

TP d'initiation à Scilab – Étude du Scoot'Elec

Secteur d'activité du système étudié : Déplacement urbain

Thème : Analyse de la structure, des performances et modélisation des SLCI

Problème technique : Justifier le choix de la motorisation électrique pour atteindre les performances indiquées dans le cahier des charges.

Objectif : Le but de ce TP est de progresser dans l'utilisation du logiciel Scilab et de son extension Xcos pour la simulation des systèmes à temps continu. La démarche adoptée est suffisamment progressive afin que tous les points soient clairement acquis pour les prochaines séances de TP.

Le travail est à faire en **autonomie** car cette démarche d'utilisation d'un logiciel de simulation par blocs (ici **Scilab** mais il en existe beaucoup d'autres du même type) fait partie intégrante de la formation scientifique d'un futur ingénieur.

1 Mise en situation

1.1 Problème technique

Le Scoot-élec de Peugeot (en vente entre 2010 et 2016, mais retiré du marché suite à l'arrivée sur le marché de versions bien moins onéreuses, et moins qualitatives bien évidemment, fabriquées en Chine) a approximativement les mêmes performances qu'un scooter thermique de moins de 50 cm³... mais sans pollution locale¹.

En usage urbain, il offre de nombreux avantages et peu d'inconvénients car :

- de par sa petite taille, il s'intègre facilement dans le trafic ;
- la puissance progressive de son moteur permet une conduite souple, fluide et sans à-coups ;
- son entretien est réduit (pas de vidange, fiabilité maximale du moteur électrique) ;
- sa consommation est faible, ce qui le rend très économique (moins de 1 € pour 100 km) ;
- l'engin, silencieux et propre, est nerveux, véloce, et maniable.

La Figure 1 montre les différents éléments du scooter.

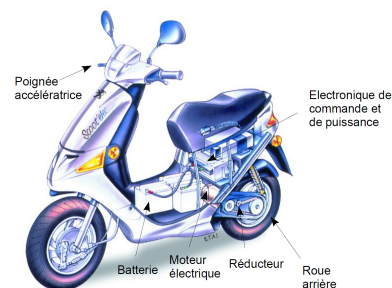


FIGURE 1 – Structure du Scoot'élec

1.2 Travaux à réaliser

Les travaux à réaliser lors de cette séance de TP sont :

- de proposer un modèle de connaissance (soit établi à partir d'équations physiques) de chaque composant du scooter intervenant pour la fonction principale ;
- de simuler la réponse du système par un logiciel dédié (Scilab / Xcos) ;
- de vérifier les performances définies dans le cahier des charges.

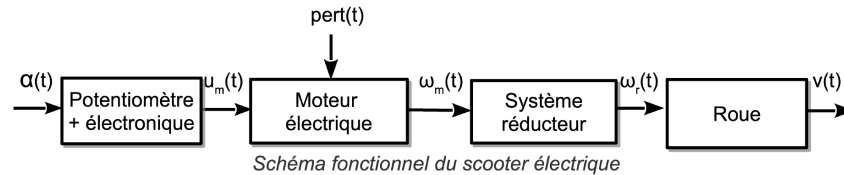
Exigences	Critères	Valeurs
Le scooter doit permettre le déplacement du conducteur par rapport à la route	Vitesse	45 km/h
	Accélération	100 m départ arrêté en 12 s 10 m départ arrêté en 3,5 s
	Masse transportée Hauteur de selle	90 kg maximum 780 mm $\pm$ 5 %
Le scooter doit être adapté au conducteur	Autonomie	1 h à vitesse maximale
	Charge	1 h 30 en utilisation urbaine
	Temps de charge	220 V – 7 A maximum 5 h
Le scooter doit respecter la réglementation du pays où il est vendu	Vitesse maximale	45 km/h (loi française)
	Nuisance sonore	Inférieure à 50 dB
	Recyclage	> 80 %
Le scooter doit s'adapter à la route	Encombrement	L x l x h = 1,74 m x 0,7 m x 1,14 m

2 Modélisation du scooter

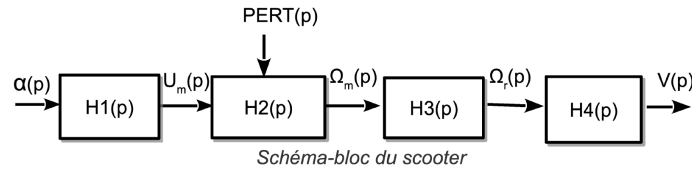
2.1 Schéma fonctionnel et modélisation par schéma-bloc

Le schéma fonctionnel ci-dessous établit la structure de commande du scooter électrique en définissant les composants permettant de passer de l'angle de consigne $\alpha(t)$ donné au niveau de la poignée accélératrice à la vitesse de déplacement du scooter $v(t)$ (déplacement en translation). On note $pert(t)$ les perturbations qui peuvent modifier la vitesse du scooter (elles sont ramenées au niveau du moteur).

1. la quantification de la pollution due à la production d'électricité, à son transport ainsi qu'à son stockage sur batterie est un autre problème.



À partir du schéma fonctionnel, on peut ainsi établir un schéma-bloc en définissant des fonctions de transfert pour chaque composant.



2.2 Fonctions de transfert du schéma-bloc précédent

2.2.1 Modèle de la commande

On constate expérimentalement que, dans la plage d'évolution du système, $u_m(t) = K_1 \alpha(t)$. L'ensemble délivre une tension maximale de 12 V pour un angle de consigne de 90° .

Q 1. Calculer la valeur numérique du gain K_1 et en déduire la fonction de transfert $H1(p)$.

$$K_1 = \frac{12}{90} \approx 0.13 \text{ V/}^\circ$$

2.2.2 Modèle du système réducteur

Le système réducteur (transmetteur de la chaîne fonctionnelle) est constitué par la mise en série d'un ensemble poulies / courroie et d'un engrenage cylindrique, comme représenté sur la figure ci-contre.

Q 2. Il est possible de montrer que $\omega_r(t) = k \omega_m(t)$ avec $k = \frac{34}{67} \times \frac{13}{47}$. En déduire la fonction de transfert $H3(p)$.

$$H3(p) = \frac{34}{67} \times \frac{13}{47} \approx 0.14$$

2.2.3 Modélisation de la roue

Q 3. Le rayon R de la roue en contact avec le sol est de 21 cm. Déterminer une relation entre la vitesse $v(t)$ et la vitesse de rotation $\omega_r(t)$ en précisant l'hypothèse utilisée (on supposera que $v > 0$ quand $\omega_r > 0$). En déduire la fonction de transfert $H4(p)$.

$$v(t) = R \omega_r(t) \Rightarrow H4(p) = R \text{ avec } R = 0.21 \text{ m.}$$

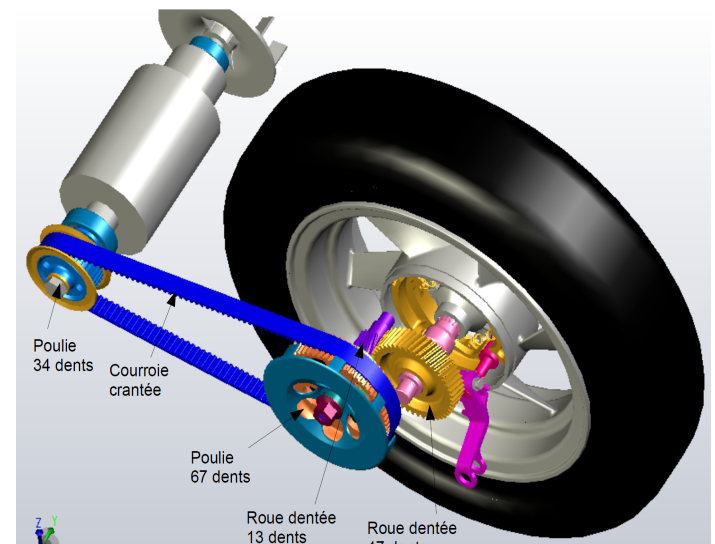
2.2.4 Modélisation du moteur

Les quatre équations qui caractérisent un moteur à courant continu correspondent de manière générale à :

- Équation électrique (modélisation par circuit R-L) : $u_m(t) = e(t) + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$
- Équation mécanique (théorème de l'énergie cinétique à tout le scooter) : $J_{eq} \frac{d\omega_m(t)}{dt} = c_m(t) - c_r(t)$
- Équations de couplage magnétique : $c_m(t) = k_c i(t)$ et $e(t) = k_e \omega_m(t)$

avec $u_m(t)$ la tension d'alimentation, $i(t)$ le courant circulant dans le moteur, $c_m(t)$ le couple fourni par le moteur, $c_r(t)$ le couple résistant ramené sur l'arbre moteur, $\omega_m(t)$ la vitesse de rotation du moteur et J_{eq} , L , R , k_c et k_e les constantes caractéristiques du moteur, dont les valeurs sont :

R	k_e	k_c	L	J_{eq}
0,0052 Ω	0,028 V.s/rad	0,024 Nm/A	0,01 mH	0,18 kg.m ²



Description du réducteur (transmetteur de puissance)

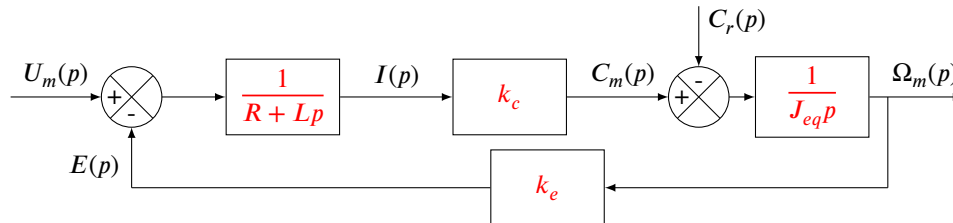
Q 4. En supposant que les conditions initiales sont nulles, transformer les quatre équations temporelles précédentes dans le domaine symbolique de Laplace. Recopier sur feuille et compléter le schéma-bloc suivant d'entrées $U_m(p)$ et $C_r(p)$ et de sortie $\Omega_m(p)$.

$$u_m(t) = e(t) + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \xRightarrow{\mathcal{L}} U_m(p) = E(p) + (R + L.p)I(p)$$

$$J_{eq} \frac{d\omega_m(t)}{dt} = c_m(t) - c_r(t) \xRightarrow{\mathcal{L}} J_{eq}.p\Omega_m(p) = C_m(p) - C_r(p)$$

$$c_m(t) = k_c i(t) \xRightarrow{\mathcal{L}} C_m(p) = k_c I(p)$$

$$e(t) = k_e \omega_m(t) \xRightarrow{\mathcal{L}} E(p) = k_e \Omega_m(p)$$

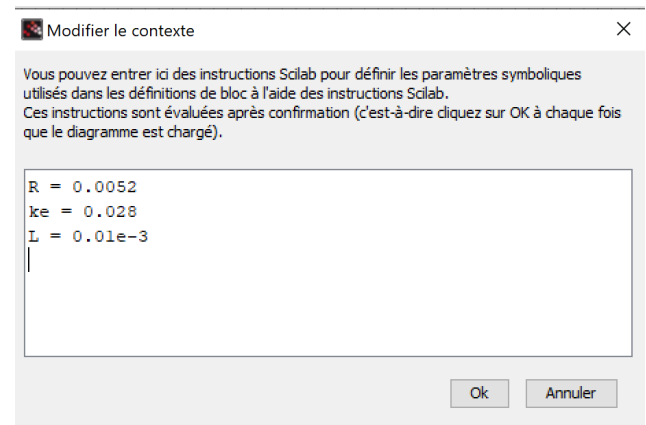


Q 5. Est-ce que le Scoot'élec est un système asservi ? Justifier.

Attention : Bien que le schéma-bloc présente la structure d'un système bouclé avec un retour, cette structure est due au couplage électro-magnétique modélisant le comportement de la MCC. Il n'y a aucun capteur, qui permettrait de mesurer la sortie $\omega_m(t)$ afin de la comparer avec une consigne d'entrée, le système n'est donc pas asservi.

Q 6. Lancer le logiciel Scilab. Taper `xcos` dans la console. Deux fenêtres vont s'ouvrir. Dans la fenêtre 'Sans titre', cliquer sur 'Simulation' et choisir 'Modifier le contexte'.

Entrer alors les valeurs numériques données ou calculées et valider. Un exemple de notation est fourni sur la figure ci-contre.

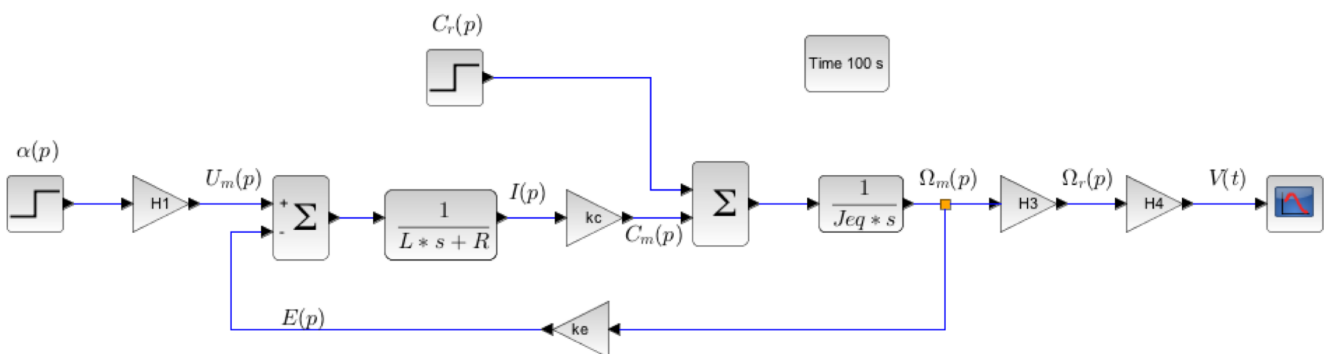


Il faut maintenant ajouter les blocs en les faisant glisser depuis la fenêtre 'Navigateur de Palettes' et les relier entre eux. Dans le navigateur de palettes, vous veillerez à choisir les blocs dans le dossier CPGE uniquement.

Vous noterez que la variable de Laplace est "s".

Il faut aussi mettre un 'scope' à une entrée pour visualiser la vitesse et un bloc de temps pour les paramètres de simulation.

Finalement, le schéma-bloc réalisé sur Scilab devrait ressembler à celui de la figure suivante.



Gains dans CPGE => Opérateurs linéaires (GAINBLK_f)
Fonctions de transfert dans CPGE => Opérateurs linéaires (CLR)
Sommateurs dans CPGE => Opérateurs linéaires (BIGSOM_f)

Échelons en entrée dans CPGE => Opérateurs linéaires (STEP_FUNCTION)
Afficheur bleu dans CPGE => Sorties (SCOPE)
Paramètres de simulation dans CPGE => Analyse (REP_TEMP)

Quelques conseils :

- Double-cliquer sur les blocs pour entrer les expressions.
- Pour inverser / pivoter / inverser le sens d'un composant, il suffit de cliquer droit sur le bloc, puis sélectionner Format / Miroir ou Format / Pivoter ou Format / Retourner (ou Ctrl + M, Ctrl + R ou Ctrl + F).
- Pour modifier les opérations d'addition / soustraction d'un soustracteur, cliquer deux fois sur le bloc et choisir les signes dans la case 'Number of inputs of sign vector' ([-1,1] pour un comparateur par exemple).

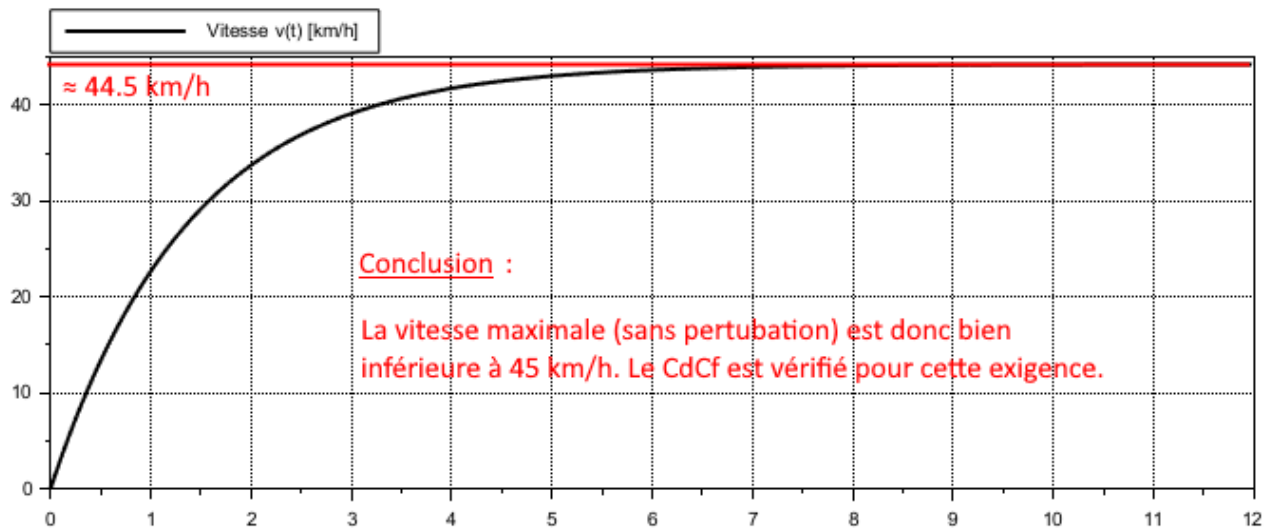
3 Vérification des performances du Scoot-élec

3.1 Cas sans perturbation

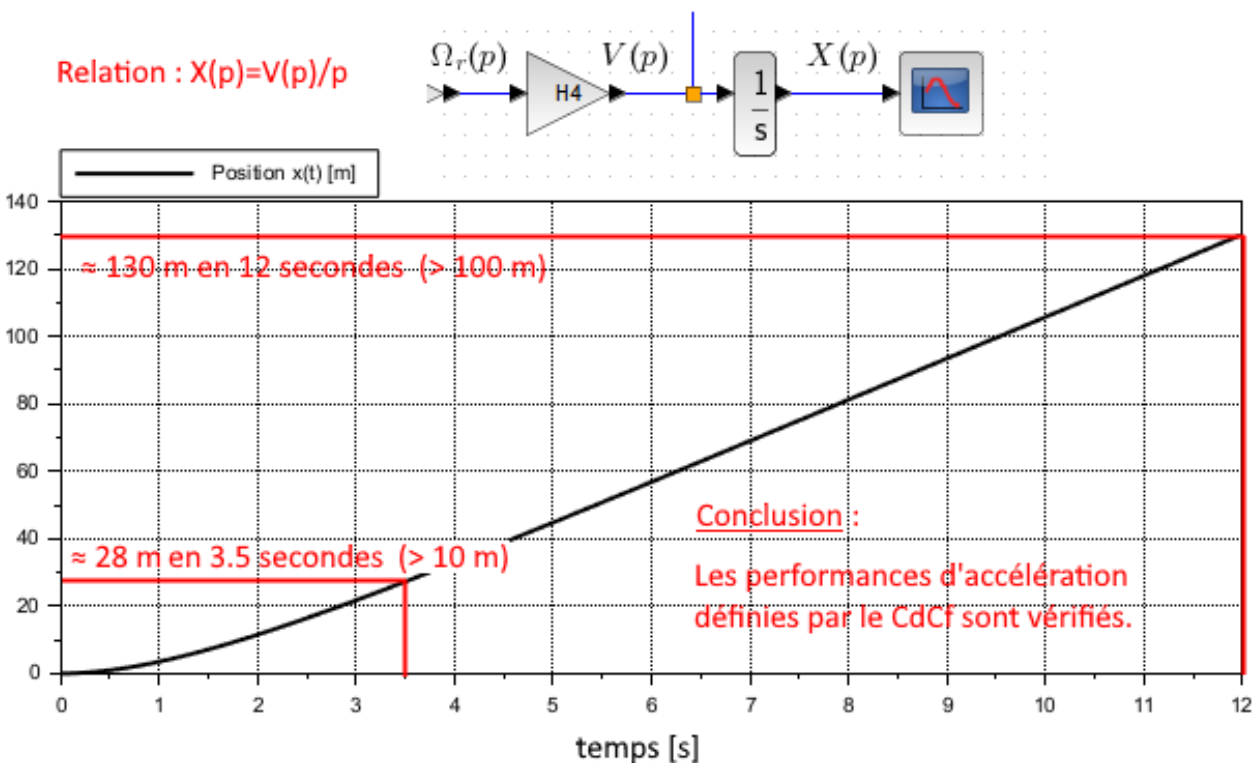
Pour vérifier les performances du Scooter, on suppose dans un 1er temps que les perturbations sont négligeables.

On applique en entrée un échelon d'angle de $\alpha = 90^\circ$ (on accélère à fond très rapidement, ce qui n'est pas très crédible au vu de la structure du système réel) et un échelon d'amplitude nulle sur le couple résistant.

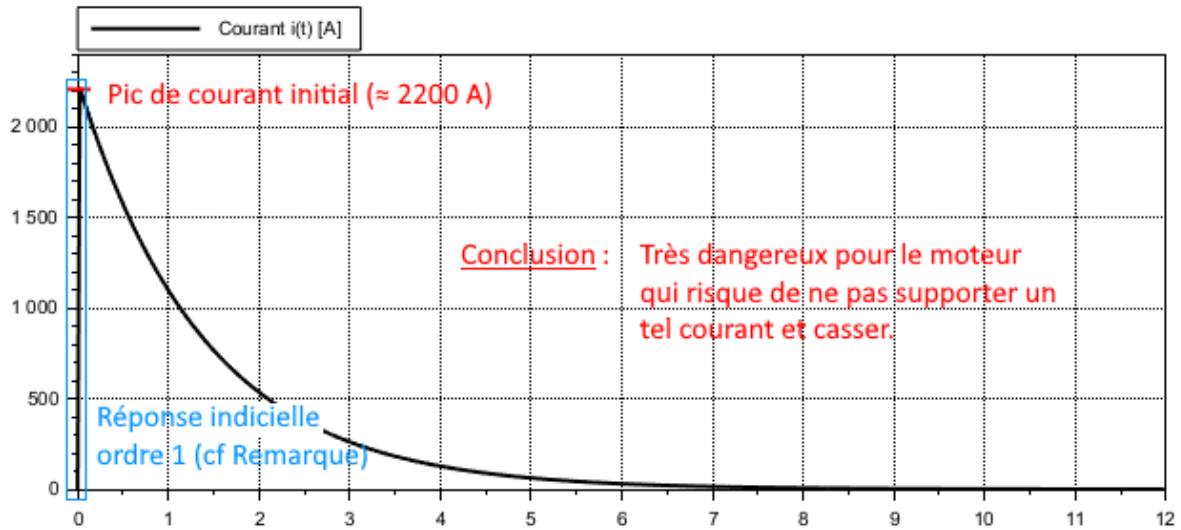
Q 7. Donner une amplitude de 90 pour l'entrée α (angle de la poignée, en degré) et une amplitude de 0 pour le couple C_r (couple résistant, en N.m) à l'instant $t = 0$. Lancer une simulation en choisissant une durée de simulation de 12 s et 500 points (pour cela, double cliquer sur le bloc REP_TEMP qui affiche par défaut une valeur de 100) : vérifier alors la performance de vitesse maximale définie dans le cahier des charges.



Q 8. Quelle est la relation entre la vitesse $v(t)$ et la position $x(t)$? Modifier le schéma de façon à afficher cette position (il faut également rajouter un afficheur, ou SCOPE). Lancer la simulation et vérifier les performances d'accélération définies dans le cahier des charges.



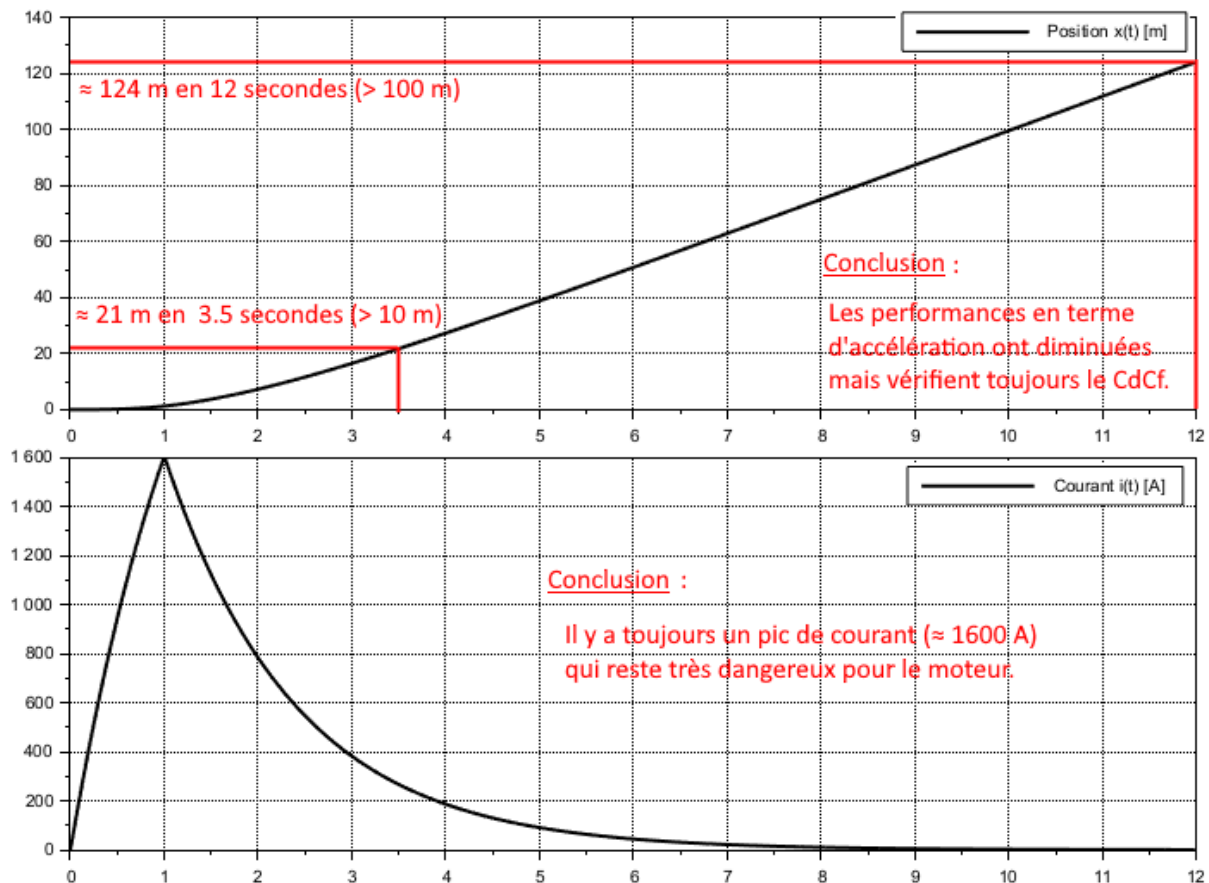
Q 9. Visualiser l'évolution du courant (il faut rajouter un afficheur SCOPE au bon endroit) et commenter l'allure de la courbe obtenue.



Remarque : L'allure de la courbe, avec ce pic initial de courant, provient de la différence de rapidité entre la réponse "électrique" du moteur et sa réponse "mécanique" suite à une entrée en échelon. En effet :

Aux instants initiaux, le moteur ne tourne pas ($E(p) \approx 0$ Volt), le comportement du courant est donc régi par la fonction de transfert $H(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{1}{R + L \cdot p} = \frac{K}{1 + \tau \cdot p}$ avec $K = \frac{1}{R} \approx 192.3 \Omega^{-1}$ et $\tau = \frac{L}{R} \approx 2$ ms. Ainsi, les premiers instants de la réponse en courant représentent la réponse d'un ordre 1 à un échelon $U_m(p) = \frac{\alpha_0 \cdot K_1}{p}$ ce qui implique une valeur finale atteinte à $\pm 5\%$ près en $3\tau = 6$ ms valant $i_\infty = \alpha_0 \cdot K_1 \cdot K = 2250$ A. Dans un second temps, la réponse mécanique entre en jeu, le moteur commence à tourner : $E(p) = k_e \Omega_m(p) \neq 0$ et le courant diminue.

Q 10. Modifier l'entrée pour prendre en compte une variation plus continue de l'entrée : bloc TRAPEZOID. Est-ce que le problème identifié précédemment est réglé ? Quel impact ce départ "en douceur" a-t-il eu sur les performances en terme d'accélération ? Quelle solution pourriez-vous proposer pour protéger le moteur ?



Le problème n'est donc pas réglé, bien que ce démarrage "en douceur" est diminué l'amplitude du pic de courant. Afin de protéger le moteur, il faut donc utiliser une boucle de courant. En effet, la solution alternative qui serait de démarrer "extrêmement doucement" pour laisser le temps à la "réponse mécanique" de suivre et compenser le pic de courant n'est pas pertinente au regard des performances attendues par le cahier des charges.

3.2 Cas avec perturbations

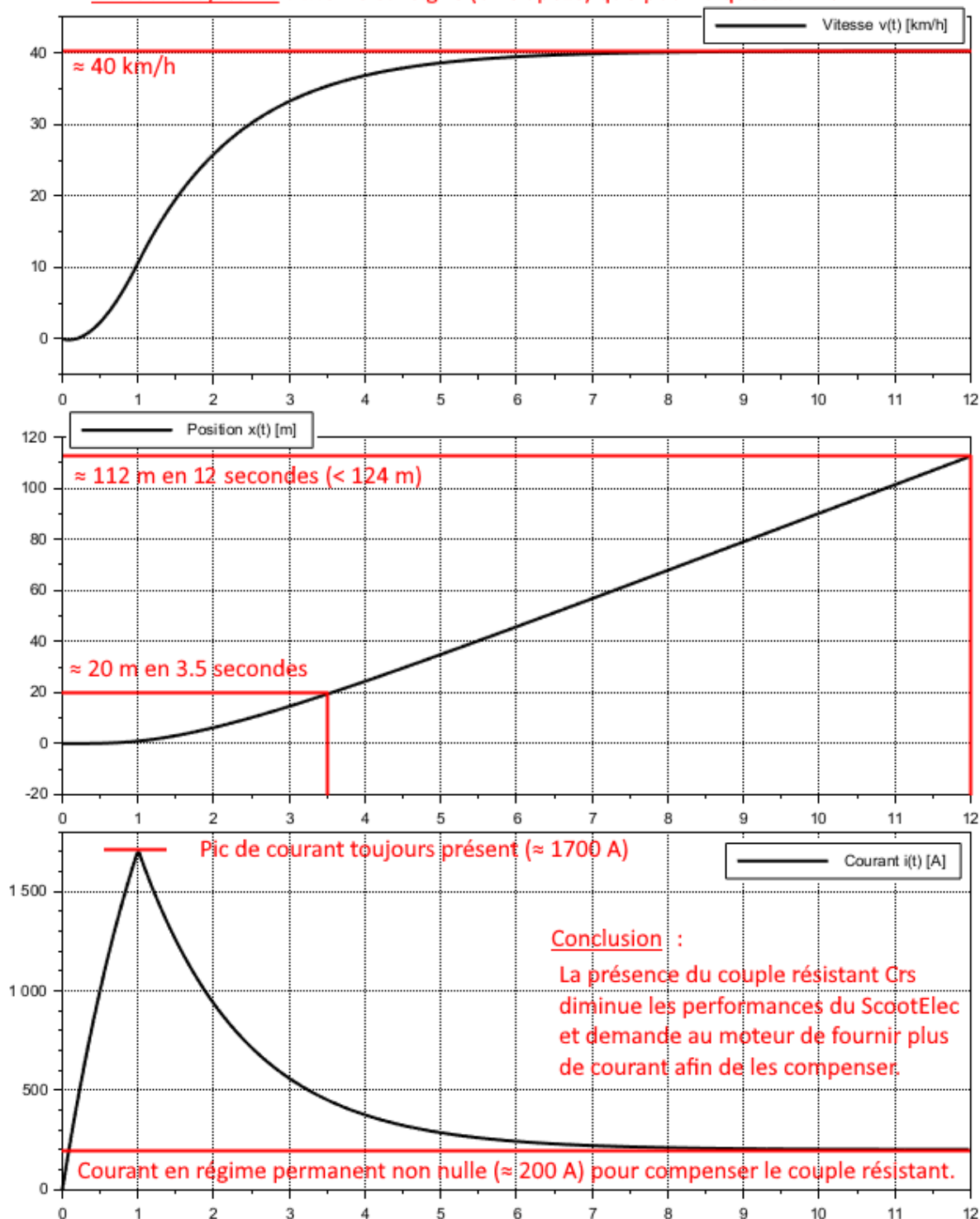
Les perturbations sur le modèle, modélisées par le couple $c_r(t)$ au niveau du moteur, peuvent être de nature différente, entre autres les suivantes :

- couple de frottement sec entre la roue et le sol : c_{rs}
- etc.

On suppose dans un premier temps que seul le frottement sec est pris en compte : on estime à $f_s = 0.8$ le facteur de frottement de la roue sur le sol, on considérera que : $c_{rs} = 4.8$ N.m.

Q 11. Modifier la valeur de l'échelon de couple C_r et lancer une nouvelle simulation. Observer les évolutions de la vitesse, de la position et du courant. Commenter l'influence du couple résistant sur les performances du scooter.

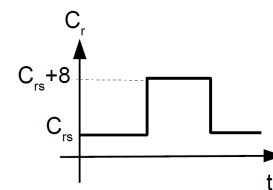
Entrée du système : Même consigne (en trapèze) que pour la question 10.



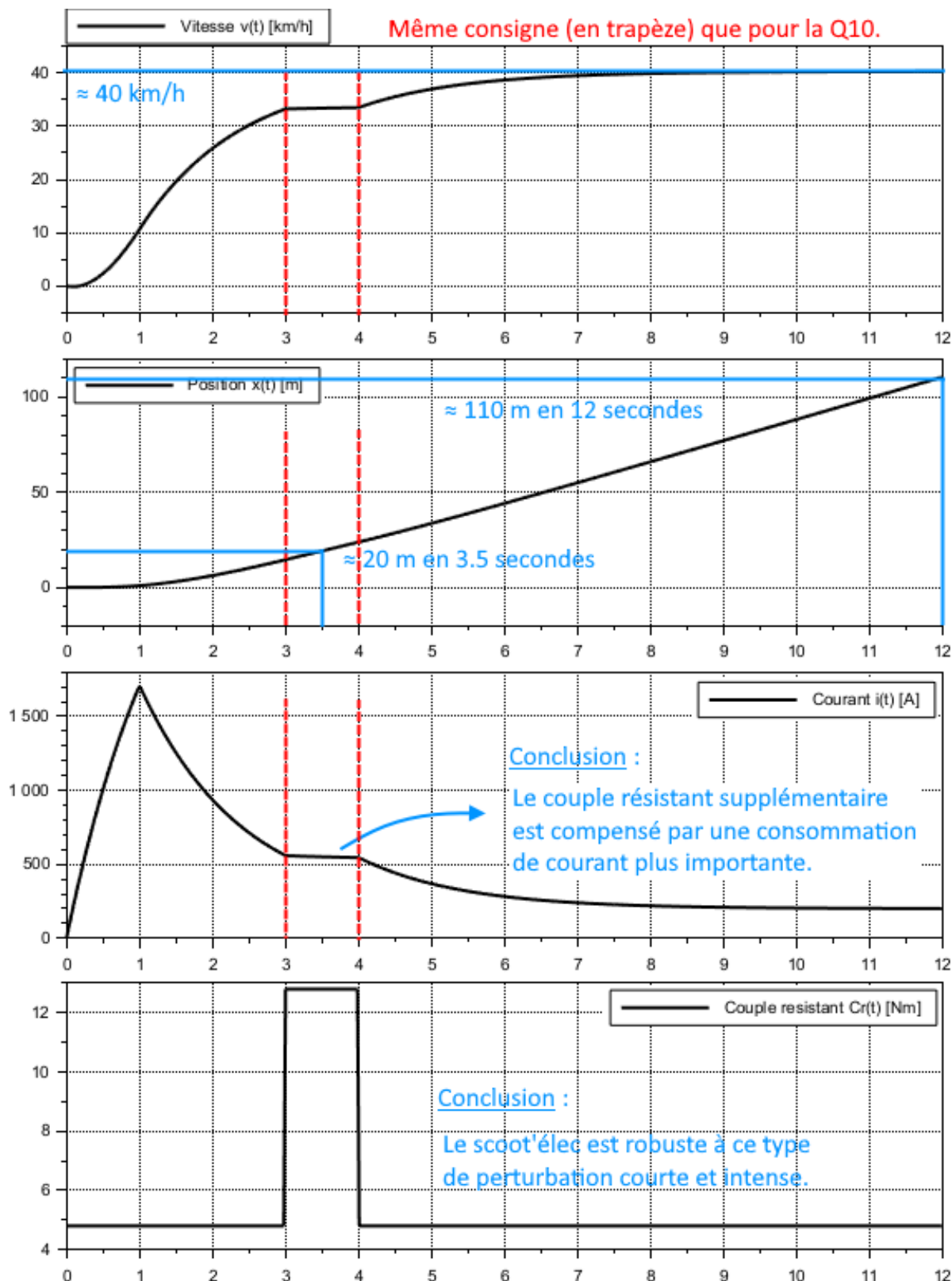
Remarque : La valeur de courant en régime permanent permet de créer un couple moteur compensant directement le couple résistant :

$$\frac{d\omega_m(t \rightarrow +\infty)}{dt} = 0 \Rightarrow c_m(t \rightarrow +\infty) = c_r(t \rightarrow +\infty) \Rightarrow i_\infty = \frac{c_{rs}}{k_c} = 200 \text{ A.}$$

On applique maintenant un couple résistant de la forme ci-contre.



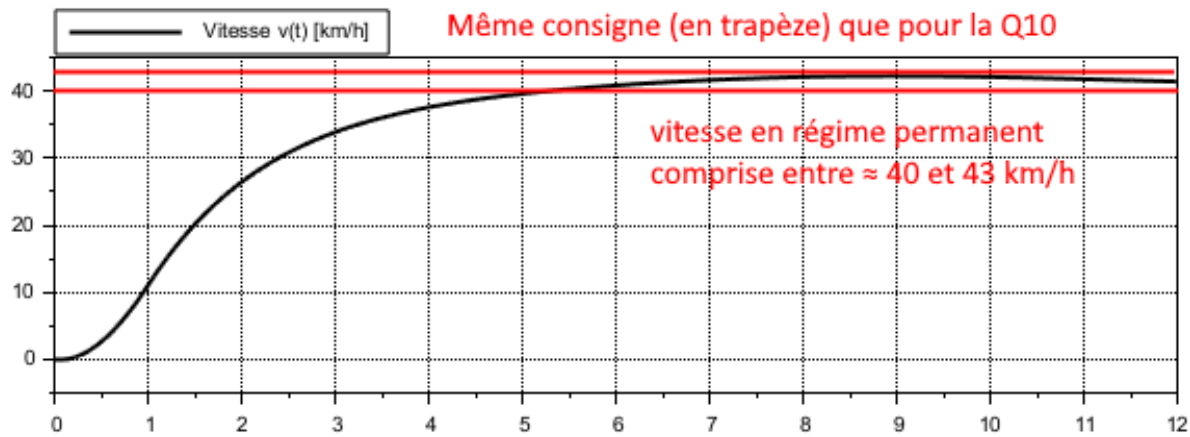
Q 12. Après avoir indiqué quelle situation peut être modélisée par ce signal, analyser la réponse de ce système à une telle perturbation à l'instant $t = 3 \text{ s}$ et sur une durée de 1 s et conclure sur les performances en robustesse de ce système.



Ce signal peut modéliser une perturbation courte et intense s'appliquant sur le scooter (e.g. une forte bourrasque de vent) créant, sur un temps court, un couple résistant supplémentaire $c_r(t) = c_{rs} + c_{vent}(t)$.

Remarque : Il n'est pas pertinent de proposer ici que ce couple résistant supplémentaire modélise la montée d'une pente. En effet, le couple dû à la pesanteur $c_{rp} = \frac{c_{rs} \cdot \sin(\alpha)}{f_s} \Rightarrow \sin(\alpha) > 1$ selon les valeurs données par l'énoncé.

Q 13. Analyser la réponse du système à une perturbation sinusoïdale d'amplitude 1 N.m et de fréquence 0.1 Hz autour de la valeur 3 N.m. Quelle situation est modélisée par cette étude ?



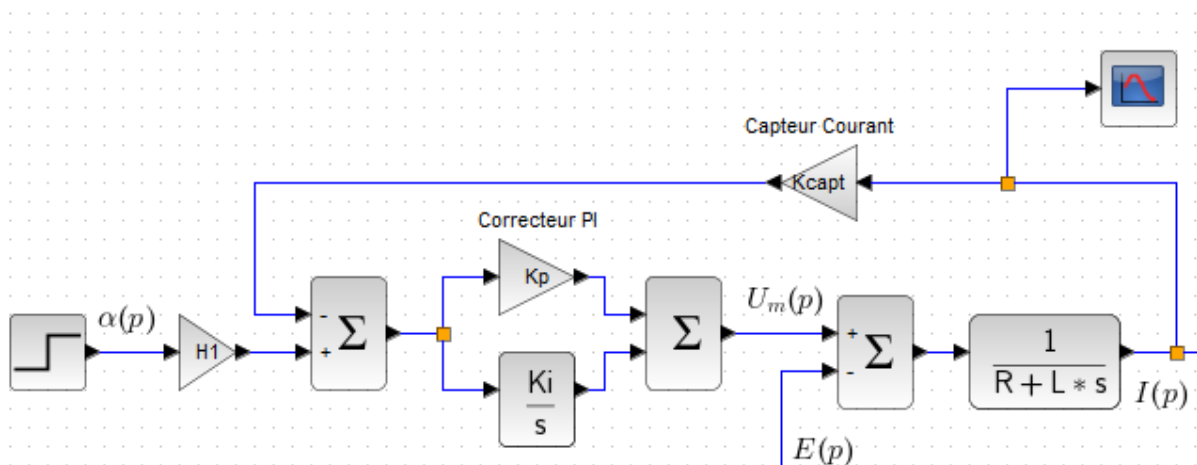
Ce signal peut modéliser la conduite sur une route vallonnée (montée : $c_{rp} > 0$ couple résistant dû à la pesanteur puis descente : $c_{rp} < 0$ couple moteur) ce qui a pour effet de rajouter, en fonction de la pente, un couple supplémentaire au couple résistant dû au frottement sec : $c_r(t) = c_{rs} + c_{rp}(t)$. De plus, puisque le couple résistant moyen a diminué : $c_{rs} = 3$ N.m, on peut supposer que cela correspond à une diminution du facteur de frottement entre la roue et le sol. Cela peut modéliser une conduite sur route mouillée : $f_s(\text{mouillée}) = \frac{3}{4.8} f_s = 0.5$

3.3 Utilisation d'une boucle de courant

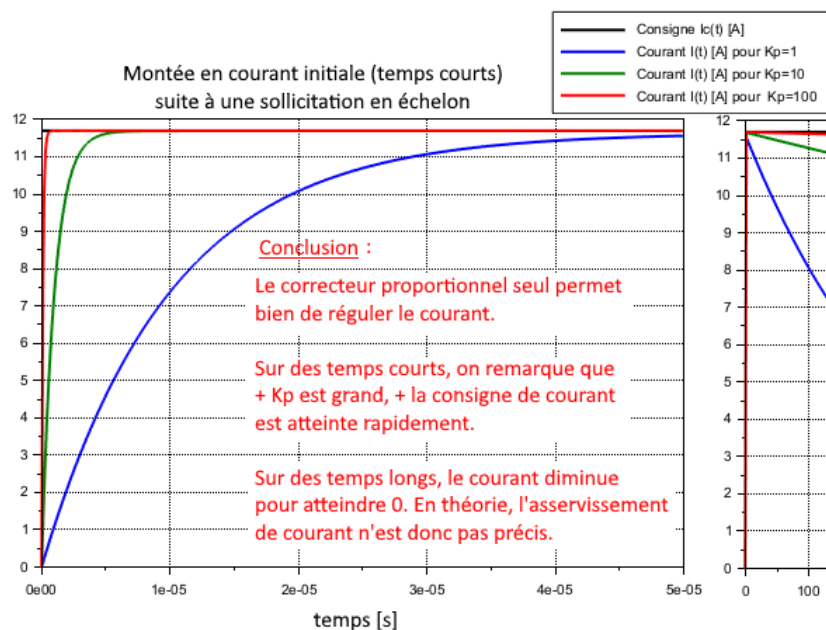
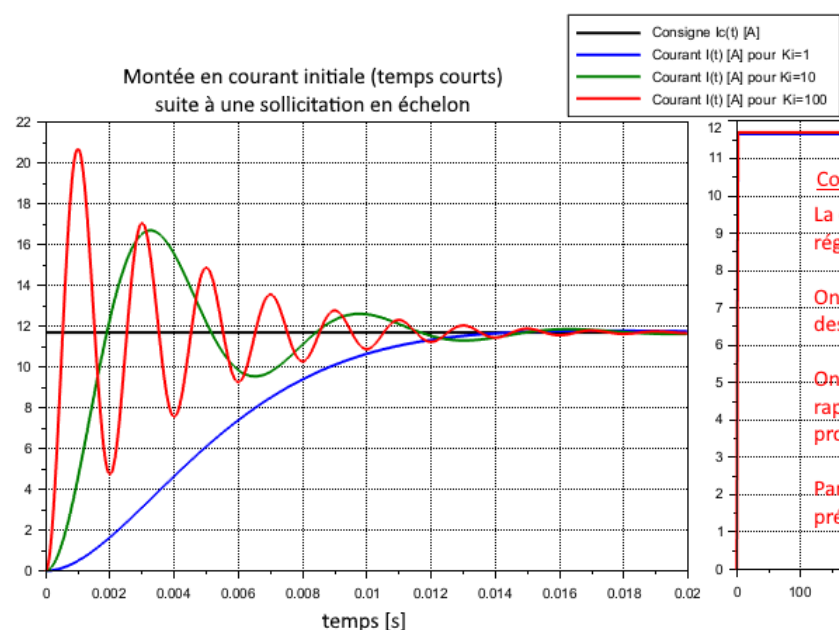
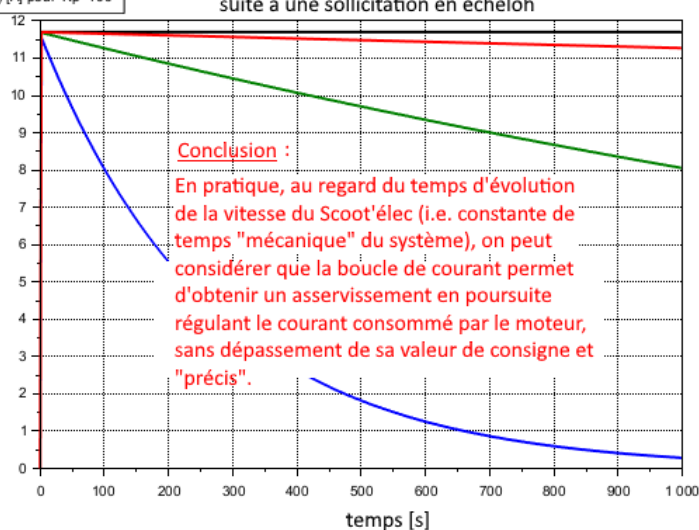
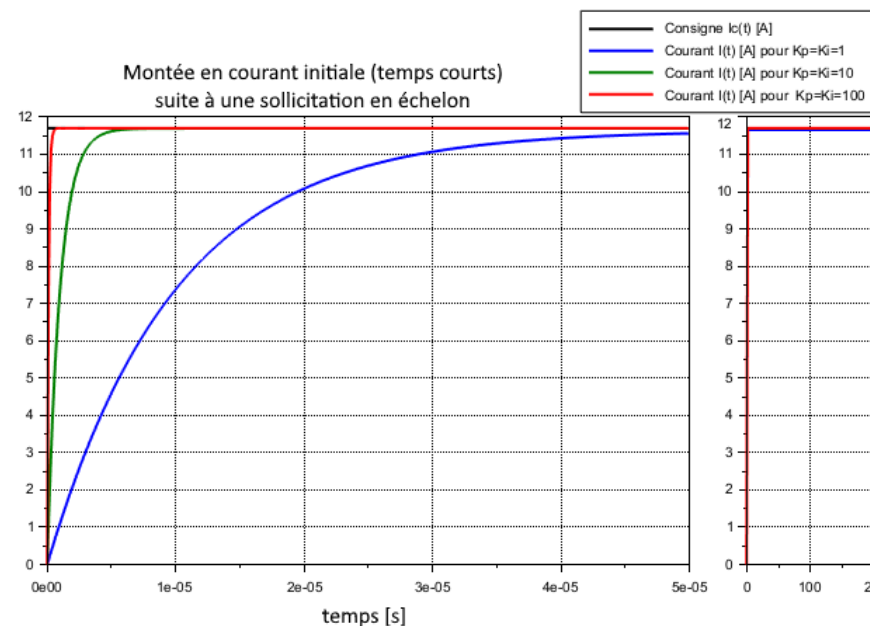
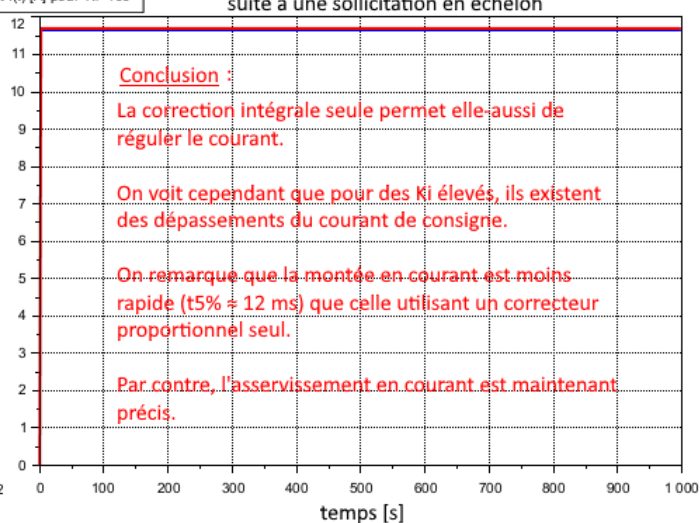
Mettre systématiquement en place un asservissement (ici, de vitesse ou de position) en cas de non respect des performances peut être contreproductif sur les performances et, dans le cas présent, à proscrire car très dangereux pour le pilote du scooter qui doit toujours conserver la maîtrise de son véhicule.

Par contre, dans ce type de système électrique, il est généralement intéressant de mettre en place une « boucle de courant » pour protéger le moteur : cela permet en effet de « lisser » les pics de courant qu'on a identifiés précédemment et qui peuvent avoir un effet très négatif sur la durée de vie du moteur électrique.

Q 14. Mettre en place une boucle de courant utilisant un capteur de courant de gain unitaire, une soustraction entre la sortie du bloc H1 et le retour de courant suivi d'un correcteur $C(p) = K_p + \frac{K_i}{p}$ pilotant la tension du moteur.



Q 15. On se place dans le cas sans perturbation ($C_r(p) = 0$) afin de comprendre les effets de la boucle de courant dans un contexte simplifié, analyser les effets de la correction Proportionnelle seule ($K_i = 0$), de la correction Intégrale seule ($K_p = 0$) et de la correction PI complète ($K_p \neq 0$ et $K_i \neq 0$) sur l'évolution du courant consommé dans le moteur.

Évolution du courant sur des temps longs
suite à une sollicitation en échelonÉvolution du courant sur des temps longs
suite à une sollicitation en échelonÉvolution du courant sur des temps longs
suite à une sollicitation en échelon