

# Apports des outils numériques sur l'enseignement de l'automatique : séance de travaux pratiques distanciels asynchrones

Culture Sciences  
de l'Ingénieur

Agathe DUPAS - Javier OJEDA

Édité le  
02/11/2020

école  
normale  
supérieure  
paris-saclay

*Cette ressource est issue d'une publication du numéro 102 de La Revue 3EI d'octobre 2020. Agathe Dupas est professeure agrégée SII au Lycée Polyvalent de Cachan et Javier Ojeda est Maître de Conférences au Département EEA (Électronique, Électricité et Automatique) de l'ENS Paris-Saclay.*

L'évolution des outils numériques aussi bien des logiciels que du matériel permet d'envisager l'enseignement de l'automatique de manière plus illustrative et participative. Illustrative, car des outils numériques, le plus souvent libres, sont disponibles pour les étudiants afin de mettre en image des notions parfois complexes de l'automatique et participative, car au travers d'ateliers réalisés par les étudiants, ceux-ci peuvent appréhender des notions principales ou annexes par leurs simulations et expérimentations. Par ailleurs, participative, par le fait que les outils numériques permettent des échanges enseignant-apprenant en ligne via un site web, des plateformes moodle, slack, etc.

C'est au travers d'une série de trois ressources que l'évolution des outils numériques sera abordée du point de vue théorique, logiciel, hardware et pratique. Après la première ressource « Apports des outils numériques sur l'enseignement de l'automatique : ateliers à partir d'un notebook Jupyter » [1], cette deuxième ressource aborde la notion d'enseignement pratique à distance en utilisant un notebook Jupyter.

## 1 – Introduction

Les sciences de l'ingénieur forment des étudiants pour et par l'expérimentation, la mise en place de manipulations et l'exploitation de celles-ci. Plusieurs savoir-faire fondamentaux sont nécessaires à cette formation :

- Le design expérimental, être capable de synthétiser une manipulation dans le but de mettre en exergue un phénomène physique, inventer une nouvelle fonction ou porter une amélioration technologique ;
- La mise en place technologique, être capable de choisir les bons outils et composants technologiques ;
- L'exploitation des résultats d'expérimentations et leurs mises en contexte.

C'est parfois l'aptitude à comprendre et à exploiter des résultats expérimentaux qui peut faire défaut aux apprenants. Nous allons donc pour cette ressource nous attacher à ce point.

De plus, l'enseignement à distance se développe à grande vitesse. Parfois de manière contrainte, parfois de manière souhaitée, il n'est souvent pas aisé de concilier expérimentations et distanciel. Plusieurs acteurs des sciences de l'ingénieur se sont penchés sur ces problèmes. Nous pouvons citer la plateforme STEEVE, Solutions pour Travaux Expérimentaux en Environnement Virtualisé, financée par l'université Paris-Saclay (ENS Paris-Saclay, Centrale Supélec, Université Paris-Saclay) [2] ou encore la plateforme LABENVI de l'Université de Limoges [3]. Dans cette ressource, nous allons aborder le thème des travaux pratiques à distance en utilisant un notebook Jupyter [4]. Les

avantages vont être d'utiliser le même outil pour les cours d'informatique scientifique, de simulation numérique et d'expérimentation. Les étudiants n'auront pas besoin d'outils supplémentaires et les problèmes de versions/compatibilités seront minimisés. Le langage Markdown inclus dans le notebook Jupyter va permettre de mettre en forme de manière simple et puissante.

Le support d'application de cet article sera le système didactisé d'un axe linéaire qui permet le positionnement de pièces, Control'X de DMS education [5]. Ce TP peut être proposé sur différents supports si ceux-ci permettent des mesures en boucle ouverte et fermée ainsi que le réglage d'un gain proportionnel.

Ce TP n'est qu'un guide pour l'utilisation du notebook Jupyter. Les activités proposées ne sont pas formulées sous forme de question ni de problématique. Cet exemple demande donc à être adapté en fonction des compétences précédemment abordées par les étudiants ainsi que de la progression annuelle.

## 2 – Présentation du support d'application et de son modèle

### 2.2 - Le système Control'X

Le système industriel dont le Control'X est extrait, est un robot portique 3 axes commercialisé par l'industriel Schneider. L'axe linéaire commercialisé par DMS est une version didactique de l'axe industriel. La partie mécanique est en tout point identique à celle présente dans le système industriel. Cette partie est composée du réducteur, des poulies et courroies, du chariot et enfin des guidages. La partie électrique, dans le système industriel, est composée d'un moteur brushless et de son variateur. Ceux-ci sont remplacés par un moteur à courant continu à balais avec un variateur pour la version didactique. Celui-ci est utilisé en amplificateur de tension de gain pur.

Concernant les capteurs, seul le codeur incrémental placé sur l'arbre moteur est présent dans le système industriel.

Dans le cadre de cette activité, nous nous intéresserons à plusieurs exigences de performances du système présentées à la Figure 1. L'objectif sera après une modélisation du système de vérifier les exigences 1.1.1, 1.3.1 et 1.4.1 pour plusieurs valeurs d'un correcteur proportionnel.

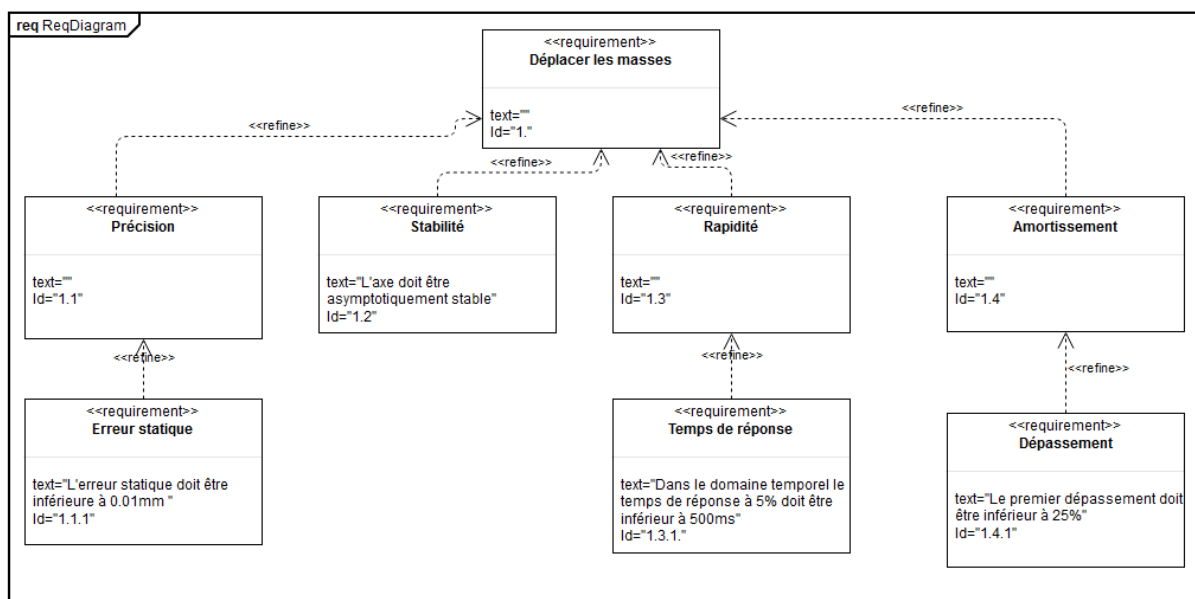


Figure 1 : Diagramme partiel des exigences

## 2.2 - Toolbox Control

Pour s'affranchir d'un logiciel de modélisation type Matlab/Simulink ou Scilab/Xcos, le schéma bloc du système sera simulé grâce à la toolbox Control [6]. Une première partie du TP consiste à prendre en main la toolbox en modélisant un premier ordre avec un retour unitaire.

```
# Système exemple
K_0 = 1.0           # Gain statique
TAU = 1e-3         # Constante de temps du 1er ordre en secondes

#####
# Fonction de transfert en BO de l'exemple
#
NUM = [K_0] # Numérateur de la fonction de transfert

# Dénominateur de la fonction de transfert par ordre décroissant en p ou s
DENUM = [TAU, 1]

SYS_BO_EXEMPLE = ctl.tf(NUM, DENUM) # Fonction de transfert en p

#####
# Bouclage avec rétro-action unitaire avec la fonction feedback
#
SYS_BF_EXEMPLE = ctl.feedback(SYS_BO_EXEMPLE)
```

La fonction `ctl.feedback` permet de réaliser la contre réaction unitaire. Il est également de réaliser une contre-réaction non unitaire en entrant la fonction de transfert dans la chaîne de retour dans la liste des arguments. Dans la suite du tutoriel de prise en main de la toolbox, il est demandé de tracer la réponse indicielle, impulsionnelle ainsi que des relevés de Bode, Black-Nichols...

## 2.3 - Modèle à partir d'un schéma bloc et simplifications

Le système est un axe linéaire asservi en position. Le schéma bloc de la Figure 2 représente la structure du système et de son asservissement.

Afin de se ramener aux notions vues en cours, il est nécessaire de modifier le schéma pour obtenir un schéma bloc à retour unitaire. La simplification ne sera pas exposée ici, mais peut être proposée en travail préliminaire aux étudiants lors de travaux dirigés par exemple. L'identification des blocs à partir de la documentation technique du système peut aussi composer une activité supplémentaire.

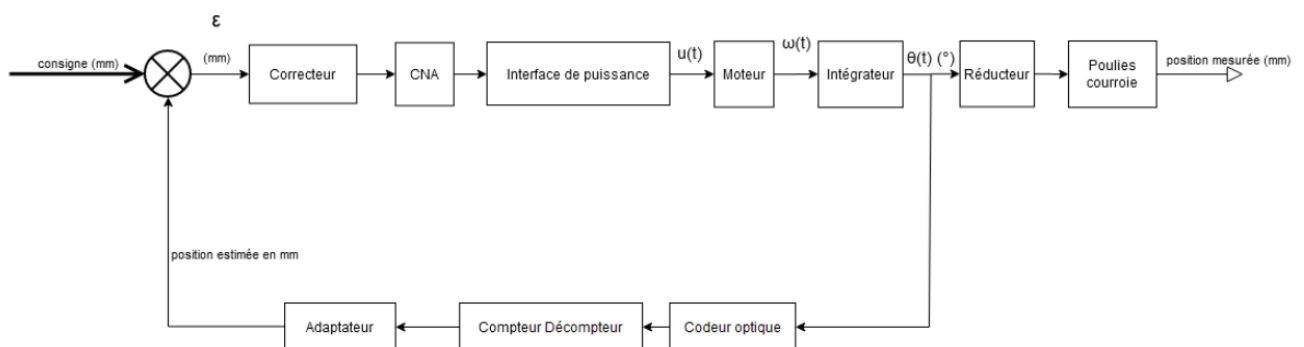


Figure 2 : Schéma bloc du système didactisé

## 2.4 - Mesures préliminaires

Afin de proposer une activité pratique à distance aux étudiants, il est nécessaire d'effectuer plusieurs mesures en amont. Les étudiants auront accès aux fichiers des mesures. Le post-traitement des mesures est entièrement fourni dans ce TP, mais peut faire l'objet de question ou de travaux pratiques en IPT (Informatique Pour Tous).

Tableau 1 : Exemples de contenus pouvant être abordés en IPT en lien avec le TP

Recherche du maximum dans une liste de nombres
Fichiers : notion de chemin d'accès, lecture et écriture de données numériques ou de type chaîne de caractères depuis ou vers un fichier.

Le système modélisé en boucle fermée a pour entrée la position souhaitée sur l'axe X et comme sortie la position mesurée. Il est évident qu'en pratique nous avons accès à une tension image de la position et non la position, mais pour des raisons de simplification, nous parlerons de la position et non de la tension image de la position. Le système possède un intégrateur pur dans la chaîne directe, il n'est ainsi pas réalisable d'identifier la boucle ouverte complète. Nous proposons d'identifier en boucle ouverte le système qui possède comme entrée la tension moteur et comme sortie la vitesse linéaire. Ce bloc est dénommé Moteur sur la Figure 2.

Les essais nécessaires pour caractériser le système sont :

- Essais en boucle ouverte : pour plusieurs tensions d'entrée du moteur, la mesure de la vitesse linéaire du chariot est effectuée ;
- Essais en boucle fermée : pour différentes valeurs de consigne de position et de correcteur, la mesure de la position du chariot et de la tension d'alimentation de la MCC sont réalisées.

La liste des valeurs de tension d'entrée, consignes de position et valeurs du correcteur proportionnel utilisées dans l'atelier est résumée en annexe.

## 3 – Positionnement de l'étudiant et du professeur durant le TP

Ce TP est conçu pour être proposé aux étudiants à distance (ou non) et en temps réel ou de façon autonome. L'utilisation d'un seul outil libre et facilement disponible par les étudiants permet de s'affranchir des difficultés d'obtention de licences, d'installation de packages et l'incompatibilité entre plusieurs versions d'un même logiciel.

Les différentes activités sont ici entièrement réalisées, mais pourront être adaptées en fonction du degré d'autonomie des étudiants. Malgré des activités préfaites, l'étudiant ne sera pas dans une attitude uniquement d'observateur et pourra être amené à modifier le code ou entrer ses propres valeurs déterminées par le biais de widgets inclus dans le notebook Jupyter comme à partir de la fonction `click.prompt`.

Dans le cas d'un TP à distance proposé en temps réel, le professeur pourra alors interagir avec les étudiants en les questionnant notamment sur les conclusions pour chaque partie. Dans la possibilité d'un TP asynchrone, les questionnements devront sans doute être plus détaillés pour s'assurer un maximum de réflexion de l'étudiant.

## 4 – Activités proposées

### 4.1 - Démarche du TP

Le TP présenté dans cette ressource a pour objectif de déterminer un modèle de comportement du système à partir d'essais en boucle ouverte puis dans un deuxième temps de mettre en évidence l'impact de la valeur du gain proportionnel sur les performances de rapidité, précision et amortissement.

Les différentes parties vont être détaillées dans la suite ainsi que les compétences et savoir-faire associés.

### 4.2 - Première partie : modélisation du système

Un exemple des savoir-faire et compétences abordés lors de cette partie est présenté sur le Tableau 2

Tableau 2 : Exemple de connaissance et savoir-faire abordés dans la partie modélisation en boucle ouverte

Modèles de comportement	Renseigner les paramètres caractéristiques d'un modèle de comportement
Mettre en œuvre un protocole expérimental	
Identification temporelle d'un modèle de comportement	Identifier les paramètres caractéristiques d'un modèle du premier ordre ou du deuxième ordre à partir de sa réponse indicielle
Modèles de comportement	Extraire les grandeurs désirées et les traiter

Le schéma bloc présenté en Figure 2 est modifié afin d'obtenir un retour unitaire et nous souhaitons identifier sa fonction de transfert en boucle ouverte. Le modèle utilisé pour l'identification est présenté en Figure 3.

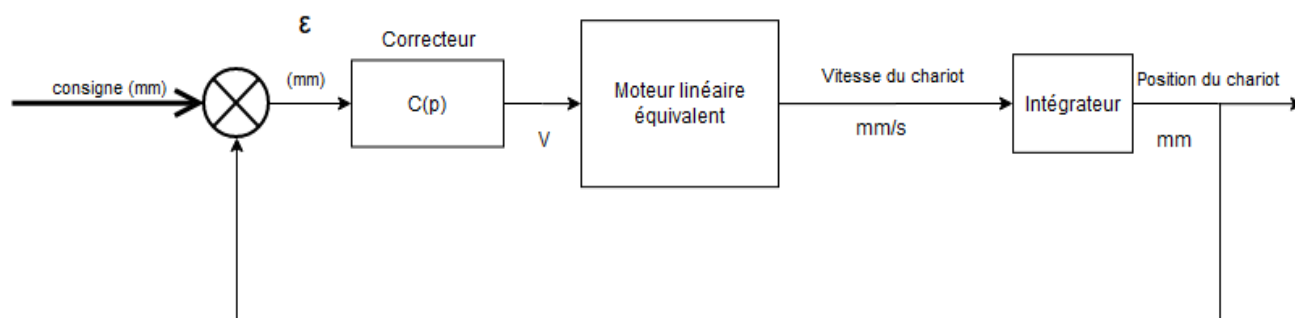


Figure 3 : Schéma bloc à retour unitaire utilisé pour la modélisation en boucle ouverte.

À partir de la mesure en boucle ouverte fournie, une identification de la fonction de transfert par itérations est effectuée. Les étudiants possèdent deux curseurs correspondants au gain statique et à la constante de temps d'un premier ordre. De plus, il est une valeur chiffrée de l'erreur par le biais de l'erreur quadratique entre la mesure et le modèle. Par itérations, les étudiants règlent les deux paramètres en se basant sur la minimisation de l'erreur. La réponse indicielle obtenue à partir du modèle est ensuite comparée à l'expérimental sur la Figure 4.

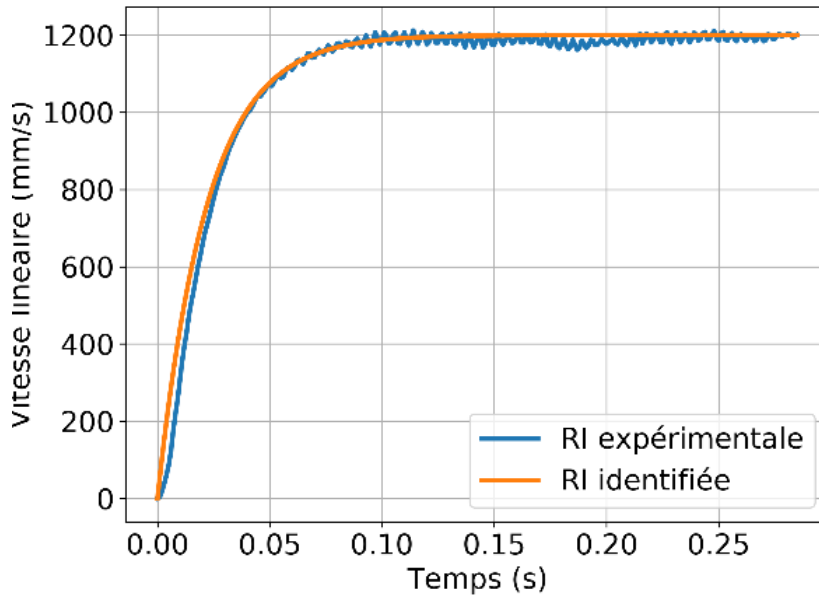


Figure 4 : Comparaison des réponses indicielles modélisée et mesurée

La dérivée à l'origine du système mesurée est nulle ce qui laisse penser à un système du second ordre. Cependant, c'est la non-linéarité du système et notamment la zone morte qui crée cette tangente nulle à l'origine. Un retour sur les non-linéarités du système sera effectué à la fin de l'article. Le modèle étant validé en boucle ouverte, une validation en boucle fermée est effectuée.

### 4.3 - Deuxième partie : validation du modèle en boucle fermée

Un exemple des savoir-faire et compétences abordés lors de cette partie, est présenté sur le Tableau 3.

Tableau 3 : Exemple de connaissance et savoir-faire abordés dans la partie vérification du modèle en BF

Point de fonctionnement Non-linéarités (hystérésis, saturation, seuil)	Vérifier la cohérence du modèle choisi avec les résultats d'expérimentation
--	---

Deux réponses à un échelon de position en boucle fermée sont utilisées pour comparer le modèle et le système réel en boucle fermée. Afin de donner plus de sens à cette validation un contexte peut être présenté et un point de fonctionnement proposé. La validation sera alors faite autour du point de fonctionnement, les mesures fournies seront alors adaptées à ce point de fonctionnement.

La définition de la fonction modélisée en boucle fermée utilisant la fonction feedback est présentée ci-dessous.

```
#####
# Fonction de transfert identifiée
#
NUM = [K_M] # Numérateur de la fonction de transfert
# Dénominateur de la fonction de transfert par ordre décroissant en p ou s
DENUM = [TAU_M, 1]
SYS_IDEN = ctf(NUM, DENUM) # Fonction de transfert en p
#####
# Résultat de la simulation avec un correcteur K_P = 1
#
```

```

K_P = 1 # Gain du proportionnel du correcteur

INTEG = ctl.tf(1, [1, 0]) # Intégrateur pur pour le passage vitesse -> position

SYS_BF_K = ctl.feedback(K_P*SYS_IDEN*INTEG)

```

#### 4.4 - Troisième partie : Influence du correcteur proportionnel sur les performances

Un exemple des savoir-faire et compétences abordés lors de cette partie est présenté sur le Tableau 4.

Tableau 4 : Exemple de connaissance et savoir-faire abordés

Rapidité des SLCI : temps de réponse à 5 %	
Précision des SLCI : - erreur en régime permanent	Déterminer l'erreur en régime permanent vis-à-vis d'une entrée en échelon ou en rampe
Point de fonctionnement Non-linéarités (hystérésis, saturation, seuil)	Vérifier la cohérence du modèle choisi avec les résultats d'expérimentation

Lorsque le modèle est validé en boucle fermée, il peut être utilisé pour mettre en évidence l'influence de la valeur du correcteur proportionnel sur les performances du système. En utilisant la fonction interactive, on peut proposer aux étudiants de faire varier le correcteur grâce à un slide comme présenté en Figure 5.

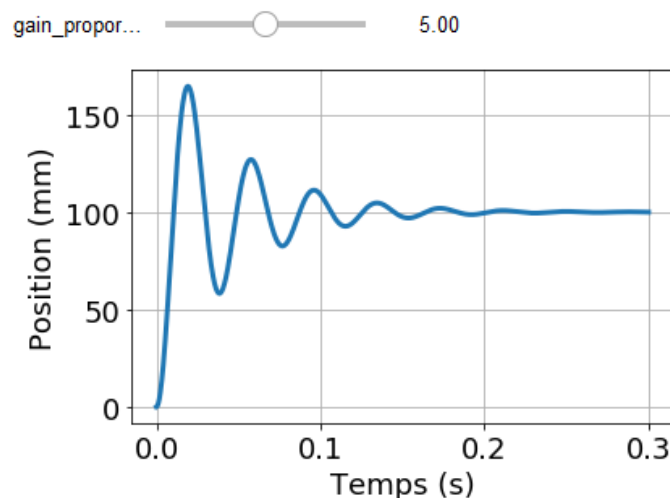


Figure 5 : Utilisation de la fonction interactive (widget) pour faire varier la valeur du correcteur

Une première approche est de susciter un questionnement de l'étudiant sur l'allure globale de la sortie du système et sur les performances (dépassement ou non, erreur statique nulle ou non, rapidité) en fonction de la valeur du gain proportionnel.

Dans un second temps, les performances en rapidité, précision et amortissement sont évaluées par les étudiants. Pour faciliter la détermination du temps de réponse à 5%, des droites à  $\pm 5\%$  de la valeur finale sont tracées comme représentées à la Figure 6. Pour la détermination du dépassement, l'amplitude maximale peut être calculée ou déterminée de façon graphique. Les performances pourront être déterminées pour le point de fonctionnement et pour différentes valeurs du correcteur proportionnel.

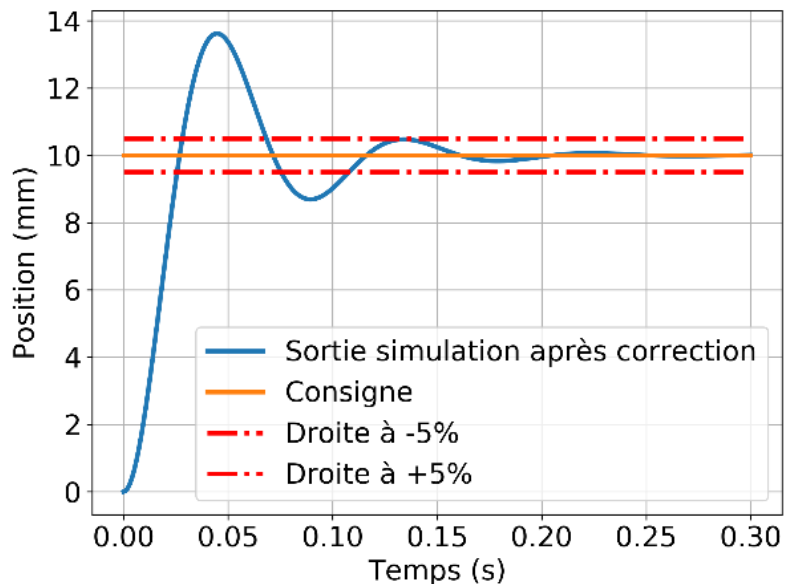


Figure 6 : Mise en évidence du temps de réponse à 5%

## 5 – Possibilité d'évolution vers les non-linéarités des systèmes

Une première proposition d'évolution est évoquée dans l'atelier et concerne l'impact de la saturation de l'alimentation du moteur sur la réponse en boucle fermée. En effet l'alimentation du moteur sature à 40V et de nombreuses combinaisons de valeur de consigne et de correcteur entraînent cette saturation comme présentée à la Figure 7. Un travail peut alors être proposé pour identifier la saturation ainsi que son impact sur la rapidité du système.

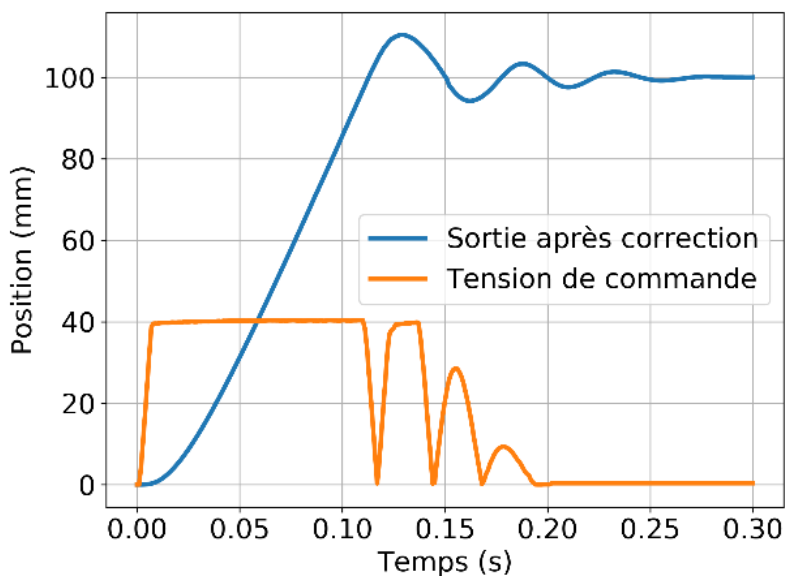


Figure 7 : Visualisation de la tension de commande du moteur saturée

L'autre partie non linéaire concerne la zone morte en tension du moteur. En effet, un moteur « petit couple » associé à un réducteur de valeurs importantes entraîne l'apparition d'une zone morte en tension de commande. Le « petit couple » généré par le moteur à de faibles valeurs de tension n'est pas suffisant pour mettre en mouvement le système. Cet effet est particulièrement visible pour des petites valeurs de correction proportionnelle et entraîne une erreur statique non nulle avec pourtant un intégrateur dans la chaîne directe.



## 6 – Conclusion

Dans cette ressource, nous avons présenté différentes activités qui montrent les possibilités offertes par l'utilisation de Jupyter notebook et de la toolbox control de Python. Les séances de travaux pratiques à distance sont moins conçues pour apprendre des compétences d'expérimentation sur un système, mais plutôt pour faire réfléchir les étudiants sur des expériences et leur permettre d'interpréter des résultats issus d'un système physique.

Cet atelier peut être vu comme une première approche de l'outil et possède des possibilités d'évolution en fonction de l'autonomie des élèves ainsi que des compétences et connaissances acquises en amont.

Peu de fonctions ou de syntaxes propres au langage Python sont nécessaires, cependant, ces séances de travaux pratiques peuvent être couplées aux séances d'Informatique Pour Tous.

## 7 – Annexes

Liste des mesures à effectuer en amont pour la préparation de l'atelier.

Boucle ouverte						
Tension de commande	10V					
Boucle fermée						
Consigne de position	10mm	20mm	100mm			
Valeur du correcteur proportionnel	1	2	1	0.5	3	10

L'atelier est téléchargeable depuis l'onglet fichier et lien de cette ressource [7]. Les lignes permettant la visualisation de courbes ont été commentées pour un format d'export en document pdf plus concis.

## Références

- [1]: J. Ojeda, "Apports des outils numériques sur l'enseignement de l'automatique : Ateliers à partir d'un notebook Jupyter", juillet 2020, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/apports-des-outils-numeriques-sur-lenseignement-de-lautomatique](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/apports-des-outils-numeriques-sur-lenseignement-de-lautomatique)
- [2]: F. Louf, "Réalisez vos tp à distance", avril 2020, <https://ens-paris-saclay.fr/actualite/realisez-vos-tp-distance>
- [3]: P. Leproux, D. Barataud, S. Bailly, and R. Nieto, "LABENVI, un dispositif pour les travaux pratiques à distance. Présentation et analyse des nouveaux usages," Interfaces numériques, vol. 2, no. 3, pp. 453-467, Mar. 2013, doi: 10.3166/rin.2.453-467
- [4]: "Jupyter notebook." <https://jupyter.org/>
- [5]: D. Education, "Control'X." [http://www.dmseducation.eu/controlx-xml-350\\_357-1126.html](http://www.dmseducation.eu/controlx-xml-350_357-1126.html)
- [6]: "Python Control Systems Library." <https://python-control.readthedocs.io/en/0.8.3/>
- [7]: A. Dupas, J. Ojeda, " Apports des outils numériques sur l'enseignement de l'automatique : séance de travaux pratiques distanciels asynchrones ", octobre 2020, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/apports-des-outils-numeriques-sur-lenseignement-de-lautomatique-travaux-pratiques-distanciels-asynchrones](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/apports-des-outils-numeriques-sur-lenseignement-de-lautomatique-travaux-pratiques-distanciels-asynchrones)

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>