

Le Segway

Une stabilisation dynamique

1 Introduction

Le Segway¹ est un moyen de transport personnel, construit autour du principe du pendule inversé : une fois le passager sur le Segway, le centre de gravité du système est situé très au-dessus de l'axe de rotation des roues. C'est ainsi un système instable en tant que tel, qui doit être stabilisé dynamiquement et numériquement afin de remplir son rôle de véhicule. L'an dernier, j'ai suivi une visite guidée de la ville de Dijon en Segway et j'ai été impressionné par sa grande stabilité, en particulier lors des phases où il reste stationnaire. J'ai ainsi tenté dans le cadre de l'épreuve de TIPE de reproduire ce comportement si particulier. J'ai construit, à l'aide d'un kit LEGO NXT², un robot à l'allure semblable et stabilisé dynamiquement par un asservissement numérique, utilisant le système de contrôle en temps réel nxtOSEK³. La stabilisation visée est ainsi double : en angle (il faut maintenir le robot à la verticale, proche de la position d'équilibre instable) et en position, puisqu'on s'intéresse à la phase stationnaire.

2 Une première approche purement empirique

2.1 Principe

L'approche expérimentale la plus simple est d'utiliser des télémètres comme source d'informations sur l'état du robot. Ces télémètres estiment en effet la distance au sol en émettant une radiation dans le domaine de l'infrarouge ou du visible puis en effectuant une mesure de déphasage ou d'intensité sur l'onde réfléchiée par le sol. En plaçant un télémètre de chaque côté du robot (un à l'avant et un à l'arrière), comme montré sur la figure 1, il suffit d'ajuster la puissance fournie au moteur pour maintenir égales les distances mesurées par les deux capteurs, signe que le robot est en position "debout".

2.2 Résultats expérimentaux

Cette approche simple donne malheureusement des résultats assez décevants. Les conditions dans lesquelles ce robot peut être utilisé sont en effet très strictes : le sol doit réfléchir suffisamment les ondes émises par les télémètres, et il doit le faire uniformément pour pouvoir mettre à profit l'utilisation des deux télémètres ; l'éclairage doit être lui aussi homogène (les deux télémètres doivent être soumis à un éclairage équivalent)... Par ailleurs, la résolution du télémètre est assez faible, de l'ordre de 4 ou 5 millimètres, ce qui ne permet pas d'évaluer précisément l'état du robot. Enfin, cette technique ne permet pas de doter le robot d'une "réponse" aux perturbations et de le maintenir à une position donnée au sol. Expérimentalement, on obtient une stabilisation efficace, si tant est que l'on soit dans les conditions adéquates. Cette approche présente par ailleurs un autre défaut important : elle ne se base sur rien de scientifique, ne prenant pas en compte les spécificités du système.

3 Un peu de théorie

3.1 Modélisation

Le système, représenté sur les figures 2 et 3, se modélise assez simplement par un châssis en forme de parallélogramme muni de deux roues placées au bas du châssis. La masse du châssis étant bien plus importante (principalement à cause des piles) que celle des roues, le centre de gravité du système se

¹<http://www.segway.fr/>

²<http://mindstorms.lego.com/>

³<http://lejos-osek.sourceforge.net/>

trouve bien au-dessus de l'axe des roues. Les deux degrés de liberté effectifs du système sont d'une part l'angle entre le châssis et la verticale, noté θ , d'autre part la position du robot (on se limite à un problème 1-D), notée x .

3.2 Étude mécanique

L'étude mécanique, faisant intervenir les paramètres listés dans le tableau suivant, s'effectue simplement en utilisant les outils de mécanique du solide au programme de deuxième année (théorèmes du moment et de la résultante cinétique, roulement sans glissement, etc). Les valeurs référencées dans le tableau sont celles mesurées ou évaluées sur le robot étudié.

Paramètre	Définition	Valeur
m	Masse d'une roue (kg)	0,030
M	Masse du châssis (kg)	0,610
R	Rayon d'une roue (m)	0,0408
J	Moment d'inertie d'une roue par rapport à son axe (kg.m ²)	$mR^2/2 = 2,49.10^{-5}$
a	Épaisseur du châssis (m)	0,04
b	Largeur du châssis (m)	0,08
h	Hauteur du châssis (m)	0,114
K	Moment d'inertie du châssis par rapport à l'axe des roues (kg.m ²)	$M(a^2 + b^2)/12 = 4,1.10^{-4}$
g	Accélération de pesanteur (N/kg)	9,81

On aboutit finalement au système d'équations différentielles suivant, avec Γ le couple moteur :

$$\left(M + 2m + \frac{2J}{h^2}\right) \ddot{x} + M h (\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2) = \frac{2\Gamma}{R} \quad (1)$$

$$(K + Mh^2) \ddot{\theta} + M h \ddot{x} \cos \theta - Mgh \sin \theta = -2\Gamma \quad (2)$$

3.3 Stabilisation

Ces équations permettent ensuite de déterminer les composantes d'un asservissement efficace pour stabiliser le robot aussi bien par rapport à la verticale (contrôle sur θ) que par rapport à sa position (contrôle sur x). Les simulations, telles que celles des figures 4 et 5, mettent alors en évidence que le contrôle le plus efficace est obtenu en sommant des fonctions affines de θ , x et des vitesses angulaires et linéaires, c'est-à-dire de la forme :

$$\Gamma = \text{sgn}(\theta)K + k_\theta \dot{\theta} + k_x x + k_{\dot{x}} \dot{x} \quad (3)$$

Ces simulations, réalisées avec Maple et les paramètres physiques du robot, ont de plus permis de déterminer des coefficients appropriés pour le contrôle du robot.

4 Une nouvelle approche plus scientifique

4.1 Principe

Une solution plus satisfaisante scientifiquement, et utilisée en pratique pour le Segway⁴, consiste à déterminer précisément l'état du robot à l'aide d'un gyroscope piézoélectrique. Un gyroscope permet en effet de déterminer à chaque instant la vitesse angulaire du robot autour d'un axe donné, permettant ensuite de calculer par intégration l'angle entre le corps du robot et la verticale. L'asservissement est ensuite théoriquement simple à réaliser, puisqu'on dispose de l'intégralité des paramètres cinématiques du système (position et vitesse linéaire d'une part, obtenues grâce aux capteurs de rotation des moteurs, angle avec la verticale et vitesse angulaire d'autre part).

⁴<http://www.siliconsensing.com/segway>

4.2 Principe de fonctionnement des gyroscopes

Les gyroscopes utilisés se basent sur des phénomènes mécaniques mais aussi électroniques : au sein du capteur, un mobile est mis en rotation autour de son axe, puis la variation de la force d'inertie de Coriolis liée au mouvement du capteur dans le référentiel terrestre est mesurée grâce à des effets capacitifs (le mobile est placé dans une configuration telle qu'il forme un condensateur à surface variable, dont la variation de capacité peut ensuite être mesurée électroniquement).

4.3 Limites des gyroscopes

Les premiers essais du robot, utilisant un seul gyroscope, ont cependant révélé que le comportement de tels gyroscopes était loin d'être précis. J'ai ainsi consacré une première partie du temps de développement de l'asservissement à l'étude du comportement de ces capteurs. J'ai ainsi mis en place une série de tests sur les deux gyroscopes dont je disposais afin d'évaluer les différents paramètres entrant en jeu, aboutissant ensuite à diverses courbes, comme la figure 8. Ces courbes ont été générées dans un premier temps par des scripts de traitement écrits en Python avec la librairie graphique Matplotlib, puis par une application Python/GTK séparée que j'ai développée afin de réduire le temps de post-traitement des données, centralisant leur réception par Bluetooth et la génération à la volée des graphiques.

L'étude a montré que la réponse des gyroscopes dépendait non seulement de la vitesse angulaire effective du système selon l'axe considéré, mais aussi des vibrations du châssis, de la tension fournie par le bloc de contrôle et de nombreux paramètres environnementaux tels que la température ou la pression atmosphériques.

Ces diverses conjectures m'ont par la suite été confirmées par le fabricant⁵ des gyroscopes et par des amateurs de modélisme.

Le nombre et la diversité des paramètres entrant en jeu font ainsi qu'il n'a pas été possible de déterminer une méthode pour corriger avec exactitude les données fournies par le gyroscope. On ne peut donc pas se baser uniquement sur les données d'un seul gyroscope pour évaluer précisément l'état du système, et il a ainsi fallu développer un asservissement numérique évolué.

4.4 Développement de l'asservissement

4.4.1 Recherche du système d'opération

Une composante importante du travail de développement a été de trouver un système de contrôle adapté et suffisamment efficace. J'ai ainsi testé les systèmes NXC (qui ne gèrent pas proprement les nombres flottants, donc inutilisable pour un vrai asservissement), LEJOS (basé sur une machine virtuelle Java spécifique au NXT ne fournissant pas une gestion des tâches suffisamment évoluée et précise) et RobotC (aux performances non optimales, mais qui a permis d'aboutir rapidement à un asservissement honnête). Ce dernier système fonctionnait plutôt bien mais il souffrait de problèmes de gestion des événements matériels, le robot échappant par conséquent à tout contrôle, par exemple dès que l'on tentait de transmettre les données par Bluetooth ou USB pour analyser les essais. Depuis sa sortie en Février, j'ai utilisé le système LEJOS OSEK dans sa version C (une version C++ est également disponible, mais je n'avais pas besoin d'un langage spécifiquement orienté objet pour accomplir de telles tâches de bas niveau), rebaptisé depuis nxtOSEK, qui intègre le système de contrôle en temps réel TOPPERS, proposant une quasi exactitude dans la gestion temporelle des différentes tâches et adapté à un usage scientifique. Un impératif pour tout asservissement est en effet de pouvoir faire confiance au système d'opération pour tous les problèmes d'intervalles de temps et de réactivité, les erreurs de calcul pouvant être fatales à la stabilisation, et le robot devant réagir très rapidement, une chute prenant moins d'une seconde.

4.4.2 Développement de l'asservissement

Avant toute tentative de correction des erreurs des gyroscopes, j'ai développé un asservissement simple utilisant un seul gyroscope. Le programme en lui-même se divise en 3 tâches principales :

- La première, exécutée toutes les 100ms, gère d'une part la phase d'initialisation permettant le bon démarrage des gyroscopes, et sera le support de certaines corrections (en particulier sur l'état de la batterie et l'offset, comme décrit dans la partie suivante).

⁵<http://hitechnic.com>

- La seconde, exécutée toutes les 4ms, s’occupe du contrôle du robot en lui-même en ajustant dynamiquement le couple moteur, calculant en outre la position x par lecture des données fournies par les capteurs de rotation des moteurs, ainsi que la vitesse linéaire par dérivation discrète de la position. Cette procédure comprend également une mesure de protection détectant de manière empirique si le robot a chuté (en testant si le couple moteur est maximal depuis un nombre donné d’appels de la procédure).
- La dernière, exécutée toutes les 3ms, effectue le calcul de l’angle par intégration par la méthode des trapèzes de la vitesse angulaire fournie par le gyroscope.

Cet asservissement simple, sans correction supplémentaire, permet d’aboutir à des essais montrant une stabilité sur des durées de l’ordre de la trentaine de secondes.

4.4.3 Mise en place des corrections

Il a ensuite fallu développer un ensemble de méthodes de correction.

Disposant de deux gyroscopes, j’ai remarqué, à l’aide de l’étude des caractéristiques des gyroscopes, qu’ils se comportaient globalement de la même manière face aux variations des divers paramètres. Après plusieurs tentatives avec un seul gyroscope, j’ai donc placé les deux gyroscopes en regard, comme montré sur la figure 7 de sorte que la différence des deux signaux soit globalement beaucoup moins bruitée qu’un signal seul, comme le montre cette rapide constatation calculatoire, sachant que dans cette position les deux gyroscopes mesurent des vitesses angulaires de signes opposés :

$$\left. \begin{array}{l} \text{gyro}_i(t) = \text{défaut}_i(t) + \text{signal}_i(t) \\ \text{défaut}_1(t) \simeq \text{défaut}_2(t) \\ \text{signal}_1(t) \simeq -\text{signal}_2(t) \end{array} \right\} \text{gyro}_2(t) - \text{gyro}_1(t) \simeq 2\text{signal}_2(t)$$

Toutefois, même si les résultats expérimentaux étaient déjà bien plus satisfaisants qu’avec un seul gyroscope (environ une minute et demie de stabilité), une dérive apparaissait toujours sur le long terme. J’ai alors pris contact avec Yorihsa Yamamoto, ingénieur travaillant pour une filiale japonaise de la société éditrice de Matlab et qui avait travaillé sur un système similaire, mais n’utilisant qu’un seul gyroscope, dans le cadre de son travail (il était chargé de développer une interface de simulation et de génération de code pour le NXT intégrée à Simulink, Embedded Coder Robot NXT⁶). Sur ses conseils, j’ai mis en place plusieurs autres techniques de correction.

J’ai tout d’abord ajouté un filtrage simple des données fournies par les gyroscopes afin d’éliminer une partie du bruit (filtrage des vitesses angulaires entre -1 et +1 °/s).

J’ai ensuite mis en place un calcul dynamique de l’offset “à l’équilibre” entre les signaux numériques bruts renvoyés par les deux gyroscopes (par exemple si le premier gyroscope renvoie une valeur de 604 à l’équilibre et le second 612, l’offset est de 8 ; ces valeurs correspondant à la vitesse angulaire effective plus la valeur quand cette vitesse est nulle : pour le premier gyroscope, une valeur de 610 signifierait une vitesse angulaire de $610 - 604 = 6$ °/s). Ce calcul, effectué par lissage sur le long terme d’échantillons de la différence brute entre les deux gyroscopes (lissage de la forme $\Delta = (1 - k_\Delta)\Delta + k_\Delta\delta$, avec $\delta = \text{gyro}_1 - \text{gyro}_2$ et $k_\Delta \ll 1$), permet de s’adapter avec encore plus de précision aux variations des conditions expérimentales.

Il a également fallu compenser le fait que la réponse des moteurs était dépendante de l’état de la batterie. En utilisant les courbes établies par Philippe Hurbain⁷, une simple compensation affine a ainsi permis de fournir aux moteurs une puissance comparable quel que soit l’état des piles.

D’autres techniques ont également été testées, par exemple soustraire périodiquement de θ sa moyenne sur une période, partant de l’hypothèse que le robot étant stabilisé il oscille très peu autour de $\theta = 0$. Ces techniques n’ont cependant pas permis une amélioration notable de la stabilisation et ont été écartées.

4.5 Résultats expérimentaux

L’asservissement ainsi caractérisé s’est révélé en pratique très satisfaisant, permettant de stabiliser parfaitement le robot pendant plus de 4 minutes avant qu’il ne parte subitement dans un sens ou dans l’autre, signe d’une trop grande dérive dans le calcul de l’angle et preuve des limites de cet asservissement, qui n’arrive pas à corriger suffisamment sur le long terme les erreurs des gyroscopes. Les figures 9 et 10 montrent le comportement du robot sur un essai de 4 minutes, la dérive se manifestant au bout de

⁶http://lejos-osek.sourceforge.net/ecrobot_nxt.htm

⁷<http://www.philohome.com/nxtmotor/nxtmotor.htm>

3 min 20s par un déplacement rapide et soudain vers l'arrière, traduisant le fait que le robot cherche à compenser un angle incorrect.

4.6 Possibilités d'améliorations

Plusieurs améliorations auraient été possibles, que ce soit au niveau informatique ou au niveau des composants utilisés, mais n'ont pu être mises en œuvre par manque de temps.

Une première idée aurait été d'utiliser des gyroscopes iMEMS, distribués par la société Analog Devices⁸. Ces gyroscopes sont en effet beaucoup plus précis que les gyroscopes utilisés ici car ils fournissent des données supplémentaires (température, tension de référence) permettant de corriger avec précision la vitesse angulaire fournie. Il était cependant très difficile de mettre en place une telle solution, particulièrement onéreuse et risquée, la soudure pouvant détruire le capteur et la réalisation de l'interface électronique avec le système LEGO me paraissant délicate.

On aurait également pu tenter d'utiliser une alimentation séparée et régulée pour les gyroscopes afin d'éliminer ce paramètre.

Une autre idée aurait été de coupler cette approche avec l'utilisation de télémètres pour réajuster le robot sur le long terme, solution qui n'avait cependant pas permis à des élèves de Centrale Lyon d'améliorer les performances du robot du même type qu'ils avaient réalisé dans le cadre de leur projet de fin d'étude⁹.

Au niveau de l'asservissement en lui-même, il aurait été possible de rechercher des améliorations en utilisant un correcteur proportionnel intégrateur dérivateur (et pas juste proportionnel dérivateur) qui aurait permis une correction à plus long terme de l'erreur (en particulier pour le correcteur sur θ). La recherche des coefficients à l'aide de Maple n'a cependant pas permis de trouver un jeu de coefficients plus efficace que sans cette correction supplémentaire.

Enfin, si le temps n'avait pas manqué, une recherche plus efficace des coefficients à l'aide d'une méthode d'apprentissage par expérience aurait probablement permis d'améliorer la durée de stabilité du robot.

5 Conclusion

La combinaison d'outils de simulation numérique tels que Maple et des techniques d'asservissement permet donc de stabiliser de manière plus ou moins satisfaisante un tel système. Quoi qu'il en soit, l'étude de ce système m'a permis de découvrir, en tant qu'élève de l'option informatique, le domaine de l'asservissement, situé au carrefour de l'informatique, de la physique et des sciences de l'ingénieur.

⁸<http://www.analog.com/en/cat/0,2878,764,00.html>

⁹http://www.toutsurlesegway.com/article.php3?id_article=255

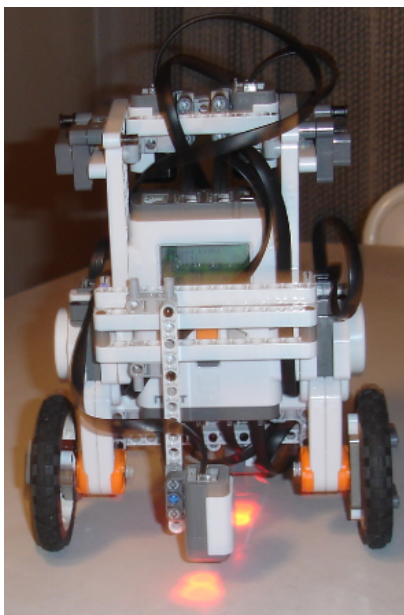


FIG. 1 – Photographie du robot utilisant des télémètres

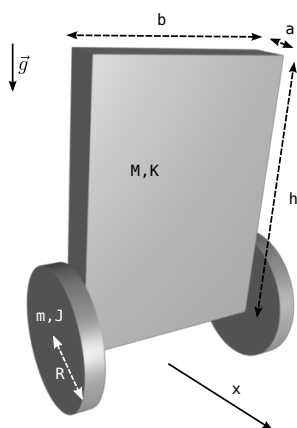


FIG. 2 – Représentation 3-D du système

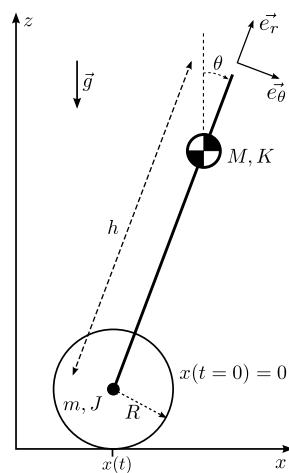


FIG. 3 – Schéma mécanique 2-D du système

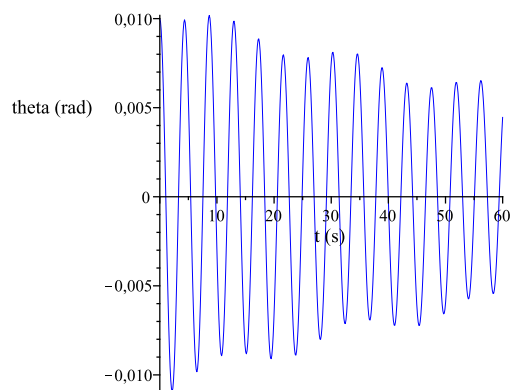


FIG. 4 – Simulation de l'évolution de l'angle θ

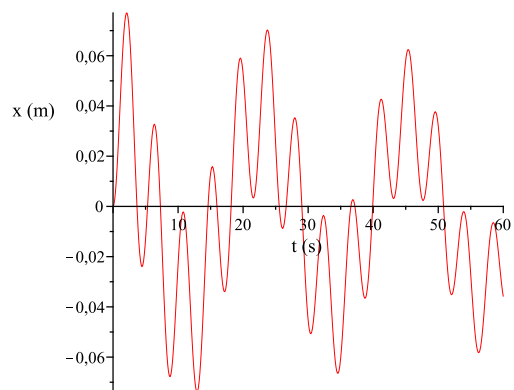


FIG. 5 – Simulation de l'évolution de la position x

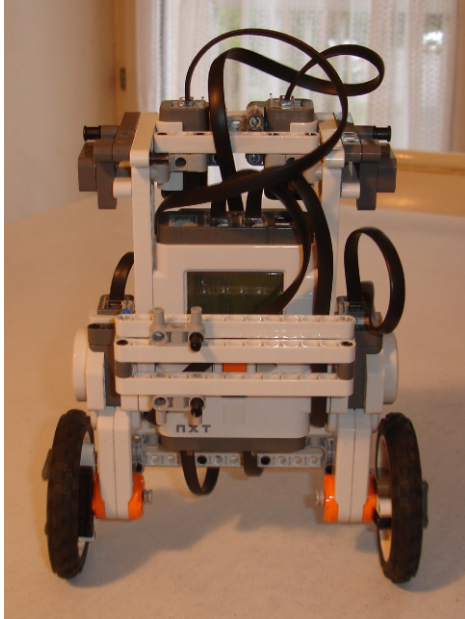


FIG. 6 – Photographie du robot avec les gyroscopes

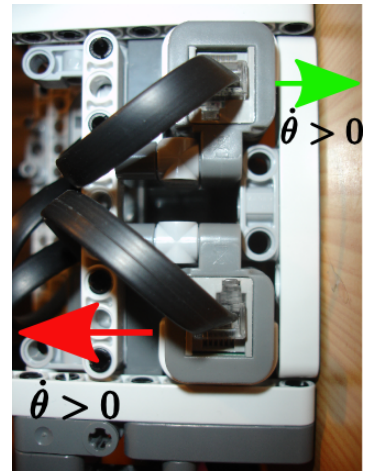


FIG. 7 – Photographie détaillée des gyroscopes

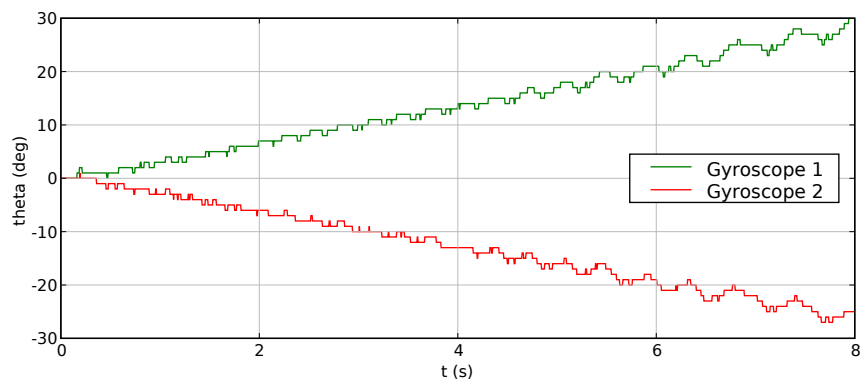


FIG. 8 – Comparaison de la dérive des deux gyroscopes

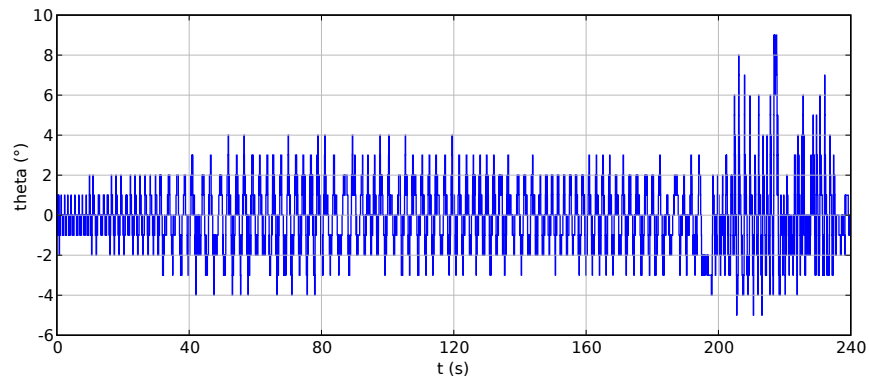


FIG. 9 – Évolution de l'angle θ sur un essai de 4 minutes

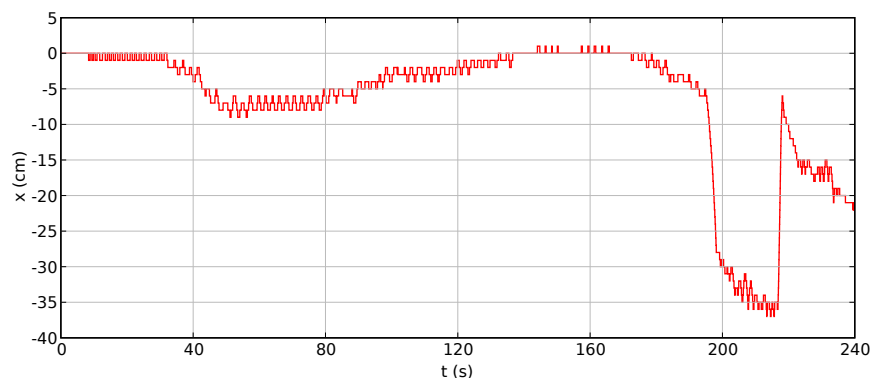


FIG. 10 – Évolution de la position x sur un essai de 4 minutes