

Un accélérateur d'apprentissage

ALAIN CAIGNOT ET DAVID VIOLEAU ^[1]

L'industrie du jeu vidéo propose des logiciels, mais aussi du matériel dédié au loisir, dont nombre de nos élèves sont adeptes. Voici donc un simulateur de course automobile didactisé qui constitue un excellent support de TP en prébac comme en postbac.

La société SimXperience, créée en 2009, est la première à proposer un simulateur de course automobile en kit destiné aux particuliers ou aux organismes événementiels à un prix raisonnable, allant de 3 000 à 20 000 euros en fonction des options choisies **1**. Le simulateur basique comporte deux vérins linéaires situés entre une embase et le siège articulé, destinés à reproduire les mouvements, et donc les sensations pour le joueur, de roulis et tangage du siège. Une configuration avec un troisième axe simulant le mouvement de chasse arrière du véhicule est disponible.

La société DMS a didactisé ce simulateur pour faire découvrir aux élèves le monde de la simulation automobile tout en offrant aux enseignants des outils innovants utiles à l'apprentissage **2**. Notre objectif est ici de montrer que ce système moderne et motivant peut aider les élèves à acquérir des compétences et connaissances des programmes de STI2D, de S-SI et de classes préparatoires aux grandes écoles.

Principe de fonctionnement et constitution du simulateur

Le simulateur est fourni avec un logiciel qui permet d'interagir avec différents jeux vidéo **3** d'une part et avec la partie physique du simulateur que sont les vérins linéaires d'autre part. En effet, la majorité des jeux de course rendent accessibles les données d'accélération longitudinale (dans le sens de la route) et latérale du véhicule en temps réel. La difficulté est ensuite de faire ressentir ces accélérations au joueur. La méthode classique consiste à lui donner l'illusion qu'il les subit : le siège s'incline tandis que les images du jeu défilent. L'oreille interne sera soumise par la pesanteur à des accélérations qui donneront l'impression au joueur de subir

mots-clés
équipement didactique, projet, simulation

les accélérations longitudinales et latérales du véhicule. Tout l'art de la simulation est de relier correctement les mouvements angulaires souhaités aux accélérations émises par le jeu. Compte tenu du débattement limité des vérins et de la stratégie employée, les accélérations longitudinales reproduites sont bien inférieures à celles ressenties dans un véhicule de course réel.

Le siège sur lequel repose le joueur est porté par un joint de cardan lié au châssis. Cette liaison avec le bâti autorise les deux mouvements de roulis et tangage, transmis par deux vérins électriques linéaires SCN5 **4** en liaison rotule avec le bâti d'un côté et le support de siège de l'autre **5**. La masse de l'ensemble joueur et siège reposant sur les liaisons du joint de cardan, les vérins ne servent qu'à la mise en mouvement du siège ; ils sont donc peu imposants.

Les vérins SCN5 sont les plus utilisés dans les simulateurs à destination des particuliers, car leur prix est abordable (500 €), et ils possèdent des performances suffisantes pour la simulation de course (100 N de poussée maximale, course de 150 mm et vitesse de 200 mm/s). Ils sont constitués d'un moteur pas à pas et d'un dispositif vis-écrou de précision. Une carte électronique intégrée à chaque vérin en élabore les consignes de position, de vitesse et d'accélération. Un codeur incrémental est utilisé, entre autres, pour la prise d'origine.



1 Le simulateur complet commercialisé par SimXperience

[1] Professeurs en classes préparatoires aux grandes écoles et formateurs STI2D pour l'académie de Paris.



2 Le modèle d'entrée de gamme didactisé par DMS

Un boîtier gère l'alimentation 24 V des vérins, mais également la communication entre les vérins et l'ordinateur.

Le simulateur didactisé

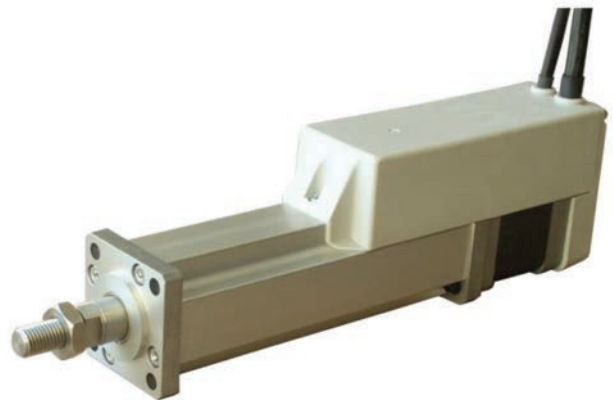
Dans un souci pédagogique, la société DMS a équipé le simulateur de capteurs pour la mesure des efforts dans les vérins et leurs déplacements, et d'une centrale inertielle donnant accès aux accélérations du siège ainsi qu'à ses déplacements et vitesses angulaires **6**. Une interface **7** permet de récupérer non seulement les signaux des capteurs, mais également les grandeurs émises par le jeu vidéo en temps réel (vitesse, régime moteur et surtout accélérations longitudinale et latérale du véhicule) **8** ainsi que les données issues du volant à retour de force Logitech G27. Le logiciel propose également un mode de pilotage direct des vérins, au moyen duquel on peut spécifier des lois en échelon de position ou de vitesse ainsi qu'en sinus pour chaque vérin, ce qui permet d'analyser le comportement du siège. Enfin, une loi de commande quelconque peut être définie en Python et testée sur le simulateur.

Le simulateur est livré tout équipé et monté (grand écran, ordinateur et logiciels préinstallés).

La nouveauté, c'est la possibilité de faire travailler sur un système didactisé plusieurs élèves en parallèle, voire tout le groupe de TP, ou de manière collaborative selon le principe de travail en flots par groupes de 3 ou 4. En effet, depuis n'importe quel ordinateur



3 Le logiciel Sim Commander pour la gestion de la simulation et le jeu F1 2011



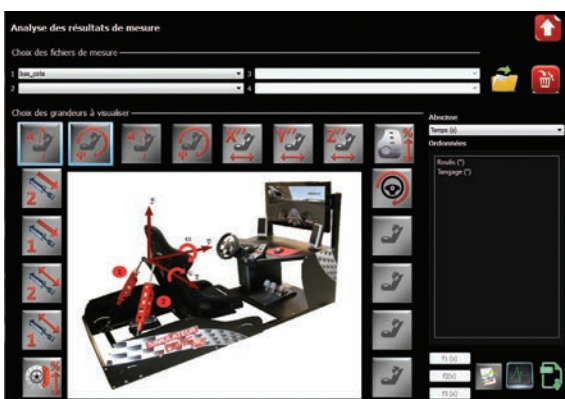
4 Le vérin linéaire SCN5



5 Les liaisons dans le simulateur



6 Capteur d'effort, centrale inertielle et capteur potentiométrique à câble

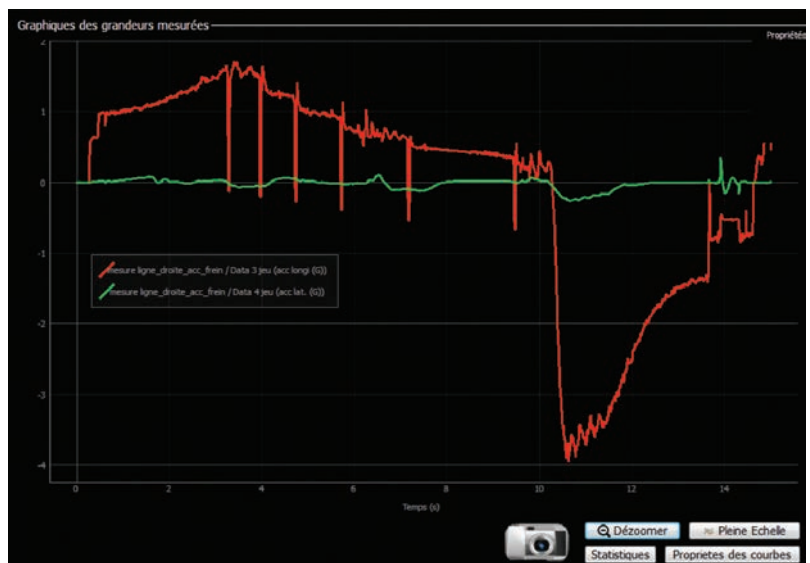


7 L'interface d'analyse des mesures

connecté au réseau où l'interface est installée, un groupe peut analyser les signaux ou piloter le système. Cette technologie permet une grande souplesse dans l'utilisation du système et un réel travail en îlots, c'est-à-dire des activités différentes menées conjointement sur le simulateur ou son modèle numérique pour résoudre un problème commun.

Exemples d'activités pratiques

Les activités permettent de caractériser les performances du simulateur en s'appuyant sur la démarche de



8 La mesure des accélérations longitudinales et latérales en ligne droite

l'ingénieur, qui met en regard trois domaines particuliers, réel, laboratoire et simulation 9. Le domaine du réel est ici celui du jeu vidéo, définissant les accélérations que doit ressentir le pilote ; le domaine du laboratoire, celui du simulateur instrumenté, qui doit reproduire les sensations de pilotage, le domaine de la simulation reposant quant à lui principalement sur les modèles mécaniques sous modélisateur volumique.

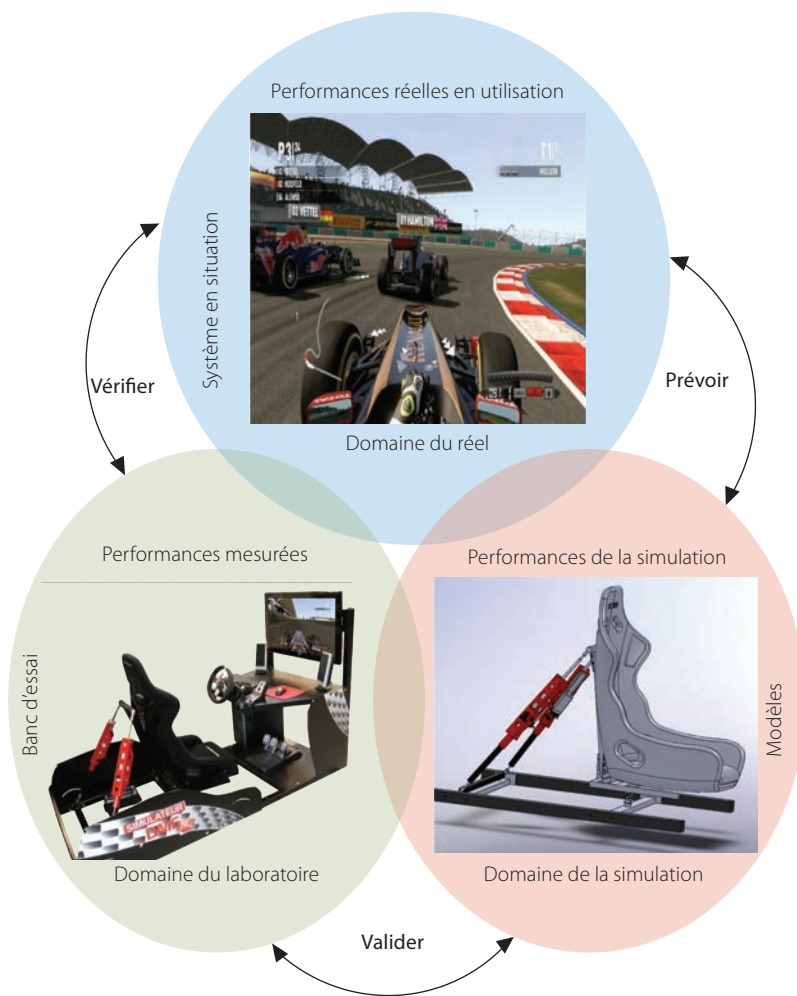
● L'analyse du système

La première activité proposée est d'analyser la structure du simulateur 10, d'en découvrir le fonctionnement et les performances et de le mettre en œuvre (à partir de diagrammes de séquence, par exemple). C'est l'occasion de réaliser des mesures pour caractériser le comportement du véhicule en ligne droite, et d'observer les écarts entre les comportements attendu (décélération donnée par le jeu de l'ordre de 4 G) et mesuré (pic de décélération obtenu par la centrale inertielle de l'ordre de 0,2 G !). Cette activité permet de conclure qu'il n'est pas possible avec un simulateur d'encombrement limité de reproduire les sensations procurées par des accélérations réelles.

● La détermination des lois de commande des vérins

La détermination des lois de commande des vérins pour reproduire des sensations cohérentes avec les informations données par le jeu vidéo demande au préalable, à un niveau prébac comme à un niveau postbac, de réaliser plusieurs activités, menées par plusieurs groupes en parallèle, autour de centres d'intérêt relatifs à la modélisation des mécanismes.

Dans un premier temps, l'analyse de la mesure en ligne droite permet d'observer que le logiciel d'origine livré avec le simulateur pilote les vérins de manière que les angles de roulis et tangage du siège soient proportionnels aux accélérations latérale et



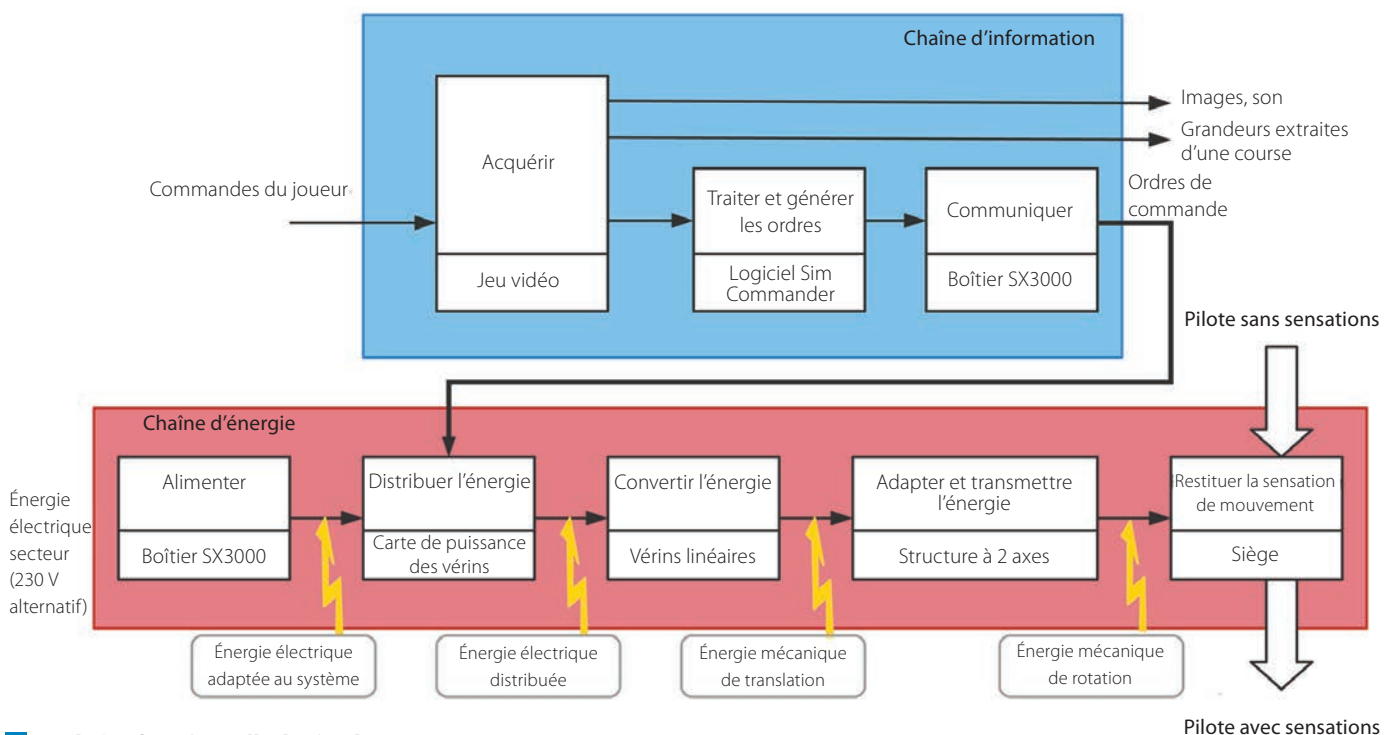
9 La démarche de l'ingénieur et ses domaines d'étude

longitudinale. Cela permet d'avoir une loi de commande simple mais pertinente vis-à-vis du ressenti lors d'un pilotage.

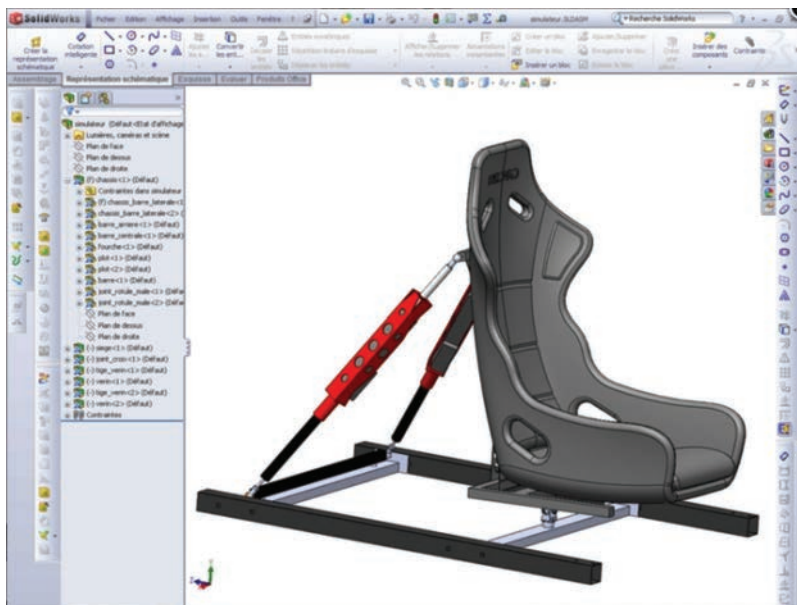
Pour établir ensuite la relation entre le pilotage des vérins et les angles de roulis et tangage, il faut connaître la loi géométrique reliant les déplacements des vérins et les deux angles. Pour cela, il est possible d'utiliser une maquette numérique du siège **11** et d'imposer des lois de commande des vérins ou du siège pour en déduire les relations entre les paramètres. Les élèves remarquent tout de suite qu'il est indispensable de mettre en place le modèle de liaisons pour valider le modèle numérique obtenu automatiquement par le logiciel de simulation. Cette activité permet de mettre en regard la modélisation numérique et la modélisation théorique des liaisons **12**.

La validation des relations obtenues impose de mener en parallèle des expériences (écart entre le système simulé et le système du laboratoire). Le logiciel développé par DMS permet pour cela d'imposer des déplacements quelconques aux vérins et de tracer l'évolution des angles de tangage et de roulis. On peut ainsi par exploitation des courbes obtenir les lois de mouvement et les comparer aux résultats de la simulation **13**. Les élèves sont sensibilisés à la nécessité de s'assurer que les capteurs soient bien réglés (gains, offsets) pour obtenir des lois cohérentes avec les relations obtenues par simulation.

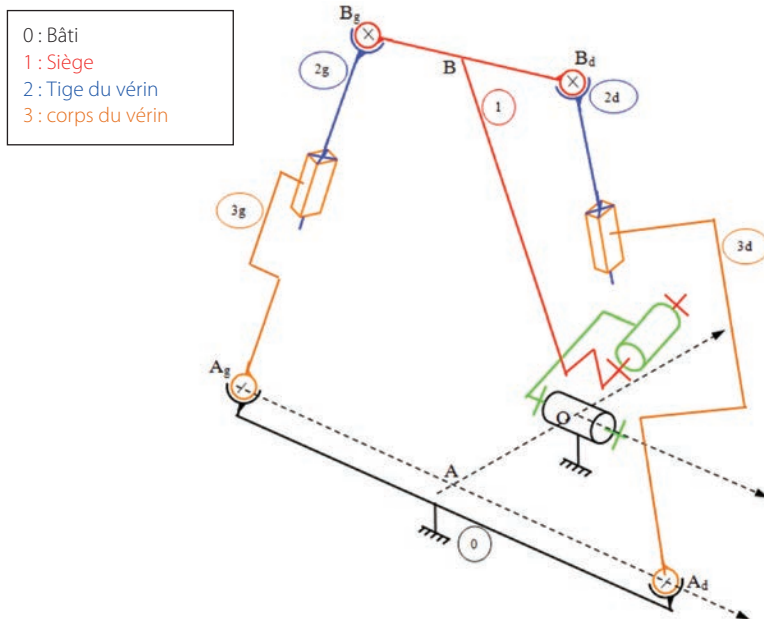
Une fois les lois déterminées et validées, les élèves peuvent les implanter dans le logiciel de pilotage et tester le comportement du siège avec un jeu vidéo. Succès garanti !



10 La chaîne fonctionnelle du simulateur



11 La maquette volumique du simulateur



12 Le schéma des liaisons en perspective du simulateur

En CPGE, il est possible d'aller plus loin en utilisant le modèle mis en place pour valider l'exigence de simplicité de montage définie dans le diagramme d'exigences en montrant que le modèle est bien isostatique.

● Le dimensionnement des vérins

La démarche de dimensionnement d'actionneurs est également proposée à travers différentes activités sur ce système. En effet, la structure a été conçue de manière que les vérins n'aient pas à supporter la masse du joueur. Cependant, on peut s'interroger sur l'exigence de masse maximale de 120 kg indiquée dans le cahier des charges du simulateur, et vérifier que les vérins peuvent supporter en statique et en dynamique cette masse maximale. Grâce aux capteurs d'effort, après

un étalonnage indispensable, les élèves vont analyser la transmission d'efforts et l'équilibre statique du siège dans plusieurs positions. Ils concluront par des études graphiques ou analytiques sur la limite d'utilisation des vérins.

● Le comportement fréquentiel du système

Le comportement dynamique hautes fréquences du simulateur est essentiel pour bien restituer les sensations. Lorsque le joueur ne conduit pas bien le véhicule, les irrégularités du bas-côté engendrent des vibrations qui doivent pouvoir être reproduites par les vérins.

Cette problématique est l'occasion de découvrir le comportement fréquentiel d'un système. Cette activité, qui demande un grand nombre de mesures, peut être menée par tout le groupe de TP (jusqu'à 24 élèves !) en parallèle, et une mise en commun peut même rendre interactive l'identification fréquentielle.

Le logiciel de pilotage des vérins permet d'imposer une consigne sinusoïdale à chaque vérin en faisant varier l'amplitude et la fréquence du signal. Les élèves voient parfaitement le déphasage et la baisse d'amplitude aux hautes fréquences. On peut même montrer qu'on excite les structures élastiques (barre amortisseur) à très haute fréquence (10 Hz). Chaque élève pourra ensuite extraire un déphasage et une amplitude pour une fréquence donnée, et, par synthèse des données récupérées par tous les élèves, le groupe pourra tracer un diagramme fréquentiel et déterminer la fréquence limite d'utilisation des vérins. Une identification temporelle permettra de confirmer ce comportement.

● L'ajout d'un troisième axe

Pour terminer, il est pertinent de mener des activités de type projet de reconception ou d'amélioration du système. Le simulateur didactisé ne possède que deux axes : roulis et tangage. Or, la prise en compte de la chasse arrière du véhicule lors d'un tête-à-queue par exemple ou d'un virage par temps de pluie améliore considérablement les sensations. Le projet est donc d'ajouter un troisième axe sous des contraintes d'encombrement, d'utilisation d'un troisième vérin identique et de simplicité de montage (assemblage uniquement de pièces achetées dans le commerce). Les élèves devront mettre en place un schéma cinématique de leur solution et valider par simulation le respect des contraintes d'encombrement et de débattement. Ils devront ensuite vérifier que la solution proposée supporte bien la masse du simulateur deux axes (on utilise la même structure sans la changer pour que l'ensemble soit modulaire). Des solutions telles que des glissières à billes ou des patins de friction pourront être étudiées et dimensionnées selon la charge supportée ou l'usure. Pour finir, la solution doit être spécifiée géométriquement, et les pièces commandées puis assemblées. La figure 14 présente un exemple de solution possible.



13 La loi de commande identifiée expérimentalement (tracé des déplacements des vérins en fonction de l'angle de roulis)

Ces exemples d'activités démontrent la richesse pédagogique du simulateur et son aptitude à faire acquérir les compétences et connaissances des programmes de S-SI, de STI2D et de CPGE. Le logiciel, par son mode d'acquisition et de pilotage multiposte, permet de faire travailler plusieurs élèves en parallèle sur le système, ce qui en rentabilise l'achat, facilite les pratiques pédagogiques en îlots ou par projet, et laisse plus de temps à consacrer à chaque élève pour l'enseignant. Il est maintenant disponible sur tous les nouveaux systèmes développés par DMS.



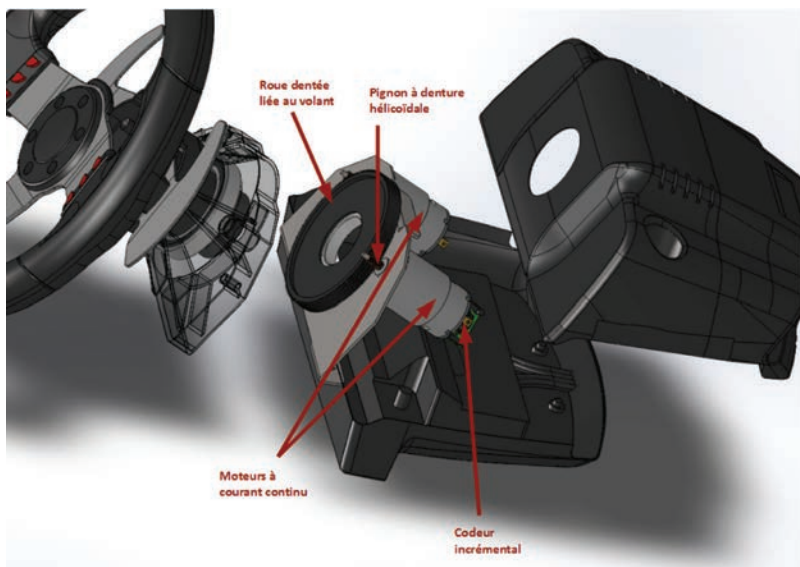
14 La solution de l'implantation d'un 3° axe pour le mouvement de la chasse

Le volant à retour de force

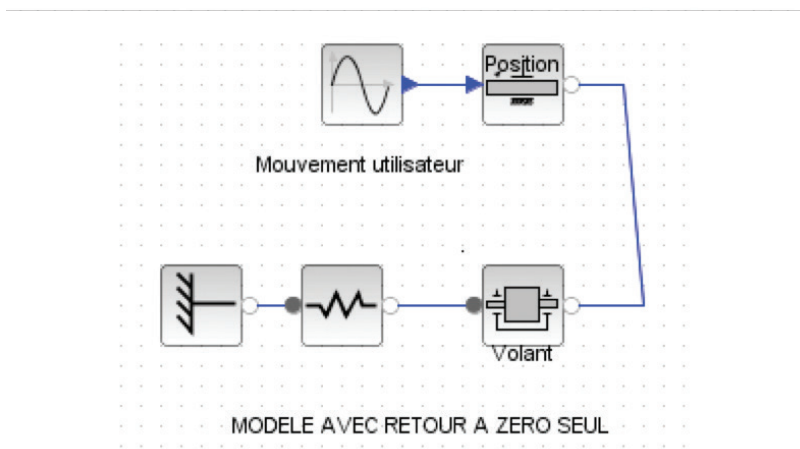
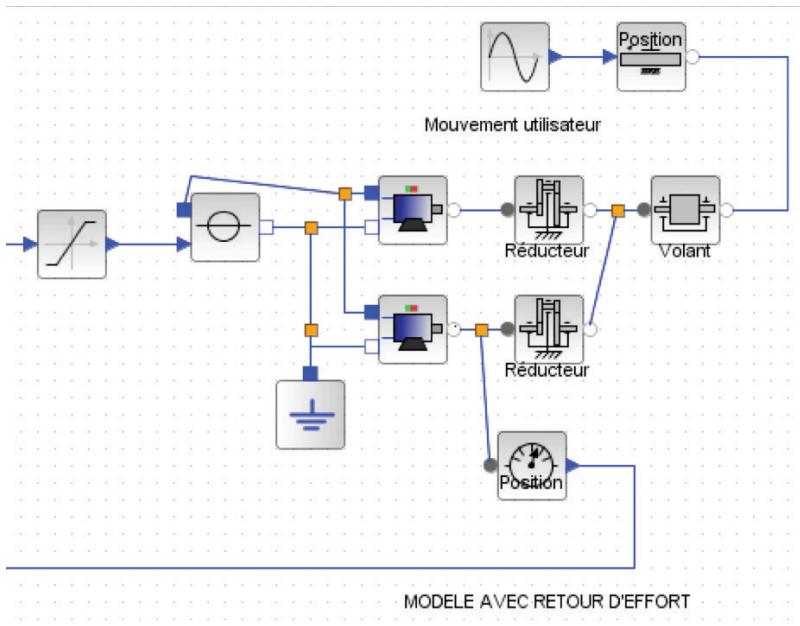
Pour découvrir d'autres aspects de la formation (systèmes à événements discrets, asservissements, multiphysique...), le volant à retour de force Logitech G27 utilisé dans le simulateur de course est proposé en une version instrumentée support d'activités pédagogiques spécifiques **15**. Bon complément au simulateur, cette entrée de gamme intéressante pour aborder la commande des systèmes et la modélisation plaît aux élèves et permet de réaliser de nombreuses activités. Le logiciel multiposte offre là encore la possibilité de



15 Le sous-système didactisé volant à retour de force G27



16 Les constituants du volant à retour de force



18 La modélisation multiphysique (module Simm de Scilab)



17 Le boîtier d'acquisition permettant d'observer des signaux variés à l'oscilloscope

réaliser des travaux pratiques organisés différemment pour faciliter l'enseignement.

La structure du volant est simple. Le joueur entraîne le volant relié à une roue dentée engrenant avec deux moteurs à courant continu pour augmenter le couple exercé par le retour de force. L'un d'eux possède un codeur incrémental qui permet non seulement de connaître la position du volant, mais également de participer à l'élaboration du retour de force 16.

Un pédalier constitué de trois pédales dont la position est mesurée par des potentiomètres angulaires est accouplé au volant et reproduit les pédales d'embrayage, de freinage et d'accélération d'un véhicule. Un ensemble de boutons et leviers sont également disponibles sur ce système pour configurer le volant ou valider les menus de jeu.

Le volant a été couplé à un boîtier de mesure qui permet d'avoir accès directement sur l'oscilloscope aux signaux délivrés par les différents capteurs ou à la tension et au courant d'un moteur, et donc de découvrir différents types de signaux : analogiques, logiques, numériques 17...

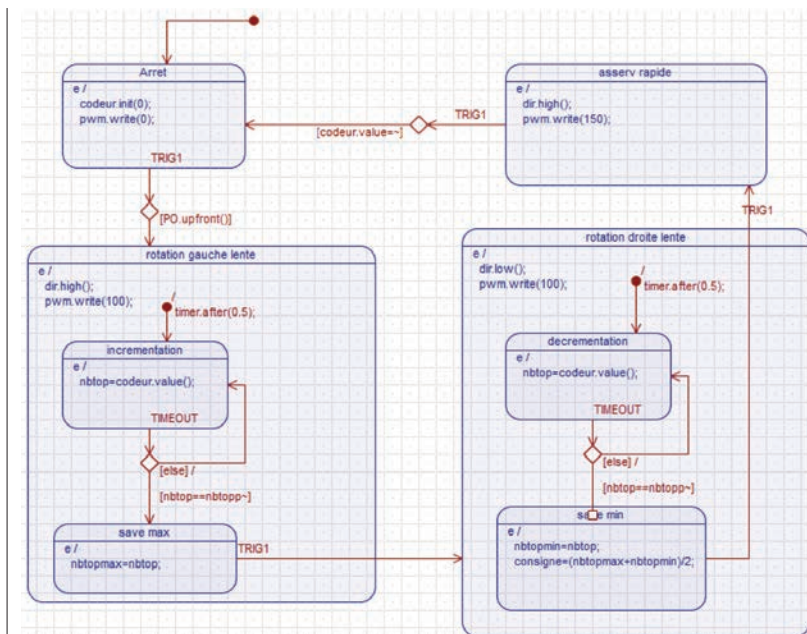
Les activités pédagogiques

Là encore, comme pour le simulateur, plusieurs groupes peuvent travailler sur le même système grâce au logiciel d'acquisition et de pilotage multiposte. Les activités développées pour le volant sont complémentaires de celles proposées pour le simulateur.

En travail de découverte du système, on peut comparer la structure du volant à retour de force à celle d'un volant à ressort de torsion pour le retour à zéro. Une modélisation multiphysique offre la possibilité de relier la structure du système à un modèle 18. Pour les niveaux postbac, il est proposé de compléter les valeurs des paramètres du modèle multiphysique.

Le comportement du volant dans différentes situations de conduite peut également être analysé en temps réel, et l'analyse des signaux met en évidence les asservissements en couple ou en position faits au cours du jeu.

Lors de son branchement, le volant se déplace automatiquement à vitesse réduite en butée droite



19 Le diagramme d'états/activités de la prise d'origine du volant

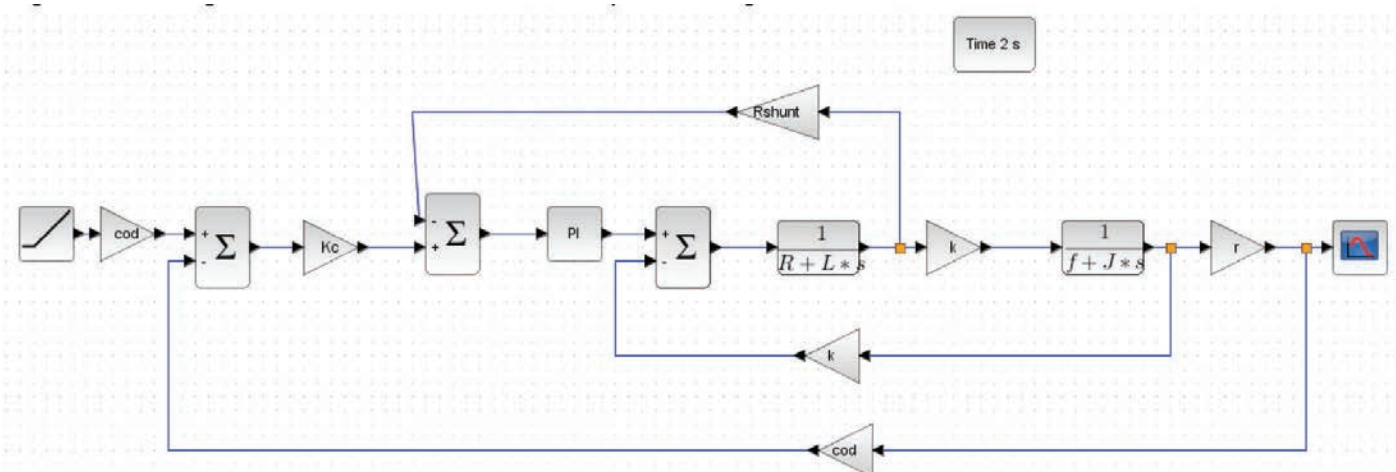
puis en butée gauche, et revient en position médiane de manière précise. Cette spécificité de comportement fait l'objet d'une étude au travers d'un diagramme d'états ou d'activités [19](#) qui va mener les élèves à de la programmation. Le retour à zéro montre l'asservissement de position réalisé sur le volant. Le logiciel permet d'appréhender les notions de boucle ouverte et boucle fermée. Le modèle d'asservissement de position est ensuite recréé à partir de modèles de connaissance et de modèles de comportement (identification temporelle en boucle ouverte). Le modèle simulé sous un logiciel tel que Scilab ou Matlab est ensuite comparé à l'asservissement implanté expérimentalement, et les écarts de performances mesurés [20](#). Cette activité est proposée à tout le groupe de TP afin de faire acquérir la démarche de modélisation des systèmes continus.

La simplicité mécanique du volant à retour de force permet d'appréhender la dynamique et d'observer l'influence de perturbations telles que la pesanteur ou les frottements secs. Cette activité est accessible à des niveaux prébac comme postbac, car le volant est en rotation autour d'un axe fixe, donc simple à modéliser. Grâce à la mesure de vitesse, on détermine le moment d'inertie de l'axe en rotation, que l'on compare avec l'inertie d'un moteur seul.

Comme pour le simulateur, le volant vibre lorsque l'on roule sur un bas-côté. Les activités d'identification fréquentielle et temporelle mises en place sur le simulateur peuvent tout à fait être reproduites à l'identique sur le volant seul.

En conclusion

Le simulateur de course et le volant à retour de force, nouveaux systèmes, innovants et modernes, proposés par DMS, permettent de faire acquérir la quasi-totalité des compétences et connaissances des programmes de ST12D, S-SI et CPGE. Livrés avec un dossier technique complet et actuel (diagrammes SysML, modèles multiphysiques, maquettes volumiques...), les TP proposés abordent des problématiques pertinentes qui mettent en avant la démarche de l'ingénieur basée sur le triptyque « souhaité, mesuré, simulé ». Quant au logiciel d'acquisition et de pilotage multiposte disponible pour ces deux systèmes, il apporte une nouvelle manière de faire des travaux pratiques en offrant la possibilité de faire travailler les élèves tous en même temps ou par équipes en îlots. ■



20 Modélisation par schéma-bloc, identification et validation de modèle