14 collige les principaux résultats à la fois numériques et expérimentaux obtenus. Expérimentalement, il a fallu environ une heure pour atteindre une température stationnaire de 51 °C en partant d'une température ambiante de 20 °C. Cette constatation permet de caler la valeur du coefficient de perte K dans la loi de comportement proposée.

Sur le tracé de la simulation numérique, on note l'évolution temporelle de la puissance de chauffage.

Au départ, les pertes sont maximales, et la résistance délivre 40 W. En régime stationnaire, les 15 watts représentent la puissance fournie par la résistance chauffante afin de compenser les pertes et maintenir une température de l'eau constante.

Le modèle de simulation

Cette étape franchie, il nous est à présent possible de proposer un modèle de simulation plus complet (et plus affiné), en y incluant notamment un modèle de comportement pour le régulateur. Après quelques itérations, le modèle de simulation incrémenté devient celui donné en 15.

La structure par regroupement de blocs ou sous-systèmes permet de conserver une allure graphique épurée, en similitude et facilement identifiable pour l'élève. Le système est régulé en température, et l'on retrouve la boucle de retour ainsi que le comparateur placé en tête. On incorpore deux blocs de sortie (en bleu) afin de stocker l'évolution temporelle de la température et de la puissance de chauffage.

Pour le bloc HP06 de la figure 15, nous avons implémenté une nouvelle façon de prendre en compte le modèle de comportement de la résistance chauffante grâce à l'emploi d'un bloc *lookup table*, comme le montre la figure 16. À partir de trois points caractéristiques (résultats de mesure ou données constructeur), ce bloc permet d'obtenir par interpolation et/ou extrapolation la puissance de chauffage à partir de la température de l'eau en contact. Cette approche est en parfaite adéquation avec la définition d'un modèle de comportement. Assurant le lien avec l'activité expérimentale complémentaire, elle est facile à mettre en œuvre, et permet de s'affranchir de l'écriture d'un modèle de connaissance. À noter, dans le cas qui nous occupe, les résultats de simulation obtenus ne diffèrent que très peu d'un modèle à l'autre.

La figure 17 présente les résultats obtenus. La montée en température s'effectue en environ 25 min pour une consigne de 38 °C, ce qui est en accord avec les mesures expérimentales. Lorsqu'elle est atteinte, le régulateur TOR (Tout Ou Rien) coupe la résistance chauffante, ce qui provoque une chute de température de l'eau liée aux pertes. Une fois le seuil inférieur (réglable) atteint, la résistance se trouve à nouveau sous tension, assurant une remontée en température.

En effectuant un zoom sur la courbe de simulation, on peut comparer plus finement les résultats obtenus avec les relevés expérimentaux 18.

On note que la période d'oscillation de la température de l'eau est respectée, ainsi que son amplitude. On retrouve même la dissymétrie entre la phase de refroidissement et la phase de remontée en température. Ces observations accréditent la validité du modèle de simulation construit, en particulier en ce qui concerne les différentes pertes et autres transferts thermiques.

Extrait de l'introduction au programme de STI2D

Modalités d'enseignement

[...] Les modalités d'enseignement privilégient les activités pratiques d'analyse de systèmes techniques réels et actuels ainsi que le projet. [...]

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'enseignement s'appuie sur des études de systèmes qui nécessitent la mise en œuvre d'outils d'analyse, de représentation, de recherche et de validation de modèles ainsi qu'une culture des solutions constructives mises en œuvre.

En conclusion, face à un système complexe (ceux qui sont présents dans les laboratoires de STI2D) dont on cherche à établir un modèle de simulation, il faut se poser les quelques questions suivantes :

- De quelles parties distinctes se composent le système étudié ? Puis-je le représenter facilement sous forme d'un schéma-bloc ?
- Quels sont les blocs dont je peux proposer un modèle de connaissance ? Quels sont les blocs qui représentent des phénomènes physiques complexes ou couplés, pour lesquels il faudra envisager un modèle de comportement ? Suis-je en mesure de définir les différentes entrées et sorties de chaque bloc ?
- Quelles mesures expérimentales sont à ma disposition sur le système instrumenté ?
- Comment puis-je configurer le système afin de mettre en évidence le ou les phénomènes que je veux modéliser ? Puis-je faire de même pour le modèle de simulation ?
- Le modèle de simulation établi est-il représentatif du système réel étudié ? Doit-il être affiné ?

Conclusions et perspectives

Les contenus présentés ici correspondent à la première journée de formation. Pour la seconde, notre choix s'est porté sur la présentation d'un autre système, l'Hemomixer (voir V. Pérez et P. Bontemps, « Du sang neuf pour l'enseignement technologique », *Technologie*, n° 176, nov.-déc. 2011), et d'un modèle de comportement simple déjà écrit. L'objectif est de confronter le réel et le modèle, d'essayer d'améliorer les performances du modèle et donc sa pertinence. Nous proposons ensuite aux participants de rédiger une séquence de TP adaptée au niveau attendu de leurs élèves.

Nous avons rencontré plus d'une centaine d'enseignants au cours de ces formations, et nous avons constaté chez eux une forte envie de s'approprier ces connaissances, nouvelles pour la plupart d'entre eux, qui n'avaient pas abordé les modèles de comportement dans leur formation initiale.

L'aspect confrontation entre le système réel et le modèle est plutôt rassurant, car on reste proche des activités de sciences de l'ingénieur.

La plupart des enseignants abordant ces notions pour la première fois, il est très important que les premiers systèmes retenus dans les équipements de leurs classes soient fournis avec un modèle de comportement validé. Ces modèles doivent pouvoir tourner au moins sous Simulink (Matlab, assez répandu) et sous Xcos (Scilab, facile à obtenir).

Bien sûr, tous les obstacles ne sont pas levés, et l'application concrète en TP avec des élèves va encore demander du travail. Nous avons découvert que les points suivants méritaient une grande attention pédagogique :

- La confrontation réel-modèle se traduit quasi systématiquement par une comparaison de courbes, ce qui n'est pas évident pour des élèves de STI2D peu habitués à ce moyen d'expression d'un résultat. Une grande attention doit être portée à la formation sur ce point.
- Les laboratoires sont équipés de logiciel de mathématiques – Matlab et/ou Scilab. Ces logiciels sont utiles pour d'autres activités – tracé de courbes de résultats de mesure, analyse de ces courbes... – qu'il faut favoriser auprès des élèves.
- La technologie actuelle fait que les courbes mesurées sur le système réel apparaissent sur un écran d'ordinateur comme celles obtenues à partir du modèle de comportement, et cela peut poser des problèmes d'identification. On revient là à la comparaison réel-virtuel, si délicate avec les moyens de communication actuels.

Tout cela montre que, au-delà du modèle de connaissance qui doit rester une boîte noire à ce niveau de formation des élèves, la pratique des modèles de comportement est d'une grande richesse. D'ailleurs, la plupart des utilisateurs industriels de ces modèles sont bien sûr incapables de les créer dans leur totalité, et cela ne les empêche pas de les utiliser à bon escient et d'en tirer profit.

Enfin, ce nouveau programme ambitieux s'adresse à des élèves qui baignent dans un monde virtuel de plus en plus présent dans leurs activités extrascolaires. Alors ne doutons pas que les modèles de simulation – virtuels par essence – ainsi que la confrontation réel-modèle seront riches d'enseignement pour eux.

Les modèles de comportement sont utilisés tout au long du cycle de vie des produits, en conception évidemment, mais aussi en intégration et en maintenance. Leur présence – et les possibilités des logiciels supports – ne peuvent que s'accroître. Les élèves de STI2D, quelle que soit leur poursuite d'études, seront confrontés à ces modèles dans leur vie professionnelle, qui ne sera sûrement pas terminée en 2050 ! ■

Remerciements

Nous tenons à remercier les participants à ces journées de l'Académie d'Aix-Marseille ; sans leur apport, nous n'aurions pu rédiger ce texte.