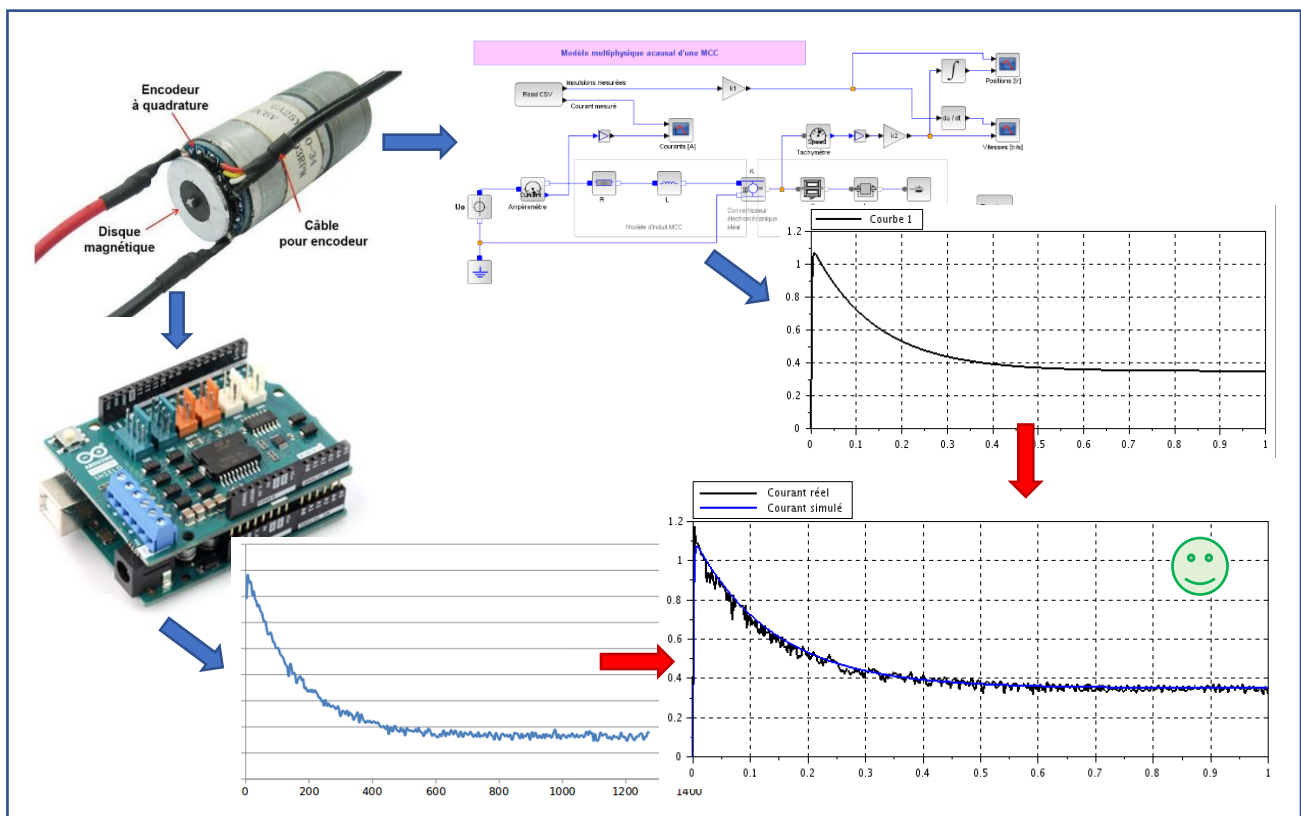


Cycle 7 : Analyser et modéliser la chaîne de conversion électromécanique

Modélisation multiphysique d'une Machine à Courant Continu TP



Compétences Visées :

- ☐ Choisir une méthode de résolution pour déterminer les grandeurs électriques
- ☐ Identifier le comportement d'un système pour l'assimiler à un modèle canonique, à partir d'une réponse temporelle ou fréquentielle
- ☐ Choisir les grandeurs physiques tracées
- ☐ Choisir les paramètres de simulation
- ☐ Faire varier un paramètre et comparer les courbes obtenues
- ☐ Déterminer les grandeurs influentes, modifier les paramètres et enrichir le modèle pour minimiser l'écart entre les résultats simulés et les réponses mesurées.
- ☐ Comparer les résultats obtenus aux grandeurs physiques réelles mesurées ou attendues
- ☐ Interpréter les écarts

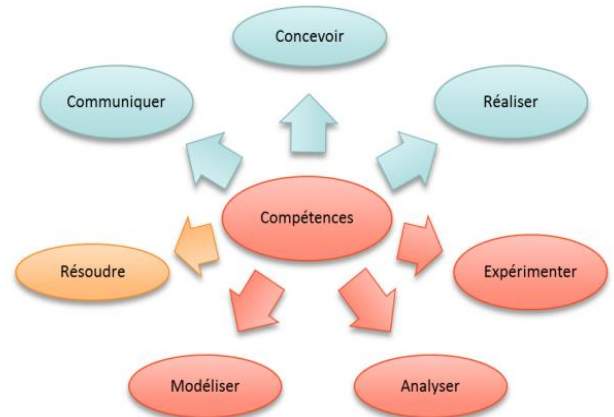
Table des matières

1.	Contexte.....	3
1.1.	Contexte pédagogique	3
1.2.	Evaluation des écarts	3
1.3.	Documents ressources.....	3
1.4.	Déroulement du TP	4
2.	Organisation du TP	5
2.1.	Objectifs	5
2.2.	Répartition des rôles :	5
2.3.	Tâches à réaliser.....	6
3.	Analyse	7
3.1.	Etude à rotor bloqué.....	7
3.2.	Etude en régime permanent.....	8
3.3.	Etude en régime transitoire	8
3.4.	Synthèse de l'analyse	8
4.	Modélisation de la MCC	9
4.1.	Etablissement du modèle	9
4.1.1.	Modèle et contexte	9
4.1.2.	Librairie CPGE	10
4.1.3.	Librairie SIMM	10
4.2.	Validation du modèle.....	12
4.3.	Intégration des résultats expérimentaux.....	13
5.	Expérimentations.....	15
5.1.	Présentation de la maquette expérimentale	15
5.2.	Installation de l'interface d'acquisition BBAcq.....	15
5.3.	Prise en main de l'interface BBAcq	16
5.4.	Expérimentations	17
5.4.1.	Détermination de la résolution de l'encodeur.....	17
5.4.2.	Réponse indicielle expérimentale	17
6.	Synthèse des résultats	18
7.	Annexe A : mesure de courant effectuée par le Shield Motor	19
8.	Annexe B : encodeur à capteurs à effet Hall.....	20

1. Contexte

1.1. Contexte pédagogique

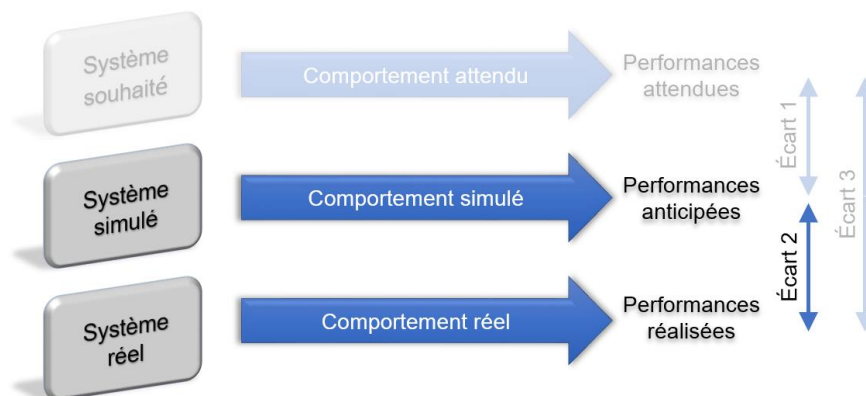
- ❑ Analyser :
 - Conduire l'analyse
- ❑ Modéliser :
 - Justifier ou choisir les grandeurs nécessaires à la modélisation
 - Valider un modèle
- ❑ Expérimenter :
 - Justifier et/ou proposer un protocole expérimental
- ❑ Communiquer :
 - Mettre en œuvre une communication



1.2. Evaluation des écarts

Pour prévoir les performances d'un moteur à courant continu, et permettre ainsi un pilotage asservi en vitesse et/ou position selon le comportement désiré, il est indispensable d'établir un modèle de MCC conforme à la machine réelle.

L'objectif du TP est donc d'établir et valider la modélisation multiphysique d'une MCC (dite modélisation « acausale », puisque la notion d'entrée/sortie n'a plus grand sens et que la causalité s'observe selon tous les angles d'observation des phénomènes physiques) en comparant résultats expérimentaux et simulations numériques, par le biais d'une analyse théorique du modèle de connaissance de la MCC.



1.3. Documents ressources

- ❑ Ce sujet ;
- ❑ un fichier de validation du modèle Xcos/Scilab (fichier « test.csv ») ;
- ❑ l'installateur du logiciel d'acquisition Bbacq (fichier « BBacqSetup.msi ») ;
- ❑ le dossier technique de l'interface Bbacq (fichier « Interface acquisition BBacq.pdf ») ;
- ❑ un fichier de configuration de l'interface Bbacq (fichier « Config_MCC.ini ») ;

1.4. Déroulement du TP

Le projet est mené sur 1 séance de TP. **Un compte-rendu est exigé à la fin de la séance**, répondant aux différentes questions rencontrées dans le sujet.

Le compte rendu devra obligatoirement contenir :

- ☐ le détail des calculs analytiques ;
- ☐ les mesures effectuées et les paramètres du modèle obtenus ;
- ☐ la superposition des résultats expérimentaux et simulés ;
- ☐ l'analyse argumentée des écarts obtenus.

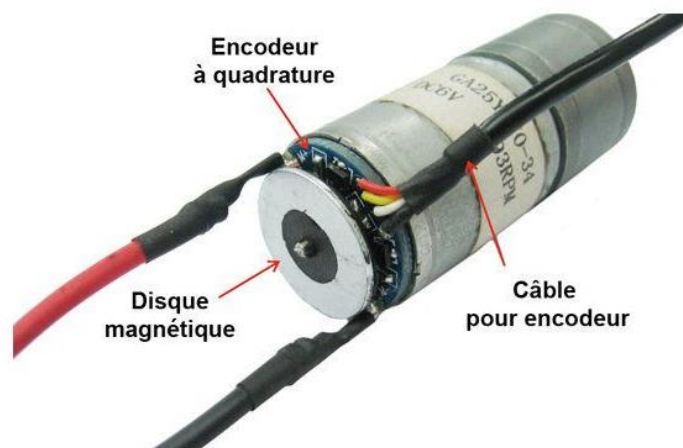
Il vous suffit de répondre aux questions posées dans le compte-rendu pour cela.

Cette activité sera menée sur l'un des 2 moteurs suivants:

- ☐ kit **Motoréducteur + encodeur FIT0450**, de tension nominale **6 V**, de rapport de réduction **120:1** basé sur un train d'engrenage simple à sortie désaxée (à angle droit) ;



- ☐ kit **Motoréducteur + encodeur WT341**, de tension nominale **6 V**, de rapport de réduction **34:1** basé sur un train d'engrenage simple à sortie coaxiale.



2. Organisation du TP

2.1. Objectifs

L'objectif du TP est d'**établir le modèle acausal d'un moteur à courant continu et de confronter les résultats obtenus au moteur réel par le biais d'analyses théorique et expérimentale.**

Il consiste donc à :

- ❑ analyser un modèle de connaissance de la MCC ;
- ❑ modéliser celui-ci sous le logiciel Scilab/Xcos avec des blocs physiques (modèle multi-physique) ;
- ❑ expérimenter le moteur réel à l'aide d'une carte Arduino + carte Motor Shield ;
- ❑ déterminer les paramètres du modèle à partir des résultats expérimentaux, en lien avec l'analyse théorique effectuée ;
- ❑ confronter les résultats obtenus et raffiner éventuellement le modèle pour limiter les écarts.

2.2. Répartition des rôles :

- ❑ Équipe de 4 :
 - 1 expérimentateur ;
 - 1 analyseur ;
 - 1 modélisateur.
 - 1 expérimentateur/modélisateur (selon les besoins).
- ❑ Équipe de 3 :
 - 1 expérimentateur ;
 - 1 analyseur/expérimentateur (quand nécessaire) ;
 - 1 modélisateur.

Rôle de l'expérimentateur	Rôle du modélisateur	Rôle de l'analyseur
Son rôle est d' effectuer les mesures sur la MCC.	Son rôle est de modéliser la MCC sous le logiciel Scilab/Xcos.	Son rôle est d' analyser le modèle de connaissance de la MCC.
<p>Il est amené à mettre en œuvre différents protocoles expérimentaux, au moyen d'une interface d'acquisition dédiée.</p> <p>Il maîtrise les conditions de l'expérience, et est capable de mettre en forme les données expérimentales pour les communiquer au modélisateur.</p>	<p>Il a une bonne maîtrise du logiciel et sait mener à bien des simulations numériques, dans un contexte donné.</p>	<p>Il a une bonne connaissance des modèles physiques de la MCC, et sait mener à bien une résolution analytique sous certaines hypothèses.</p> <p>Il aide l'expérimentateur à exploiter les résultats expérimentaux afin d'obtenir les paramètres du modèle, qu'il communiquera au modélisateur.</p>

Rôle du « chef de projet »

Son rôle est de :

- ☐ **coordonner l'ensemble de l'équipe ;**
- ☐ **s'assurer du bon aboutissement du projet.**

Il est souhaitable que le « Chef de projet » soit un expérimentateur ou modélisateur.

2.3. Tâches à réaliser

En fonction du rôle de chacun, elles sont fournies dans chaque chapitre dédié :

[Tâches de l'analyseur](#)

[Tâches du modélisateur](#)

[Tâches de l'expérimentateur](#)

Une fois les mesures effectuées, le modèle paramétré correctement, l'ensemble de l'équipe aura à analyser et à synthétiser les résultats obtenus, dont les attendus sont au chapitre :

[Synthèse des résultats](#)

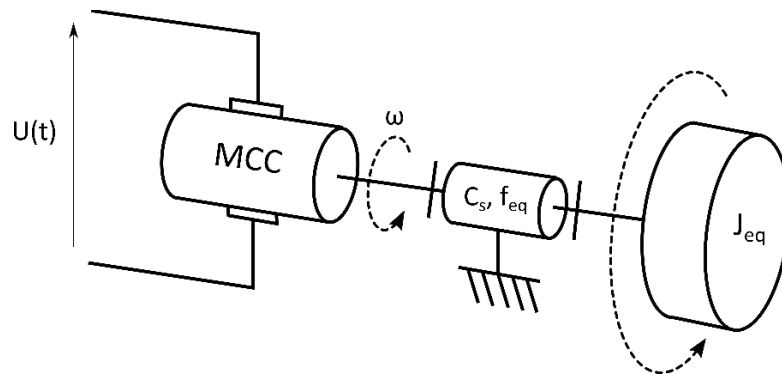
3. Analyse

L'étude d'une MCC entraînant une charge (via un transmetteur de mouvement ou non) peut toujours se ramener au modèle ci-dessous, où :

- l'ensemble entraîné par l'arbre moteur est cinétiquement équivalent à une charge en rotation de moment d'inertie équivalent J_{eq} ;
- les frottements secs ramenés sur l'arbre sont considérés constants et de valeur C_s , les frottements visqueux ramenés sur l'arbre sont représentés par le coefficient de frottements visqueux équivalent f_{eq} , ce qui donne un couple résistant équivalent ramené sur l'arbre moteur d'expression :

$$C_r = C_s + f_{eq} \cdot \omega$$

avec ω la vitesse de rotation de l'arbre moteur.



L'induit de la MCC, alimenté par la tension $u(t)$, est modélisé par sa résistance R , son inductance L et sa f.cem $e(t)$. La constante de couplage électromécanique est notée k .

On considère pour toute l'étude que la MCC est soumise à un échelon de tension U_0 .

3.1. Etude à rotor bloqué

On considère dans cette phase que le rotor reste bloqué, soit donc que $\omega = 0$. Cela correspond au comportement de la MCC au démarrage, où le rotor ne se met en mouvement qu'une fois les frottements et l'inertie "vaincus" par un couple moteur suffisant.

Question 1 : donner le modèle électrique équivalent au niveau de l'induit de la MCC.

Question 2 : en passant dans le domaine de Laplace, montrer que la fonction de transfert $I(p)/U(p)$ peut se mettre sous la forme canonique d'un premier ordre, dont on précisera les expressions du gain statique K_I et de la constante de temps τ_e .

Question 3 : pour une tension $u(t)$ de type échelon d'amplitude U_0 , tracer la réponse indicielle de $i(t)$ en faisant apparaître τ_e et $I_{max} = \lim_{t \rightarrow \infty} i(t)$, dont on précisera l'expression littérale en fonction de R et U_0 .

Question 4 : Que se passe-t-il d'un point de vue du démarrage de la MCC si τ_e est très faible (proche de 0) ?

3.2. Etude en régime permanent

On considère dans cette étude que le régime permanent est atteint, et que toutes les grandeurs physiques sont constantes. On utilise donc des majuscules pour les nommer, et l'on obtient donc :

- ☐ un courant d'induit constant I_0 ;
- ☐ une f.cem constante E_0 ;
- ☐ un couple moteur constant C_0 ;
- ☐ une vitesse de rotation constante Ω_0 .

Question 5 : donner le modèle électrique équivalent au niveau de l'induit de la MCC, ainsi que l'équation dynamique correspondant à ce régime.

Question 6 : en déduire les expressions littérales de :

- ☐ E_0 en fonction de U_0 , R et I_0 ;
- ☐ k en fonction de E_0 et Ω_0 ;
- ☐ C_r en fonction de k et I_0 .

Question 7 : si l'on considère que les frottements visqueux sont négligeables devant les frottements secs ($f_{eq} \cdot \omega \ll C_s, \forall \omega$) en déduire l'expression de C_s en fonction de K et I_0 .

3.3. Etude en régime transitoire

Pour simplifier l'étude, on considère que l'action de la bobine face aux actions mécaniques est négligeable, et que ce comportement s'observe dès le début de l'échelon de tension (pas de phase de démarrage).

Question 8 : donner le modèle électrique équivalent au niveau de l'induit de la MCC, ainsi que l'équation dynamique.

Question 9 : sachant que $\Omega_0 = \frac{k U_0 - R C_s}{k^2 + R f_{eq}}$ (voir TD), montrer que la vitesse de rotation $\omega(t)$ satisfait l'équation différentielle suivante :

$$\tau_{em} \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \Omega_0$$

Question 10 : en déduire l'expression temporelle de $\omega(t)$, et tracer sa réponse indicielle en faisant apparaître les constantes τ_{em} et Ω_0 .

Question 11 : en déduire que l'expression temporelle du courant $i(t)$ peut se mettre sous la forme

$$i(t) = (I_{max} - I_0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{em}}\right) + I_0$$

Question 12 : donner une méthode pour estimer le courant maximal I_{max} à partir de relevés expérimentaux du courant $i(t)$.

3.4. Synthèse de l'analyse

Question 13 : Si l'on considère que l'on peut mesurer I_0 , I_{max} , τ_e , τ_{em} et Ω_0 , et connaissant la valeur de U_0 , donner les expressions permettant de déterminer R , k , C_s , J_{eq} et L , dans l'hypothèse où les frottements visqueux sont considérés comme négligeables.

Faire une restitution de cette synthèse à l'expérimentateur et au modélisateur.

4. Modélisation de la MCC

Le modèle est établi à l'aide du logiciel Scilab/Xcos en version 5.5.2, et s'appuie sur les librairies suivantes :

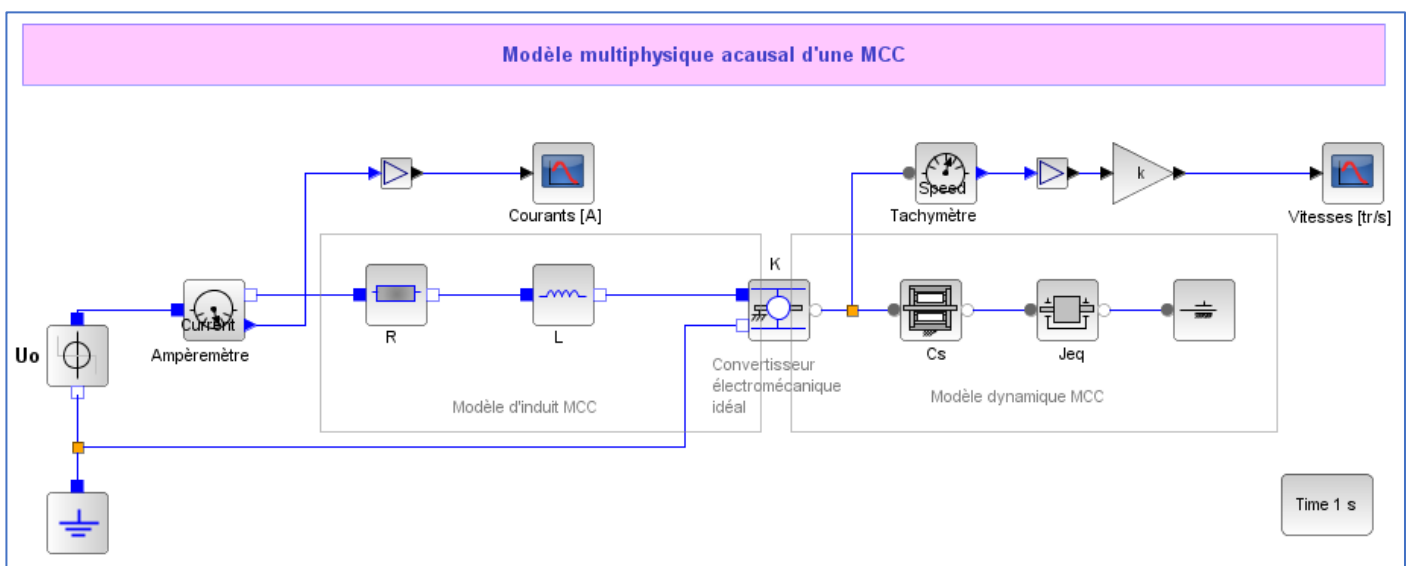
- CPGE
- SIMM

Assurez-vous donc dès le démarrage du logiciel que ces librairies sont bien chargées en ligne de commande, si tel n'est pas le cas le signaler à votre professeur.

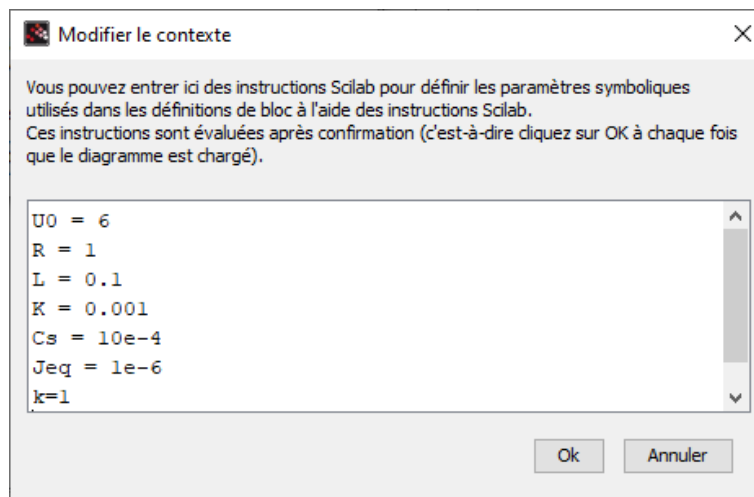
4.1. Etablissement du modèle

4.1.1. Modèle et contexte

Le modèle à établir est le suivant :



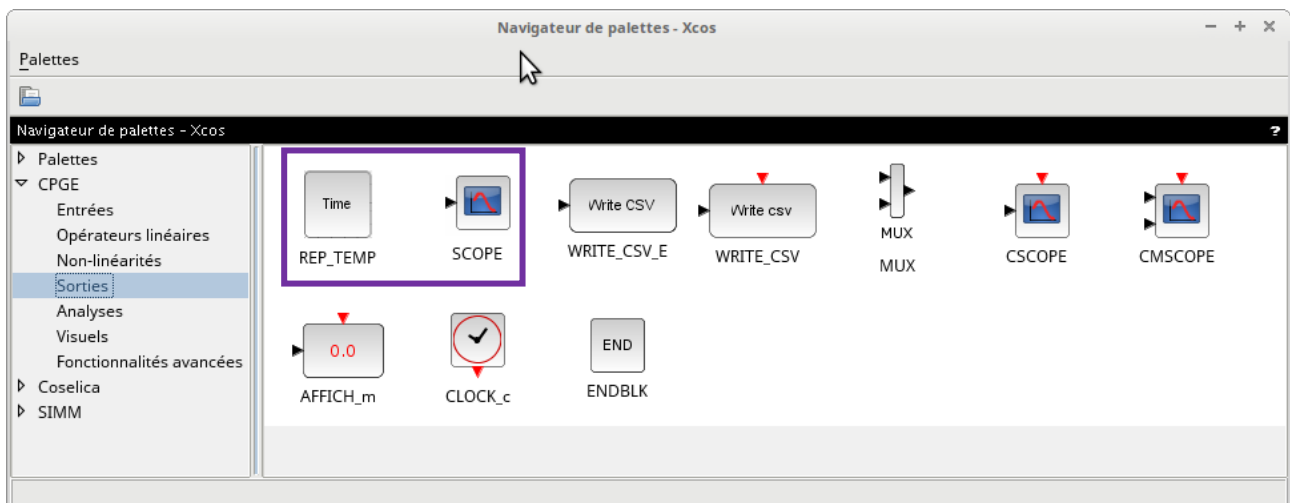
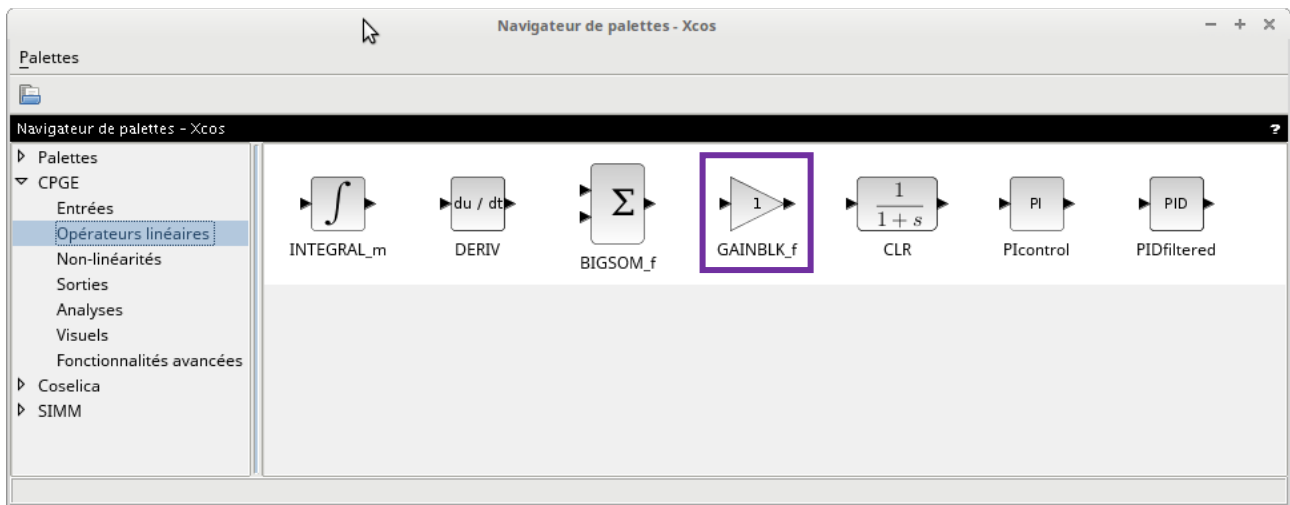
Avec le contexte suivant :



Attention : de nombreux textes ont été ajoutés sur le modèle fourni afin d'illustrer au mieux le rôle de chaque bloc, mais vous ne les aurez pas par défaut. En particulier, **les paramètres** du modèle sont écrits à côté de chaque bloc concerné (et dans le bloc de gain), mais ils **doivent être renseignés dans les blocs eux-même** !

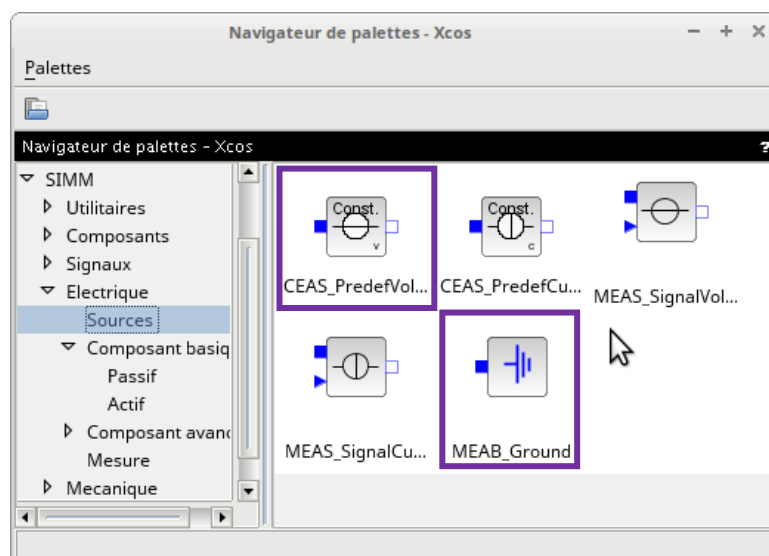
Vous trouverez les blocs à placer pages suivantes.

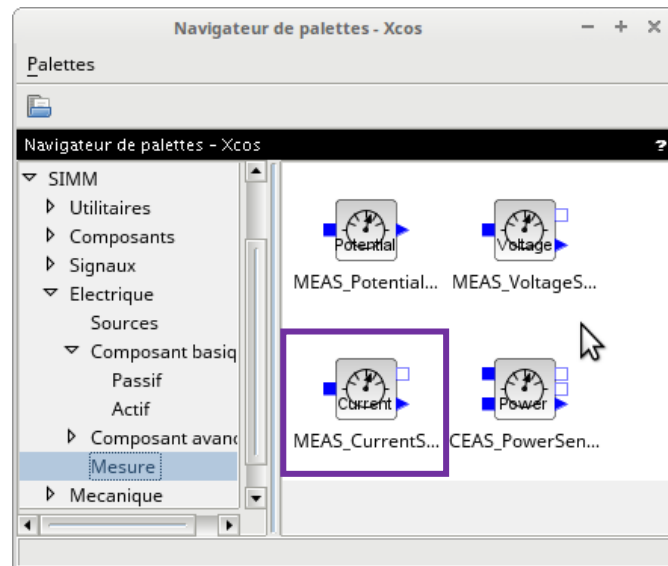
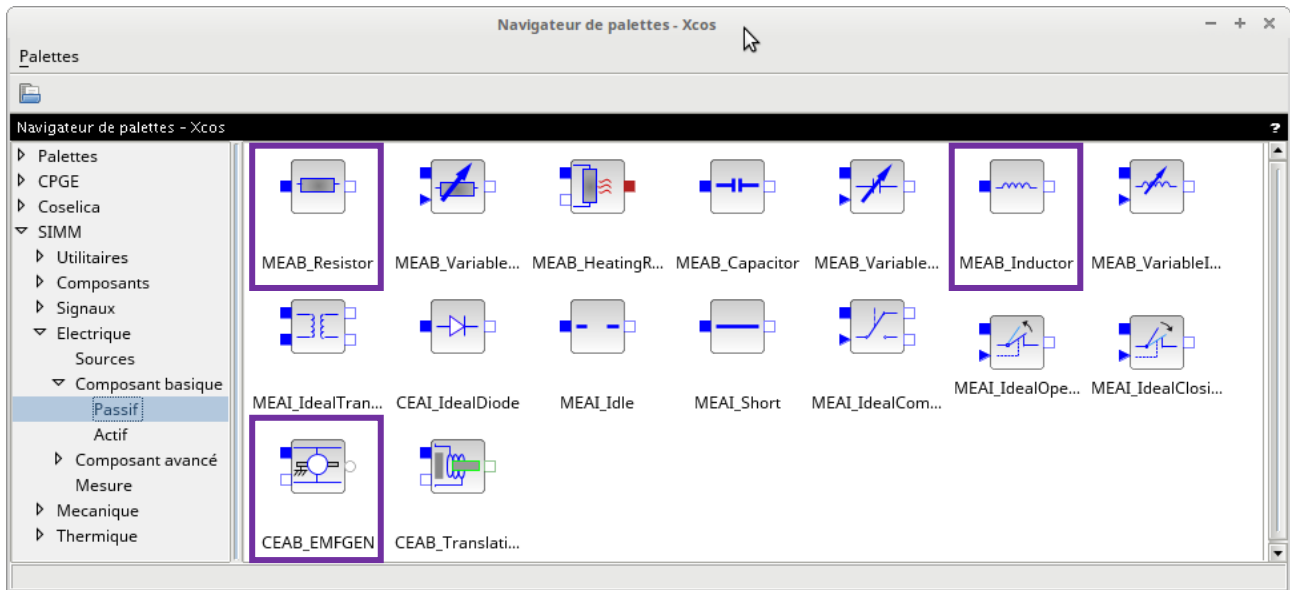
4.1.2. Librairie CPGE



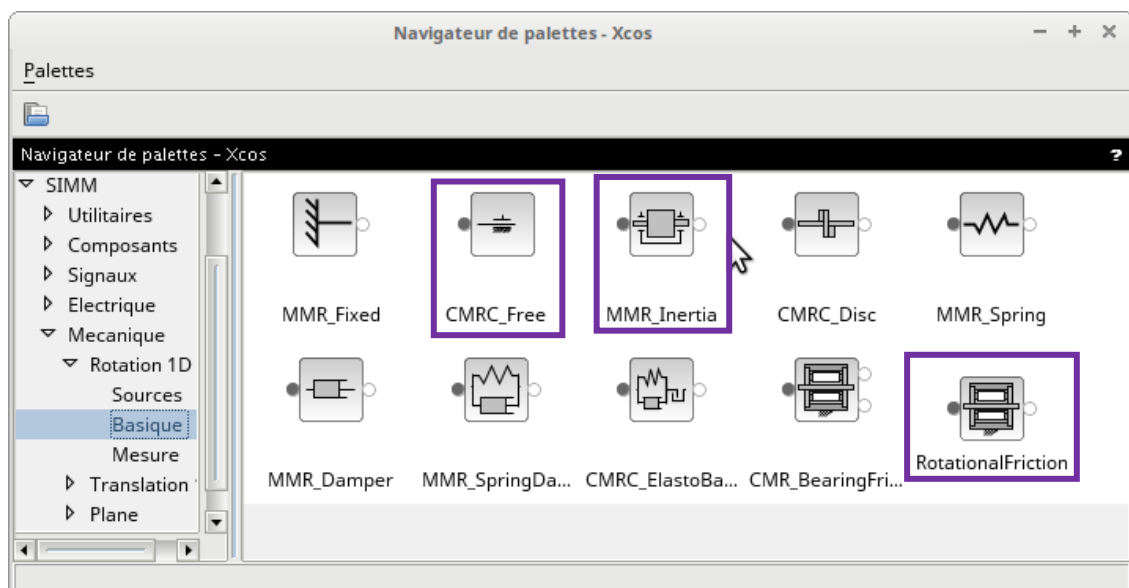
4.1.3. Librairie SIMM

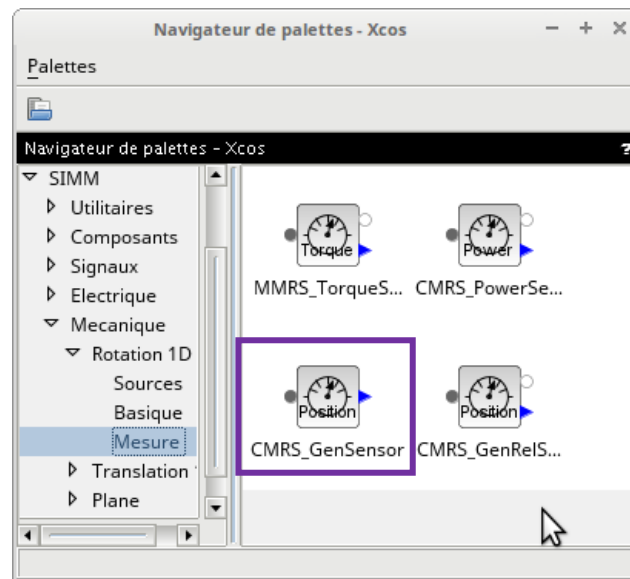
□ Composants électriques :



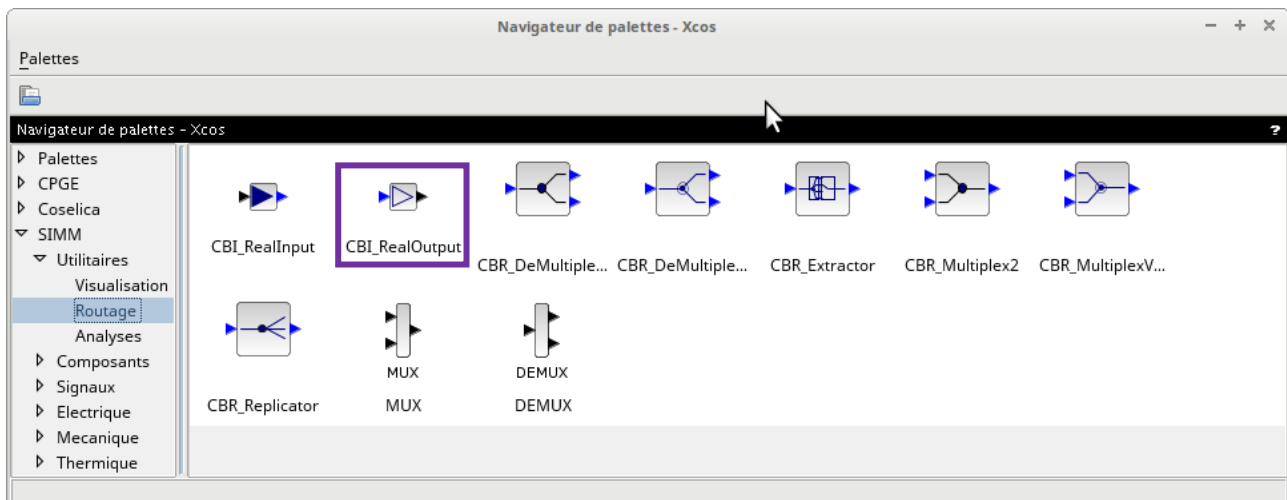


❑ **Composants mécaniques :**





□ Routage entre domaine multiphysique et schéma-blocs classiques :



4.2. Validation du modèle

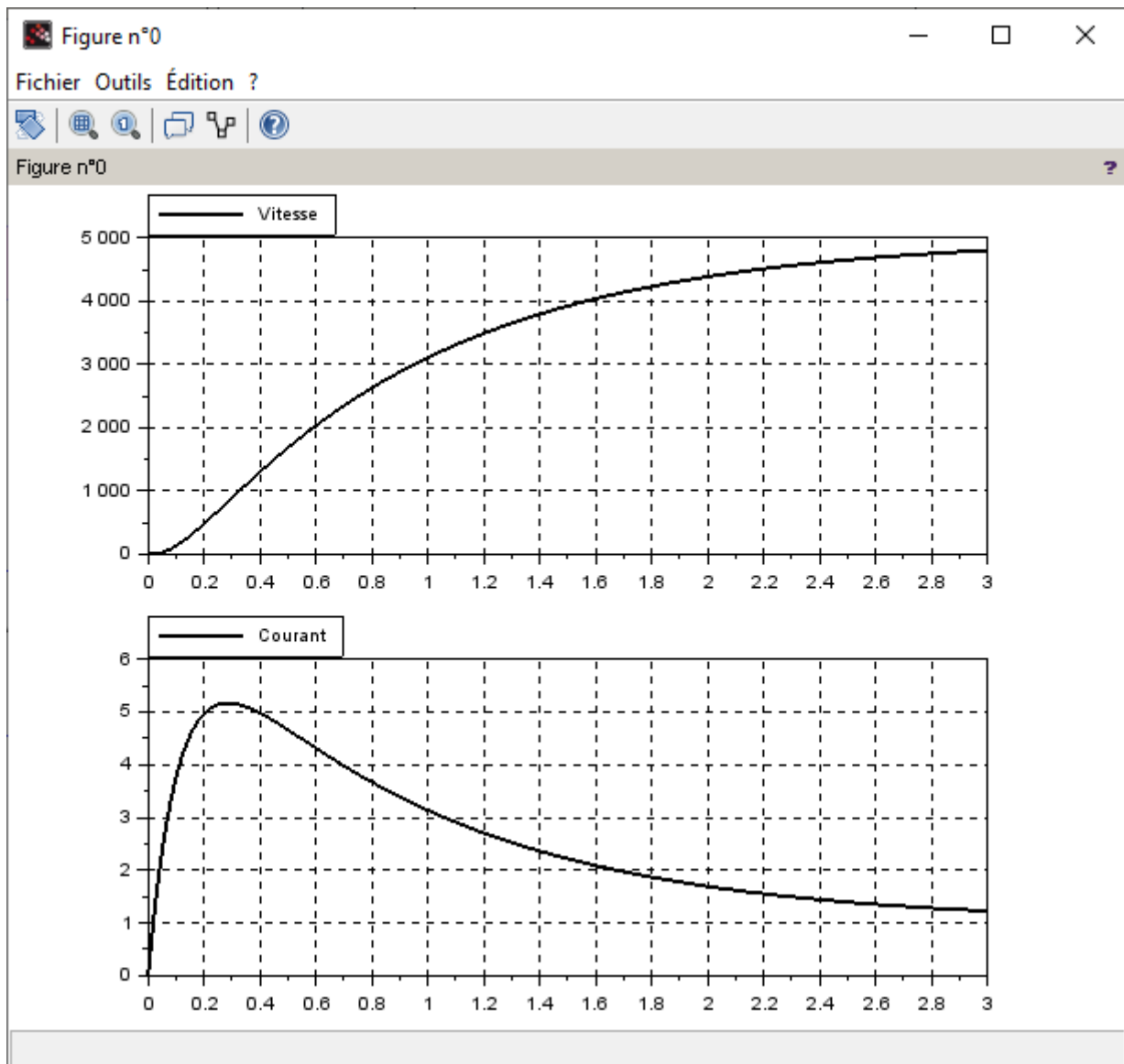
Une fois votre modèle élaboré, avec votre contexte renseigné des mêmes valeurs que celles données (qui sont totalement arbitraires dans un premier temps, et qu'il faudra modifier suite à l'analyse et aux expérimentations), **la simulation devrait vous donner les résultats page suivante.**

Si tel n'est pas le cas, vérifier tous vos blocs et les paramètres renseignés : en particulier, le bloc de friction permet de modéliser des frottements secs et visqueux, et ici on ne prend en considération que les frottements secs (les frottements visqueux sont donc laissés à 0).

Une fois votre modèle validé, effectuer le travail suivant :

Question 1 : donner la valeur de k pour que la vitesse affichée soit bien exprimée en tr/s (le capteur de vitesse fournissant une mesure en unités S.I.).

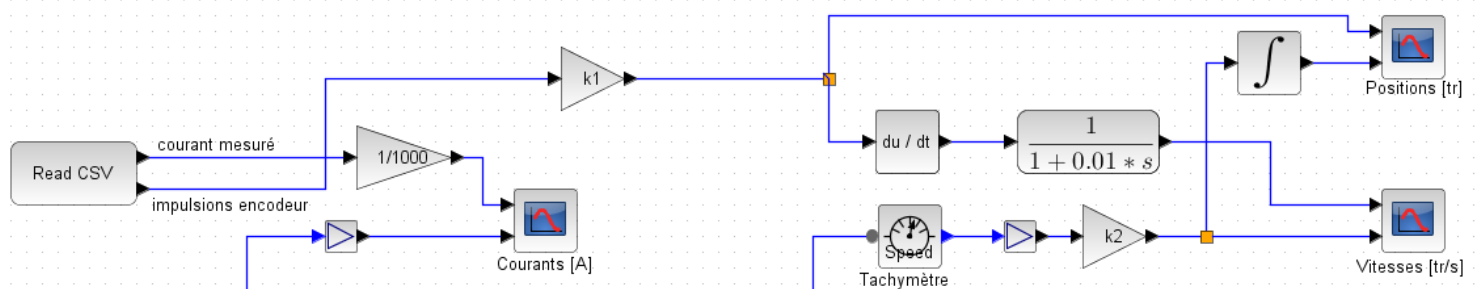
Question 2 : donner alors les valeurs finales du courant (en A) et de la vitesse obtenus (en tr/s). Vous préciserez les conditions de simulation (durée de simulation et temps de mesure).



4.3. Intégration des résultats expérimentaux

Une fois votre modèle validé, il reste à permettre la superposition des résultats simulés avec ceux issus des résultats expérimentaux.

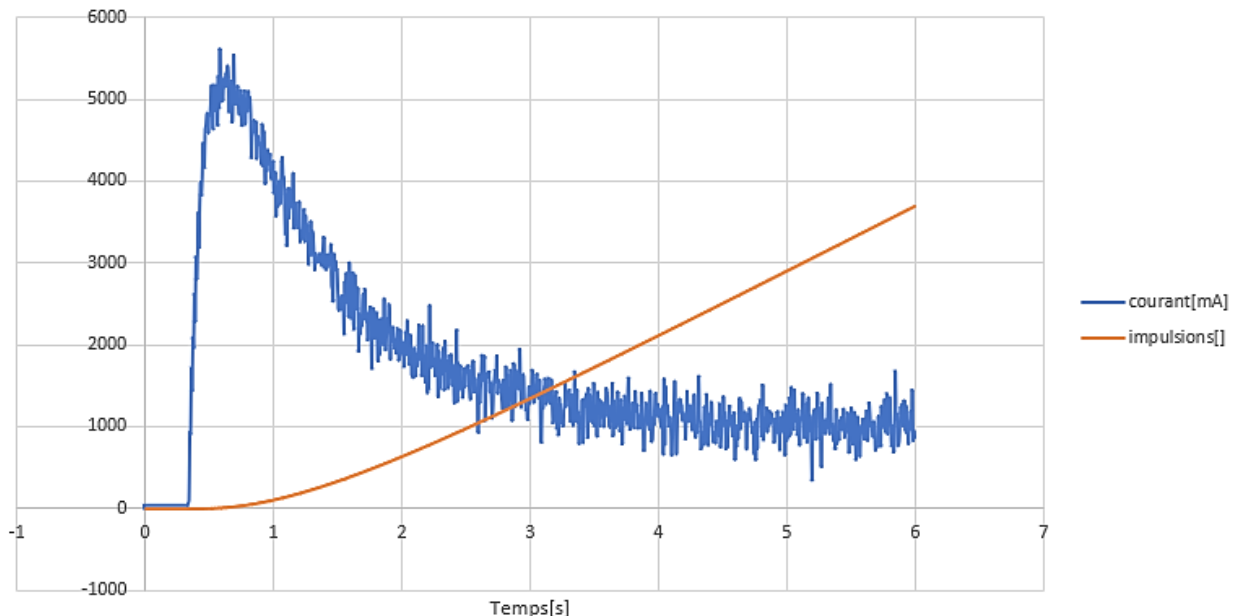
Les mesures se faisant sur la position (exprimées en nombre d'impulsions issues de l'encodeur) et non sur la vitesse directement, on souhaite pouvoir comparer les deux grandeurs cinématiques (position et vitesse) ainsi que les courants de la façon suivante :



(les blocs supplémentaires nécessaires se situent dans les répertoires "Entrées" et "Opérateurs linéaires" du module CPGE).

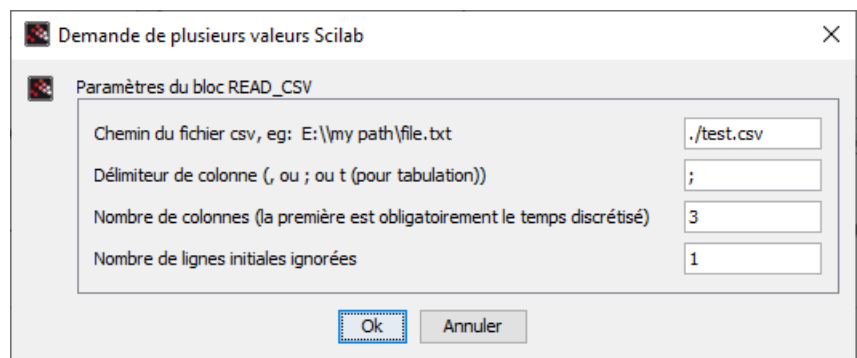
Question 3 : sachant que la position doit être affichée en tours, quelle est la signification du gain k_1 , multipliant les mesures issues de l'encodeur du moteur (discutez-en éventuellement avec l'expérimentateur).

Afin de valider la modification effectuée, et dans l'attente des résultats, on propose de tester le fichier « *test.csv* », comprenant les résultats expérimentaux de la réponse indicielle du moteur dont les caractéristiques sont celles correspondant au contexte actuel, dont l'encodeur génère **4 impulsions par tour**, et dont les relevés sont les suivants :



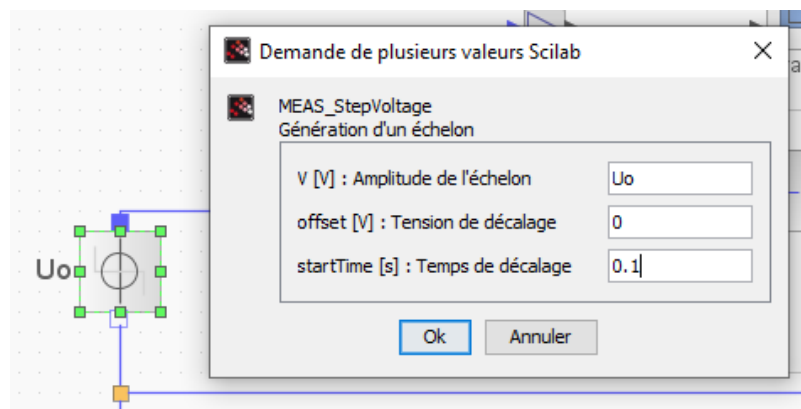
Travail demandé :

1. Renseigner le bloc "Read CSV" de la manière suivante (le fichier *test.csv* devra se situer dans le même dossier que votre modèle) :
2. Renseigner la valeur de gain k_1 correspondant à l'encodeur du moteur.
3. Régler enfin le décalage temporel en retardant l'échelon de tension U_0 du retard estimé (à déterminer donc !!), dans les paramètres du bloc.
4. Lancer la simulation.



Si votre modèle est correctement paramétré, vous devriez obtenir des courbes parfaitement superposées !

Votre modèle est fin prêt !

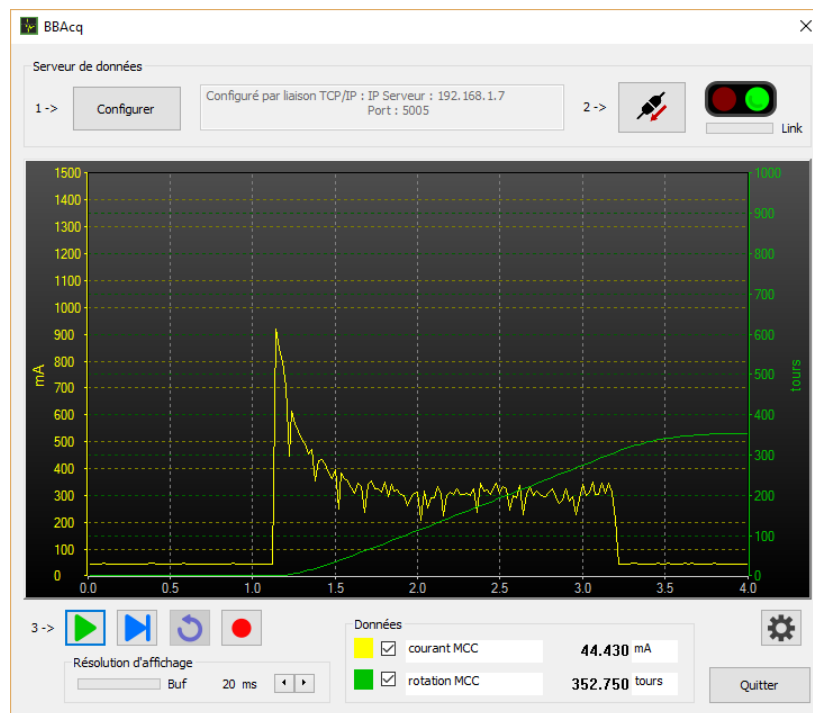
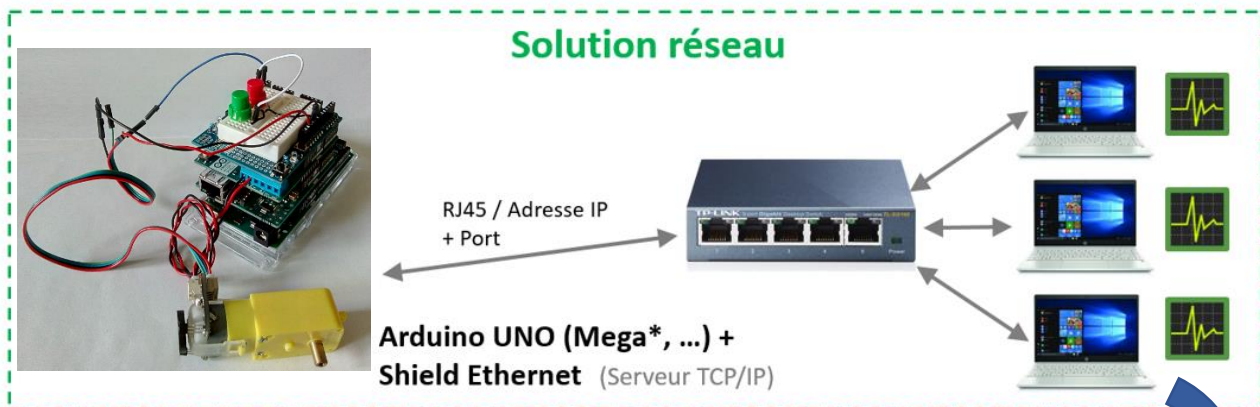


5. Expérimentations

5.1. Présentation de la maquette expérimentale

La maquette utilisée pour l'expérimentations des moteurs est basée sur le **système d'acquisition BagBox** (pour Baggio Box, car c'est une conception maison...) consistant en :

- la connexion du moteur et de son encodeur à une carte Arduino (Mega) au moyen d'une carte de puissance *Motor Shield* ;
- la transmission des données acquises par la carte Arduino sur le réseau local au moyen d'une carte *Ethernet Shield* ;
- La récupération et l'exploitation des données au moyen de l'interface **BBAcq** depuis n'importe quel poste connecté au réseau local.



5.2. Installation de l'interface d'acquisition BBAcq



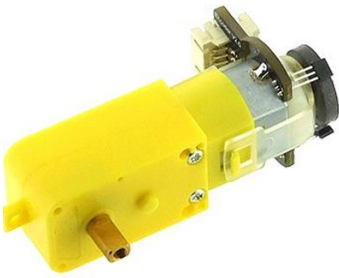

Si le logiciel Bbacq n'est pas installé sur votre poste, récupérez le fichier d'installation « *BBAcqSetup_x64.msi* » depuis le serveur d'activité et lancez l'installation. Aucune modification n'est à effectuer durant celle-ci, contentez-vous de cliquer sur « Suivant » à chaque étape.

5.3. Prise en main de l'interface BBAcq



Toutes les explications liées à l'utilisation de l'interface sont disponibles dans le fichier « **Interface d'acquisition BBAcq.pdf** ».

Seules deux maquettes, une pour chaque kit motoréducteur, sont disponibles, dont les adresses IP des cartes Arduino sont les suivantes :

Kit Motoréducteur	Adresse IP du serveur
FIT0450 	172.16.202.200
WT341 	172.16.202.210

Le port est le 5005 (celui par défaut) et reste donc inchangé.

Les mesures pourront donc s'effectuer sur l'un ou l'autre des motoréducteurs (plouf plouf), voire si le temps vous le permet sur les deux.

Attention : Quand vous avez la main sur une maquette, n'oubliez-pas une fois les mesures finies de vous déconnecter du serveur pour laisser la main aux autres groupes.

Il faudra peut-être vous armer de patience si les deux moteurs sont en train d'être expérimentés par un autre groupe (profitez-en pour offrir votre aide à vos collaborateurs).

Travail demandé :

1. **Ouvrir l'interface d'acquisition.**
2. **Configurer la liaison serveur TCP/IP** (voir « Liaison serveur TCP/IP » dans dossier technique) correspondant à la maquette choisie pour **établir une connexion avec le système.**
3. **Vérifier** que **l'affichage temps-réel** des données s'effectue correctement (voir « Affichage en temps-réel » dans dossier technique).
4. **Charger le fichier « config_MCC.ini »** dans les paramètres de l'interface (voir « Formatage des données » dans dossier technique).
5. À deux (l'un face au système, l'autre utilisant l'interface), **prendre en main le système par différentes manipulations :**
 - sur les deux boutons poussoirs disponibles sur le système (RAZ et GO/STOP) ;
 - en jouant avec les boutons de lecture de l'affichage (voir « Options de lecture » dans dossier technique).

5.4. Expérimentations

5.4.1. Détermination de la résolution de l'encodeur

Pour mieux comprendre les signaux générés par l'encodeur, vous trouverez en [Annexe B](#) des explications sur le fonctionnement des capteurs à effet Hall.




Question 1 : déterminer le nombre d'impulsions par tour que mesure votre encodeur. On pourra pour cela (**pour chaque mesure ne pas oublier de faire une RAZ**) :

- ☐ Effectuer à la main plusieurs tours en sortie du réducteur et calculer le nombre d'impulsions par tour moteur en appliquant le rapport de réduction du réducteur ;
- ☐ Vérifier le résultat obtenu en effectuant « délicatement » un tour moteur (côté encodeur).

Question 2 : en déduire la précision de ce capteur en position de l'arbre de sortie du moteur (en °). Que devient cette précision pour l'arbre de sortie du réducteur ?

5.4.2. Réponse indicielle expérimentale

Travail demandé :

1.  **En mode « Single Shot »** (voir le dossier technique, chapitre « Options de lecture » pour de plus amples explications), **effectuer l'acquisition des mesures obtenues lors d'un échelon de tension** (dont le début devra être effectué juste après l'appui sur le bouton « Single Shot »). Des exemples de relevés attendus sont donnés [ici](#) et [là](#), si nécessaire recommencer la procédure pour obtenir des résultats corrects.
2.  Une fois l'acquisition correctement effectuée, **ouvrir la fenêtre de traitement des données**.
3.  Avant toute manipulation, **sauvegarder vos données**.
4. **Traiter les données** en impulsion **pour obtenir l'information de vitesse** (en impulsions/s) filtrée (les illustrations du dossier technique peuvent vous être utiles...).
5. **Répondre aux questions ci-dessous**.

Question 3 : en exploitant les relevés temporels obtenus, déterminer les mesures suivantes (faites appel à l'analyseur au besoin) :

- ☐ I_0 , le courant en régime permanent ;
- ☐ I_{max} , le courant maximal à rotor bloqué ,
- ☐ Ω_0 , la vitesse de rotation en régime permanent ;
- ☐ τ_{em} , la constante de temps électromécanique ;
- ☐ τ_e , la constante de temps électrique (si possible).

Question 4 : en déduire, avec l'aide de l'analyseur, les paramètres du modèle de la MCC et les fournir au modélisateur, ainsi qu'une copie du fichier .csv sauvegardé, dont on n'aura conservé que les colonnes temps, courant et impulsions.

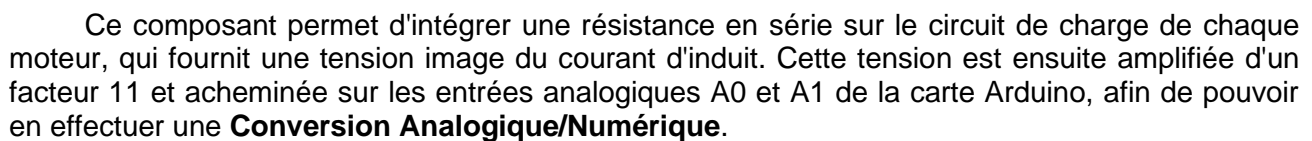
6. Synthèse des résultats

Question 1 : mettre les premiers résultats superposés du réel et du simulé dans votre compte-rendu, pour les courbes de courant, de vitesse et de position.

Question 2 : à l'aide de l'analyse théorique effectuée, raffiner si possible le modèle afin de réduire les écarts éventuels en identifiant les paramètres sur lesquels agir pour effectuer vos modifications. Décrire ces éventuels ajustements et mettre les derniers résultats obtenus après modification.

Question 3 : expliquer, justifier les écarts résiduels en les quantifiant au besoin.

La carte Motor Shield utilise un **L298P**, qui contient quatre cellules de commutation bidirectionnelles en courant (voir cours sur les convertisseurs statiques), et permet de piloter deux moteurs indépendamment dans les 4 quadrants de fonctionnement (configuration en 2 hacheurs réversibles en courant et tension).



et que

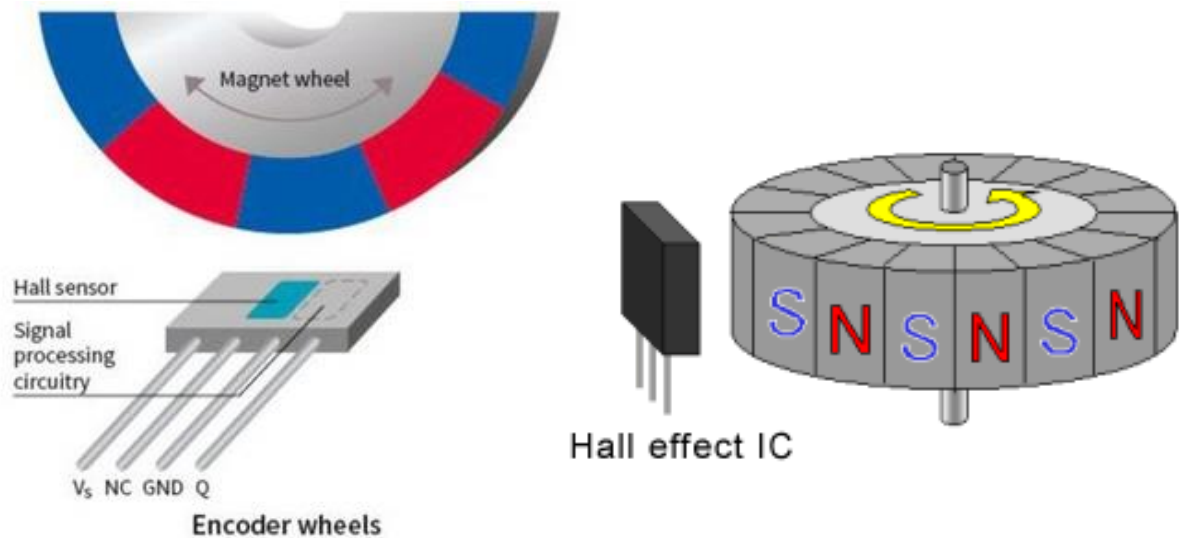
$$u_{A1} = 11 \cdot u_{sense} = 11 \times 0,15 \cdot i_{mot}$$

on en déduit que

Page 19 / 20

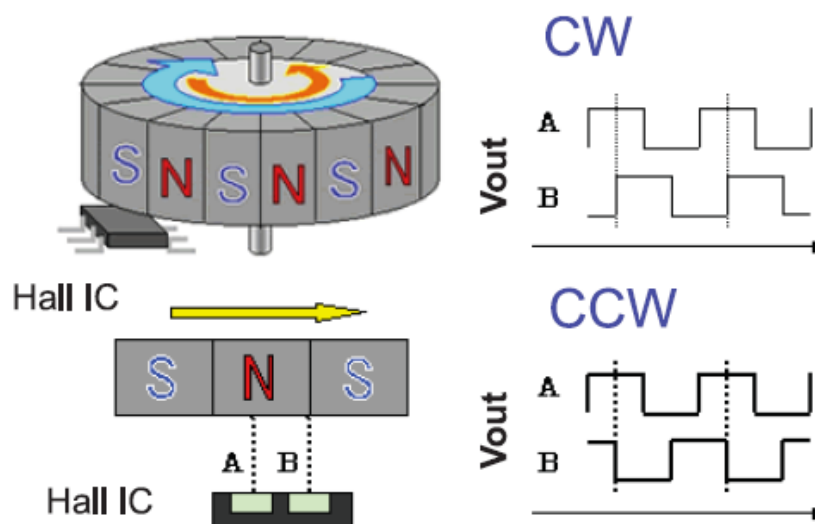
8. Annexe B : encodeur à capteurs à effet Hall

Les encodeurs des moteurs sont des **capteurs à effet Hall**, composant générant un signal binaire en sortie dépendant de la polarité du champ magnétique proche.



Un seul capteur permet donc, en comptant le nombre de fronts ou d'impulsions générées, d'obtenir une estimation de la vitesse (par différence finie temporelle). En revanche il ne permet pas de distinguer le sens de rotation, ni d'évaluer de manière fiable la position, l'incrément du compteur s'effectuant quel que soit le sens de rotation.

Pour obtenir une information de position et une mesure du sens de rotation, il suffit alors de disposer un deuxième capteur à effet Hall à 1/2 pôle du premier par rapport au disque, et d'exploiter utilement les deux signaux obtenus (en quadrature de phase). Dans ce TP, comme l'on n'effectue des mesures que dans un seul sens de rotation, un seul encodeur sur les deux disponibles est utilisé, ou une variable *pulse* est incrémentée à chaque front détecté (changement d'état de 0 vers 1 ou de 1 vers 0).



Remarque : en toute rigueur une impulsion correspond à un changement d'état de manière temporaire et courte, et donc à deux fronts montants. Néanmoins le terme impulsions est gardé pour la suite car si l'on exploitait les deux signaux des encodeurs on obtiendrait bien autant d'impulsions que de fronts sur l'un des deux signaux.