

école d'ingénieurs du canton de Vaud (*eivd*)
Département d'électricité et d'informatique
institut d'Automatisation industrielle (iAi)

Introduction au logiciel MATLAB



Michel ETIQUE, mars 2002, Yverdon-les-Bains

Table des matières

1	Introduction	4
2	Méthode de travail	7
2.1	Edition et sauvegarde des fichiers MATLAB	7
2.1.1	Editeur PFE	7
2.2	Aide en ligne	7
2.3	Création de fichiers de commandes et de fonctions utilisateur . . .	8
2.3.1	Fichiers de commande ("script files")	8
2.3.2	Fonctions	8
2.4	Sauvegarde de données sur disque	9
2.4.1	Répertoires de sauvegarde : D :\USERS et compte EINET .	10
3	Les bases de MATLAB	11
3.1	Création et calcul de vecteurs et matrices	11
3.1.1	Vecteurs	11
3.1.2	Matrices	11
3.1.3	Construction de matrices particulières	13
3.1.4	Nombres complexes	14
3.2	Opérations sur les tableaux	14
3.3	Représentation graphique 2D	15
3.3.1	Exemple	16
4	Analyse de systèmes dynamiques linéaires à l'aide de la boîte à outils control systems	17
4.1	Introduction de fonctions de transfert	17
4.1.1	Introduction sous forme polynômiale	17
4.1.2	Introduction sous forme de zéros, pôles et gain ("forme d'Evans")	18
4.2	Introduction de modèles d'état	19
4.3	Passage d'un modèle à l'autre	19
4.4	Construction de schémas fonctionnels	20
4.4.1	Fonctions series, cloop	20
4.4.2	Fonction feedback	22
4.5	Calcul et tracé de réponses de systèmes dynamiques linéaires . . .	24
4.5.1	Réponse temporelle	24
4.5.2	Réponse fréquentielle	28
4.6	Analyse des propriétés des systèmes	28
4.7	Calcul affichage des marges de gain et de phase	28
4.8	Tracé du lieu d'Evans	29
4.9	Divers	29

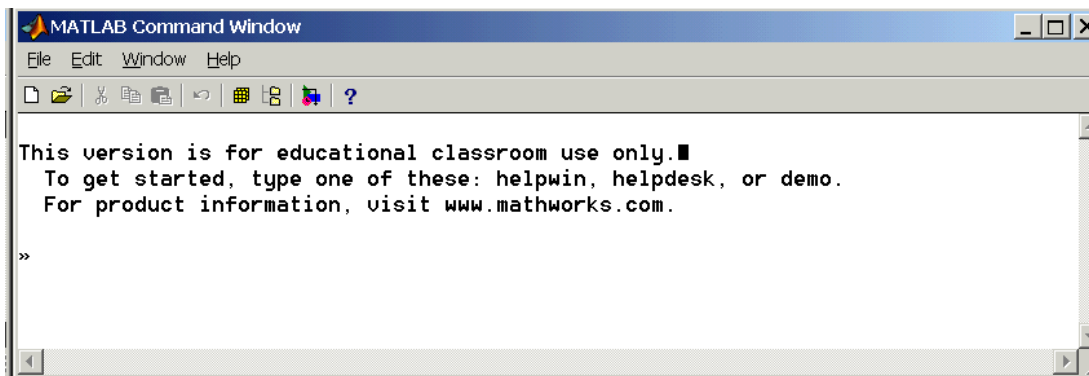
5	Les structures de contrôle du "langage" MATLAB	30
6	Simulation de systèmes dynamiques linéaires et non-linéaires avec la boîte à outils Simulink	31
6.1	Introduction	31
6.2	Exemple introductif : simulation d'un système dynamique linéaire	33
6.2.1	Modélisation	34
6.2.2	Construction du schéma	34
6.2.3	Initialisation des paramètres	39
6.2.4	Simulation	40
6.2.5	Sauvegarde des signaux puis traitement dans l'espace de travail MATLAB	43
6.2.6	Lancement de la simulation à partir de MATLAB	46
6.3	La bibliothèque standard	47
6.3.1	Sources	47
6.3.2	Sinks	48
6.3.3	Discrete	50
6.3.4	Linear	51
6.3.5	Nonlinear	52
6.3.6	Connections	54
6.4	Les S-functions de Simulink (version provisoire)	55
6.4.1	Conventions d'appel des S-functions	55
6.4.2	Exemple	56
6.4.3	Autres fonctionnalités de Simulink	56

1 Introduction

Le présent document a pour but de fournir les bases nécessaires à l'utilisation du logiciel **MATLAB**, dans le cadre des cours, des exercices et du laboratoire de régulation automatique, pour lequel les boîtes à outils Control System et Simulink sont employées. Il ne présente donc ce logiciel que sous l'angle de son utilisation en régulation automatique.

Le logiciel **MATLAB** (*MATrix LABoratory*) est spécialisé dans le domaine du calcul matriciel numérique. Tous les objets définis dans **MATLAB** le sont donc au moyen de vecteurs et de matrices/tableaux de nombres. Un ensemble important d'opérateurs et de fonctions **MATLAB** de base facilitent leur manipulation et des opérations comme par exemple le produit et l'inversion matricielles (`inv`), la transposition (`'`) ou encore le calcul des valeurs propres (`eig`) font partie de la bibliothèque standard. D'autres fonctions servant à la création et à la manipulation de matrices et de tableaux (`diag`, `fliplr`, `flipud`, `rot90`, `rand`, `ones`, `zeros`, `linspace`, `logspace`) sont également disponibles en nombre.

L'environnement **MATLAB** se présente sous la forme d'un espace de travail (*Workspace*), où un interpréteur de commandes exécute des opérations et fonctions **MATLAB**. Les sources de celles-ci sont disponibles, écrites en " langage " **MATLAB**, voire en C ou en Fortran. L'utilisateur peut à sa guise les modifier, mais en s'en inspirant, il peut surtout créer et rajouter ses propres fonctions.



MATLAB offre également plusieurs fonctions destinées à la résolution (numérique) d'équations différentielles linéaires ou non-linéaires par la méthode de Runge - Kutta (`ode23` et `ode45`), l'intégration numérique (`trapz`, `quad` et `quad8`), la recherche des solutions d'équations algébriques (`roots`) ou transcendantes (`fzero`), la création et manipulation de polynômes (`poly`, `polyder`, `polyval`, `conv`, `deconv`), la transformée de Fourier rapide (`fft`, `fft2`, `ifft`).

Des fonctions propres au traitement de données (expérimentales, telles que celles obtenues au laboratoire), comme `min`, `max`, `mean`, `cumsum`, `sort`, `std`, `diff`, ainsi que celles relatives à l'interpolation (`polyfit`, `interp1`) sont autant d'outils très pratiques pour l'ingénieur analysant un problème pratique ou théorique.

L'interface graphique de **MATLAB** est sans conteste l'un des points forts du logiciel et facilite le tracé de courbes et l'obtention de graphiques 2D ou 3D de grande qualité (`plot`, `stairs`, `stem`, `hist`, `mesh`, `surf`, `plot3`). Le module *Handle Graphics* offre la possibilité de contrôler intégralement cette interface, permettant ainsi à l'utilisateur de mettre en forme tous éléments d'un graphique, de créer ses propres menus (`uimenu`) ainsi que des objets graphiques tels que sliders (ascenseurs), boutons, menu surgissants (`uicontrol`) avec une facilité déconcertante.

Le "langage" **MATLAB** contient un minimum de structures de programmation (structure itérative, structure conditionnelle, sous-routine) mais reste très rudimentaire. L'avantage est qu'il est très simple et très rapide à programmer, offrant une grande tolérance (syntaxe simple, pas de définition de types, etc), ce qui permet un gain appréciable en temps de mise au point. L'ingénieur peut par ce moyen être plus efficace dans l'analyse d'un problème, en concentrant ses efforts sur celui-ci et non pas sur l'outil servant à le résoudre. En revanche, **MATLAB** ne convient pas à la programmation d'applications d'une certaine ampleur. Dans ce dernier cas, il est possible, sous certaines conditions, de programmer l'application en C et de l'exécuter à partir l'espace de travail **MATLAB**.

Au logiciel de base s'ajoutent, selon la configuration choisie, les fonctions provenant d'une série de boîtes à outils (*toolbox*) dédiés à des domaines techniques spécifiques, comme

- le traitement de signal (*signal processing toolbox*),
- la régulation automatique (*control system toolbox*),
- l'identification (*system identification toolbox*),
- les réseaux de neurones (*neural networks toolbox*),
- la logique floue (*fuzzy logic toolbox*),
- le calcul symbolique (*symbolic math toolbox*),

et bien d'autres encore. Ces boîtes à outils sont simplement constituées d'un ensemble de fonctions spécialisées programmées à partir des fonctions de base de **MATLAB**, permettant par exemple la synthèse de filtres, le calcul de FFTs, la simulation d'algorithmes flous ou encore le calcul de réponses harmoniques.

Simulink n'est rien d'autre qu'une boîte à outils de **MATLAB** permettant au moyen d'une interface graphique évoluée la construction rapide et aisée ainsi que la simulation de schémas fonctionnels complexes, contenant des systèmes linéaires, non linéaires voire non-stationnaires, y compris des opérateurs logiques, des outils mathématiques d'analyse, etc.

Dans le cadre de la régulation automatique, **MATLAB** constitue avant tout un très puissant outil d'analyse des systèmes dynamiques linéaires, dont on peut très facilement obtenir les propriétés, comme les pôles et zéros (`tf2zp`, `roots`) ou le gain statique (`dcgain`, `ddcgain`) et tracer les réponses de tous types, la réponse impulsionnelle (`impulse`), indicielle (`step`), à un signal quelconque (`lsim`), ou harmonique (`bode`, `nyquist`). **MATLAB** se prête aussi bien à l'analyse des systèmes analogiques ou numériques (`step` et `dstep`, `impulse` et `dimpulse`, `bode` et `dbode`, `lsim` et `dlsim`), sans qu'il soit cependant possible d'étudier des systèmes mixtes analogiques-

numériques. Différentes commandes permettent de construire et d'analyser des systèmes linéaires de structure complexe, formés de multiples blocs connectés tantôt en série, parallèle ou étant contre-réactionnés (*series*, *cloop*, *feedback*, *parallel*, *append*, *connect*, *blkbuild*).

Pour le traitement aisé de systèmes non-linéaires, de même que pour la construction de schémas fonctionnels complexes, on aura à l'évidence intérêt à utiliser la boîte à outils *Simulink*, qui constitue alors un outil idéal.

Incontestablement, **MATLAB** est un formidable outil pour l'ingénieur, y compris pour celui traitant des problèmes pratiques. Avec sa boîte à outils *Simulink*, il est maintenant une référence au niveau mondial, non seulement dans les universités et instituts de recherche, mais aussi dans le milieu industriel.

MATLAB est disponible pour plusieurs plateformes (Windows, Macintosh, Unix, Linux). Les coordonnées du fournisseur pour la Suisse ci-dessous.

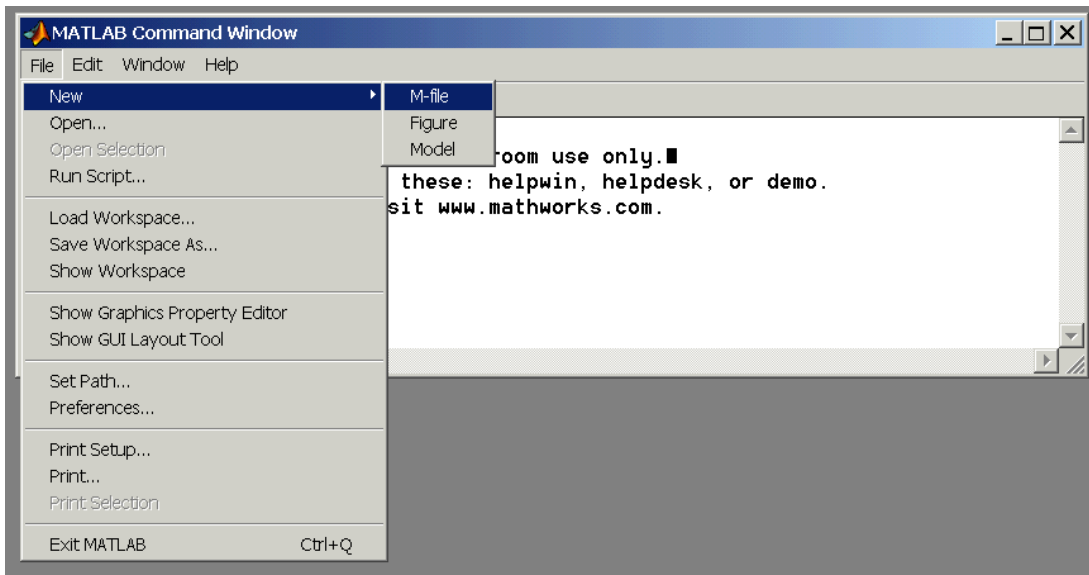
The MathWorks GmbH Schürmattstrasse 6+8 3073 Gümligen	
Téléphone Téléfax	(031) 954.20.16 (031) 954.20.22
Services Internet	http://www.mathworks.com http://www.mathworks.ch ftp.mathworks.com http://www.scientific.de
Autres liens :	http://www.sysquake.com http://www-rocq.inria.fr/scilab/

2 Méthode de travail

2.1 Edition et sauvegarde des fichiers MATLAB

2.1.1 Editeur PFE

Dans un premier temps, on peut se contenter d'introduire ses commandes une à une au niveau de l'espace de travail où elles sont interprétées directement. Cependant, par la suite, il est beaucoup plus pratique d'écrire sa séquence de commandes complète au moyen d'un éditeur, puis de sauver le tout dans un fichier avec l'extension `.M`. Cette séquence pourra alors être exécutée dans MATLAB par simple introduction du nom du fichier. Sur les stations du laboratoire d'Automatique (salle C05), "l'éditeur pour programmeur PFE" est installé et son utilisation est recommandée. On l'appelle soit par son icône à partir du gestionnaire de programmes, soit directement à partir de MATLAB en sélectionnant File-New-M-file.



De cette façon, l'utilisateur peut rajouter ses propres fonctions et se créer rapidement et facilement toute une panoplie d'outils (par exemple, "synthèse automatique d'un régulateur PID par la méthode de Bode"). Les sources de MATLAB étant disponibles pour la plupart, ce n'est pas un problème que de modifier à sa guise l'une ou l'autre des routines, par exemple dans le but d'obtenir un tracé particulier du lieu de Bode.

2.2 Aide en ligne

En plus de l'aide de Windows, une aide en ligne est disponible pour chaque commande de MATLAB. Il suffit d'introduire :

help nom_de_commande

2.3 Création de fichiers de commandes et de fonctions utilisateur

2.3.1 Fichiers de commande ("script files")

Un fichier de commande (*script file*) est un fichier ASCII d'extension **.M** contenant une suite de commandes **MATLAB**. Il être exécuté directement en tapant simplement son nom dans l'espace de travail **MATLAB**.

2.3.2 Fonctions

De nouvelles fonctions peuvent être ajoutées à **MATLAB** par l'utilisateur. Il suffit de créer un fichier de nom

nom_de_fonction.M

contenant les commandes à exécuter et dont l'entête a le format :

function [liste des arguments de sortie] = nom_de_fonction(liste des arguments
d'entrée)

Exemple La fonction suivante convertit la grandeur d'entrée **x** en débibels et la retourne dans **y**.

function [y] = lin2db (x)
y = 20*log10 (x);

Le fichier correspondant est sauvé sous le nom **lin2db.m**, dans un répertoire figurant dans le chemin de recherche de **MATLAB**.

Contrairement aux fichiers de commande, les variables intervenant dans les fonctions sont locales.

Les commentaires documentant les fonctions peuvent être insérés en les faisant précéder du symbole **%**.

Détail pratique intéressant, les premières lignes d'un fichier

nom_de_fichier.m

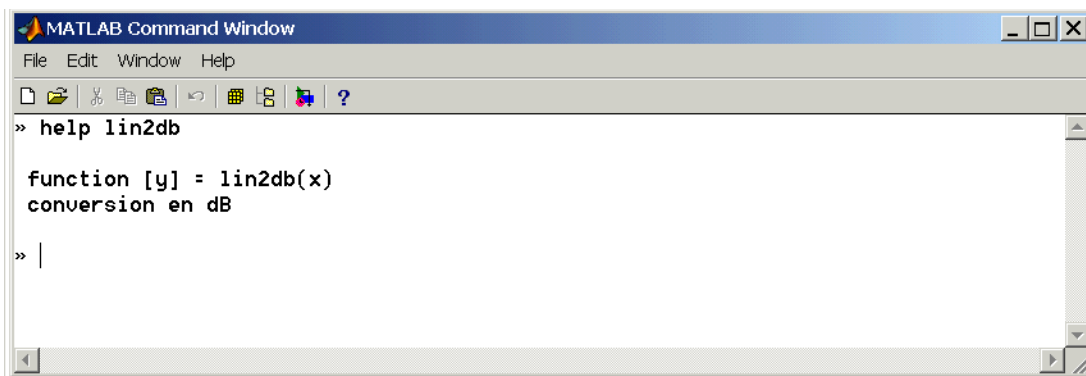
précédées du symbole **%** sont affichées lorsque l'on tape :

help nom_de_fichier

Ceci permet de fournir une aide en ligne pour chaque fonction utilisateur nouvellement créée. Pour la fonction `lin2db`, on documentera par exemple comme suit :

```
function [y] = lin2db(x)
%function [y] = lin2db(x)
%conversion en dB
y = 20*log10(x);
```

En tapant `help lin2db`, on obtiendra alors :



2.4 Sauvegarde de données sur disque

Les variables définies dans l'espace de travail MATLAB peuvent être sauvegardées dans des fichiers ASCII par la commande :

```
save chemin\nom_de_fichier.dat nom_de_variable -ascii
```

Un tel fichier ASCII peut être ultérieurement relu soit par MATLAB (fonction `load`) soit par d'autres programmes (Excel, Word, etc). Dans le premier cas, il est cependant conseillé de sauver directement la variable dans un fichier binaire `*.MAT` de format spécifique à MATLAB :

```
save chemin\nom_de_fichier nom_de_variable
```

La fenêtre graphique peut être soit imprimée directement, soit sauvée dans un fichier, lequel peut être intégré dans un document (menu importation d'image) ou imprimé ultérieurement. Signalons, parmi les différents formats de fichiers disponibles, le format PostScript qui fournit une qualité irréprochable. Par exemple, le sauvetage de la fenêtre graphique courante s'effectue par :

```
print chemin\ nom_de_fichier.eps -deps
```

pour le format PostScript et par

```
print chemin\ nom_de_fichier.wmf -dmeta
```

pour le format Windows Meta File. Auparavant, il faut prendre garde à ce que la fenêtre graphique courante soit bien celle que l'on souhaite imprimer en tapant

```
figure ( numero_de_la_fenetre_a_imprimer )
```

Attention : la commande `print` est très rudimentaire et ne donne aucun message en cas d'échec ou si le fichier existe déjà !

La copie de la fenêtre graphique est également possible par l'intermédiaire du clipboard, ce qui permet par exemple de sauver la fenêtre dans WordPerfect, Word ou PowerPoint (choisir le format WMF plutôt que le bitmap).

2.4.1 Répertoires de sauvegarde : D :\USERS et compte EINET

Il faut indiquer le chemin correspondant à l'endroit où MATLAB trouvera le fichier de commande ou la fonction écrite par l'utilisateur. Dans le cas de la version MATLAB installée sur le réseau du laboratoire d'Automatique de l'eivd, il suffit à l'utilisateur de sauver ses propres fonctions dans le répertoire :

D :\USERS

qui est dans le chemin de recherche de MATLAB. Le disque D : est local et les données qui s'y trouvent peuvent donc être modifiées voire carrément disparaître d'un cours à l'autre. A la fin de sa session de travail, on aura donc intérêt à sauvegarder ses fichiers sur disquette ou son compte EINET. Le document `s:\regulation\divers\connection_EINET.doc` explique la manière de se connecter son disque EINET à partir du domaine iAi.

3 Les bases de MATLAB

3.1 Création et calcul de vecteurs et matrices

3.1.1 Vecteurs

Un vecteur-ligne est introduit de la façon suivante :

```
v = [5, 2, 13, 4]
```

Le vecteur `v` s'affiche alors à l'écran :

```
v =  
5 2 13 4
```

Si l'introduction est terminée par un point-virgule, on évite l'affichage du vecteur `v`. Un vecteur-colonne peut être introduit en remplaçant les virgules par des points-virgules ou des retours de chariot. L'accès aux composantes d'un vecteur s'effectue directement par des commandes du genre :

```
v(3)
```

ce qui donne à l'écran :

```
ans =  
13
```

Si comme dans le cas présent, `v(3)` n'est pas affecté à une variable, par une commande de la forme `x=v(3)`, MATLAB copie d'office le résultat dans la variable système `ans` (*answer*), alors disponible pour le calcul suivant.

Remarque Dans MATLAB, les indices des vecteurs et matrices doivent être des entiers positifs. L'indice zéro n'est donc pas plus admis que les indices négatifs.

3.1.2 Matrices

Une matrice peut être construite de différentes manières :

```
m = [5, 2, 13, 4; 6, 8, 3, 10; 0, 1, 20, 9]
```

et l'affichage devient :

```
m =  
5 2 13 4  
6 8 3 10
```

```
0 1 20 9
```

ou encore, ayant défini préalablement les vecteurs-ligne v1, v2 et v3 :

```
v1 = [5, 2, 13, 4];  
v2 = [6, 8, 3, 10];  
v3 = [0, 1, 20, 9];  
m = [v1; v2; v3]
```

L'accès à un élément de la matrice s'effectue par :

```
m(2,4)
```

et l'on obtient :

```
ans =  
10
```

Le remplacement de 2 par : (deux points) permet d'obtenir toute la colonne 4 :

```
m(:,4)
```

et l'écran affiche le vecteur-colonne :

```
ans =  
4  
10  
9
```

De même, l'affichage d'une sous-matrice s'obtient par :

```
m(2:3,2:4)
```

et l'écran affiche :

```
ans =  
8 3 10  
1 20 9
```

L'accès aux colonnes 2 et 4 de la matrice m se réalise comme suit :

```
m(:, [2, 4])
```

ce qui produit :

```
ans =  
2 4  
8 10  
1 9
```

Parmi les opérations matricielles qui ont une certaine importance pratique, signalons l'opérateur de transposition

```
m'
```

donnant dans le cas de l'exemple

```
ans =  
5 6 0  
2 8 1  
13 3 20  
4 10 9
```

et la fonction `eig` qui calcule les valeurs propres d'une matrice. Soit la matrice carrée 4×4 formée de composantes aléatoires (ici utilisation de la fonction `rand`)

```
A=rand(4,4)  
A =  
0.2190 0.9347 0.0346 0.0077  
0.0470 0.3835 0.0535 0.3834  
0.6789 0.5194 0.5297 0.0668  
0.6793 0.8310 0.6711 0.4175
```

Les valeurs propres (*eigenvalues*) sont :

```
eig(A)  
ans =  
1.4095  
0.1082 + 0.4681i  
0.1082 - 0.4681i  
-0.0763
```

3.1.3 Construction de matrices particulières

Les routines `ones` et `zeros` permettent de construire des matrices dont tous les éléments sont égaux à 1 respectivement à 0. Voir également `eye` (matrice identité), `diag` (matrice diagonale), `linspace` (vecteur dont les composantes sont espacées linéairement entre deux limites) et `logspace` (vecteur dont les composantes sont espacées logarithmiquement entre deux limites).

3.1.4 Nombres complexes

Les vecteurs et matrices peuvent avoir des composantes complexes. Les nombres complexes sont introduits comme suit :

```
x = a + j * b;
```

ou

```
x = a + i * b;
```

L'unité de l'axe imaginaire est donc indifféremment i ou j. Des fonctions sont prévues pour le calcul de la partie réelle (`real(x)`), de la partie imaginaire (`imag(x)`), du module (`abs(x)`), de l'argument (`angle(x)`) et du conjugué complexe (`conj(x)`).

3.2 Opérations sur les tableaux

On rappelle le slogan publicitaire de MATLAB, *"live is to short to spend time with for loops"*, pour mentionner qu'effectivement, la majeure partie des opérations peuvent s'effectuer sans boucles de type `for`. Par exemple, le calcul du sinus cardinal

$$\text{sinc}(\vartheta) = \frac{\sin(\vartheta)}{\vartheta}$$

de l'angle θ pour les valeurs de suivantes

```
theta=linspace(-4*pi,4*pi,100);
```

soit 100 valeurs espacées linéairement entre -4π et $+4\pi$, se fait avantageusement dans MATLAB par

```
sinc = sin(theta)./theta;
```

où le point précédant l'opérateur de division indique qu'il ne s'agit pas d'une opération matricielle, mais d'une opération **élément par élément** sur deux tableaux. Il faut donc bien faire la distinction entre par exemple le **produit matriciel**

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \cdot b_{11} + a_{12} \cdot b_{21} & a_{11} \cdot b_{12} + a_{12} \cdot b_{22} \\ a_{21} \cdot b_{11} + a_{22} \cdot b_{21} & a_{21} \cdot b_{12} + a_{22} \cdot b_{22} \end{bmatrix}$$

et le produit, élément par élément de deux tableaux :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \cdot b_{11} & a_{12} \cdot b_{12} \\ a_{21} \cdot b_{21} & a_{22} \cdot b_{22} \end{bmatrix}$$

Remarque Ici, la fonction `linspace` a été utilisée, une variante étant d'écrire

```
theta=-4*pi:8*pi/(100-1): 4*pi;
```

3.3 Représentation graphique 2D

Plusieurs types de représentations graphiques 2D sont disponibles :

FONCTION	DESCRIPTION
<code>plot(y)</code>	Représente chaque colonne de la matrice <code>y</code> en fonction de l'indice du rang.
<code>plot(x,y)</code> <code>plot(x,cos(x))</code>	Représente les colonnes de <code>y</code> en fonction de celles de <code>x</code> . Il faut que <code>x</code> ait soit une seule colonne, soit autant de colonnes que <code>y</code> , et réciproquement.
<code>plot(t1,y1,t2,y2)</code> <code>plot(t1,y1,' : ',t2,y2,'-')</code> <code>plot(t1,y1,'o',t2,y2,'x')</code>	Représente <code>y1</code> en fonction de <code>t1</code> et <code>y2</code> en fonction de <code>t2</code> (<code>y1</code> et <code>t1</code> doivent avoir le même nombre de lignes, de même que <code>y2</code> et <code>t2</code>)
<code>plot(t,[y1,y2])</code>	Représente les colonnes <code>y1</code> et <code>y2</code> en fonction de <code>t</code> (<code>y1</code> , <code>y2</code> et <code>t</code> doivent avoir le même nombre de lignes)
<code>stairs(y)</code>	Représente chaque élément de <code>y</code> en fonction de son indice. Le tracé est en escaliers, utile pour les réponses de systèmes numériques (pas d'interpolation entre les points représentés)
<code>stem(y)</code>	Représente chaque élément de <code>y</code> en fonction de son indice. Chaque point est représenté par symbole "échantillon", ce qui est utile pour les systèmes numériques.
<code>semilogx(w,20*log10(A))</code>	Représente <code>A</code> (ici en [dB]) en fonction de <code>w</code> , l'échelle étant logarithmique. (<code>A</code> et <code>w</code> doivent avoir le même nombre d'éléments)
<code>semilogx(w,phase)</code>	Représente <code>phase</code> en fonction de <code>w</code> , l'échelle étant logarithmique. (<code>phase</code> et <code>w</code> doivent avoir le même nombre d'éléments)
<code>loglog(x,y)</code>	Représente <code>y</code> en fonction de <code>x</code> , les échelles étant toutes deux logarithmiques. (<code>x</code> et <code>y</code> doivent avoir le même nombre d'éléments)

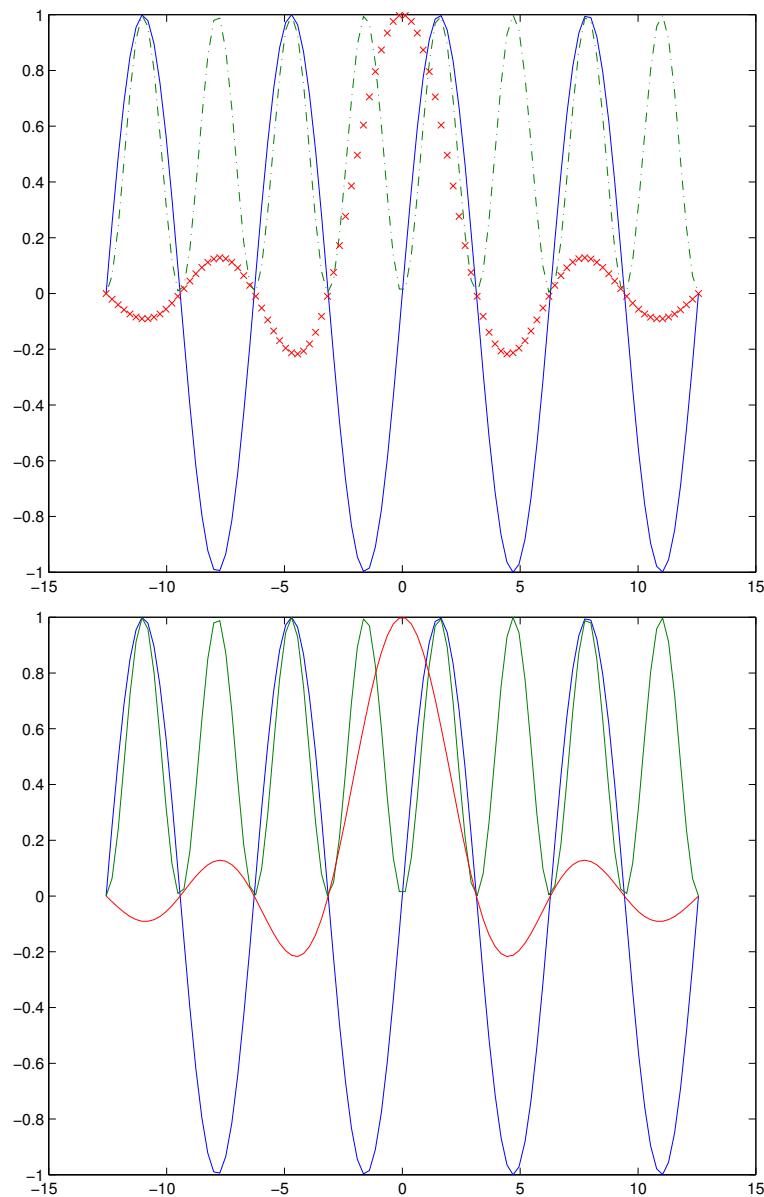
Il est de plus recommandé de consulter la documentation **MATLAB** (ou l'aide en ligne) pour les commandes `axis`, `hold`, et `subplot`, `title`, `xlabel`, `ylabel`, `gtext` ainsi que `figure`. Cette dernière instruction permet de spécifier le numéro de la fenêtre graphique dans laquelle le tracé doit être effectué. L'exécuter juste avant l'une des instructions de traçage active directement la fenêtre graphique qui apparaît alors à l'écran.

3.3.1 Exemple

La suite des instructions ci-dessous calcule et trace le sinus, le sinus carré ainsi que le sinus cardinal de l'angle θ défini à l'aide de l'instruction `linspace` :

```
theta=linspace(-4*pi,4*pi,100);
sinc = sin(theta)./theta;
sinus_2 = sin(theta).^2;
figure(1), plot(theta, sin(theta), theta, sinus_2, '-.', theta, sinc, 'x')
m = [sin(theta)', sinus_2', sinc'];
figure(2), plot(theta, m)
```

Le résultat est le suivant :



4 Analyse de systèmes dynamiques linéaires à l'aide de la boîte à outils **control systems**

4.1 Introduction de fonctions de transfert

4.1.1 Introduction sous forme polynômiale

L'introduction de fonctions de transfert s'effectue en deux temps, les numérateur et dénominateur devant être donnés séparément. Le principe est simple : les numérateur et dénominateur apparaissent sous forme de vecteurs-ligne, les composantes desquels étant les coefficients des puissances décroissantes de s (systèmes analogiques) ou de z (systèmes numériques).

Soit par exemple la fonction de transfert

$$G(s) = 36 \cdot \frac{1 + s \cdot 10}{1 + s \cdot 2 + s^2 \cdot 0.1}$$

Son introduction dans **MATLAB** se fait par les commandes :

```
numG=36*[10,1];
denG=[0.1,2,1];
```

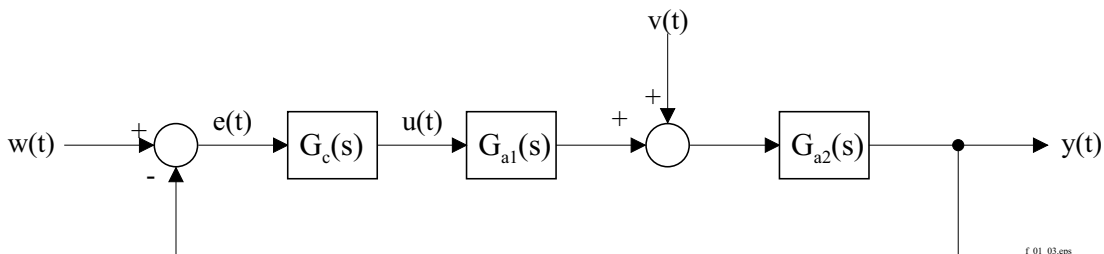
Le coefficient de s^0 (ou z^0 pour les systèmes numériques), **qu'il soit nul ou non**, doit toujours être donné. Ainsi, la fonction de transfert de l'intégrateur

$$G(s) = \frac{2.71828}{s}$$

est introduite sous la forme :

```
numG=2.71828*[1];
denG=[1,0];
```

Les noms donnés aux numérateurs et dénominateurs sont libres. On aura toutefois intérêt à être organisé et rigoureux dans les notations employées ; par exemple, en se référant au schéma fonctionnel universel, en régulation de correspondance ($v(t) = 0$),



on ne saura que trop recommander l'emploi d'une notation semblable à la suivante,

```
numGc=2*[1,20];
denGc=[1,0];
numGa1=1e-3*[1,10];
denGa1=[1,2,0.11];
numGa2=36*[1,0.1];
denGa2=[1,20,10];
```

pour les fonctions de transfert

$$G_c(s) = 2 \cdot \frac{s+20}{s}$$

$$G_{a1}(s) = 0.01 \cdot \frac{s+10}{s^2+2 \cdot s+0.11}$$

$$G_{a2}(s) = 36 \cdot \frac{(s+0.1)}{s^2+20 \cdot s+10}$$

Notons qu'à partir de la version 5.0 de MATLAB, il existe des *objets* fonction de transfert, que l'on peut introduire comme suit (cas de l'exemple ci-dessus) :

```
numGc=2*[1,20];
denGc=[1,0];
Gc=tf(numGc,denGc)
numGa1=1e-3*[1,10];
denGa1=[1,2,0.11];
Ga2=tf(numGa1,denGa2)
numGa2=36*[1,0.1];
denGa2=[1,20,10];
Ga2=tf(numGa2,denGa2)
```

On peut alors calculer sans autre :

```
Go=Gc*Ga1*Ga2;
Gw=Go/(1+Go);
Gv=Ga2/(1+Gc*Ga1*Ga2);
```

4.1.2 Introduction sous forme de zéros, pôles et gain ("forme d'Evans")

Il est également possible d'introduire une fonction de transfert par le biais de ses zéros, pôles et de son facteur d'Evans k . Les zéros et pôles doivent apparaître sous forme de vecteurs-colonne. Soit par exemple la fonction de transfert :

$$\begin{aligned}
 G(s) &= \frac{5.32}{s} \cdot \frac{((s+3)^2 + 7^2)}{(s+11) \cdot ((s+5)^2 + 3^2)} \\
 &= \frac{5.32}{s} \cdot \frac{(s - (-3 + 7j)) \cdot (s - (-3 - 7j))}{(s - (-11)) \cdot (s - (-5 + 3j)) \cdot (s - (-5 - 3j))}
 \end{aligned}$$

La suite de commandes nécessaires est simplement :

```

zG=[-3+j*7,-3-j*7]';
sG=[0,-10,-5+j*3,-5-j*3]';
kG=5.32;

```

Il va sans dire que l'on privilégiera cette forme lorsque les numérateur et dénominateur de la fonction de transfert du système $G(s)$ ou $G(z)$ ne sont pas directement disponibles sous forme de polynômes.

4.2 Introduction de modèles d'état

Si un système est connu sous la forme de ses équations d'état (linéaires),

$$\begin{aligned}
 \frac{d\vec{x}}{dt} &= A \cdot \vec{x} + B \cdot \vec{u} \\
 \vec{y} &= C \cdot \vec{x} + D \cdot \vec{u}
 \end{aligned}$$

il suffit d'indiquer à MATLAB les quatre matrices A, B, C, et D, par exemple :

```

A=[-3,0;0,7];
B=[10,0,1]';
C=[1,2;3,4];
D=[0];

```

4.3 Passage d'un modèle à l'autre

Les pôles et zéros des fonctions de transfert sont obtenus à l'aide de la fonction **tf2zp** (*transfer function to zero pole*) :

```

[zG, sG, kG]=tf2zp(numG, denG);

```

MATLAB place alors les zéros et les pôles dans les vecteurs-colonne **zG** et **sG**, respectivement, et le facteur d'Evans dans la variable **kG**. Les noms **zG**, **sG** et **kG** sont arbitraires. On accède à ces valeurs par exemple en tapant leur nom :

sG

MATLAB affiche :

sG=
-19.4868
-0.5132

Remarque : un polynôme est introduit sous la forme d'un vecteur-ligne \mathbf{v} dont les composantes représentent les coefficients des puissances décroissantes ; ses racines sont obtenues par la fonction `roots(v)`

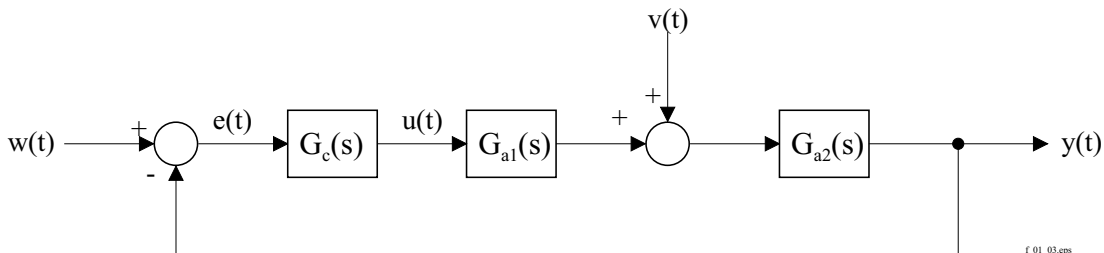
Toute une catégorie de routines permettent de passer d'un modèle à l'autre :

forme polynômiale \rightarrow forme en zéros, pôles et gain	tf2zp	$[zG, sG, kG] = \text{tf2zp}(\text{numG}, \text{denG}) ;$
forme polynômiale \rightarrow modèle d'état	tf2ss	$[AG, BG, CG, DG] = \text{tf2ss}(\text{numG}, \text{denG}) ;$
forme en zéros, pôles et gain \rightarrow forme polynômiale	zp2tf	$[\text{numG}, \text{denG}] = \text{zp2tf}(zG, sG, kG) ;$
forme en zéros, pôles et gain \rightarrow modèle d'état	zp2ss	$[AG, BG, CG, DG] = \text{zp2ss}(zG, sG, kG) ;$
modèle d'état \rightarrow forme polynômiale	ss2tf	$[\text{numG}, \text{denG}] = \text{ss2tf}(AG, BG, CG, DG) ;$
modèle d'état \rightarrow forme en zéros, pôles et gain	ss2zp	$[zG, sG, kG] = \text{ss2zp}(AG, BG, CG, DG) ;$
modèle d'état \rightarrow autre modèle d'état, avec matrice de transformation T	ss2ss	$[AG2, BG2, CG2, DG2] = \text{ss2ss}(AG, BG, CG, DG, T) ;$

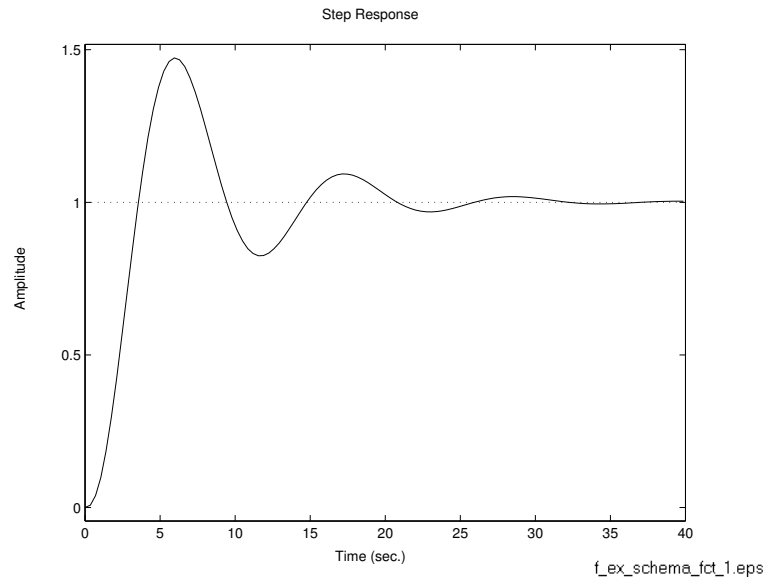
4.4 Construction de schémas fonctionnels

4.4.1 Fonctions series, cloop

Prenons pour exemple le schéma fonctionnel universel, dont on souhaite obtenir les fonctions de transfert en boucle ouverte $G_o(s)$ et en boucle fermée $G_w(s)$. Pour ce faire, faut procéder par étapes, comme l'indique la figure ci-après :



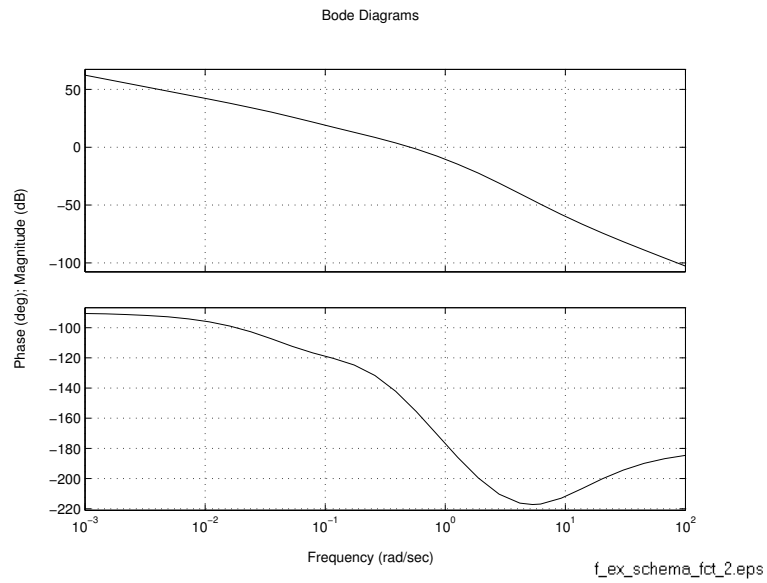
1. Calcul de $G_a(s)$ par la mise en série de G_{a1} et G_{a2} .
On fait usage de la fonction `series` :
`[numGa, denGa]=series (numGa1, denGa1, numGa2, denGa2);`
2. Calcul de $G_o(s)$ par la mise en série de G_c et G_a . On procède de même :
`[numGo, denGo]=series (numGc, denGc, numGa, denGa);`
3. Calcul de $G_w(s)$ par fermeture de la boucle (retour unitaire). On fait usage de la fonction `cloop` comme suit :
`[numGw, denGw]=cloop (numGo, denGo);`
4. La réponse indicielle en boucle fermée peut alors être calculée et tracée par :
`step (numGw, denGw)`



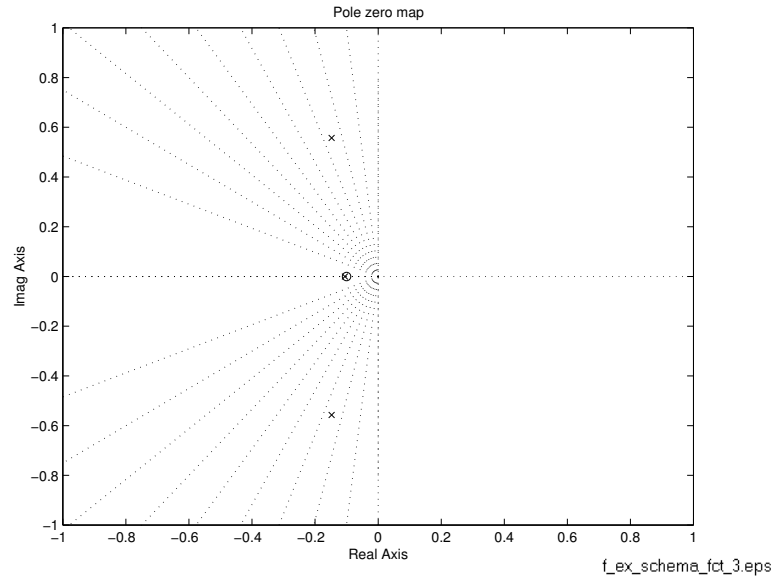
On peut au passage calculer le gain statique (gain DC) de $G_w(s)$.

`dcgain (numGw, denGw)`

5. La réponse harmonique en boucle ouverte peut par exemple aussi être calculée :
`bode (numGo, denGo)`



6. Finalement, on peut afficher la configuration pôle-zéro de $G_w(s)$:
- `pzmap(numGw, denGw)`

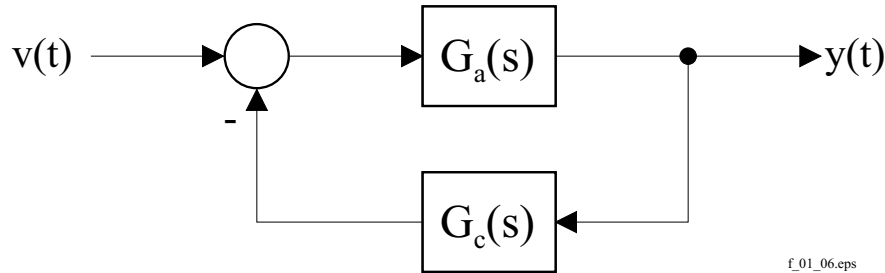


4.4.2 Fonction feedback

La fonction `feedback` est utile pour calculer la fonction de transfert équivalente de systèmes ayant pour schéma fonctionnel la figure ci-dessous, soit :

$$G_v(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{G_a(s)}{1 + G_a(s) \cdot G_a(s)}$$

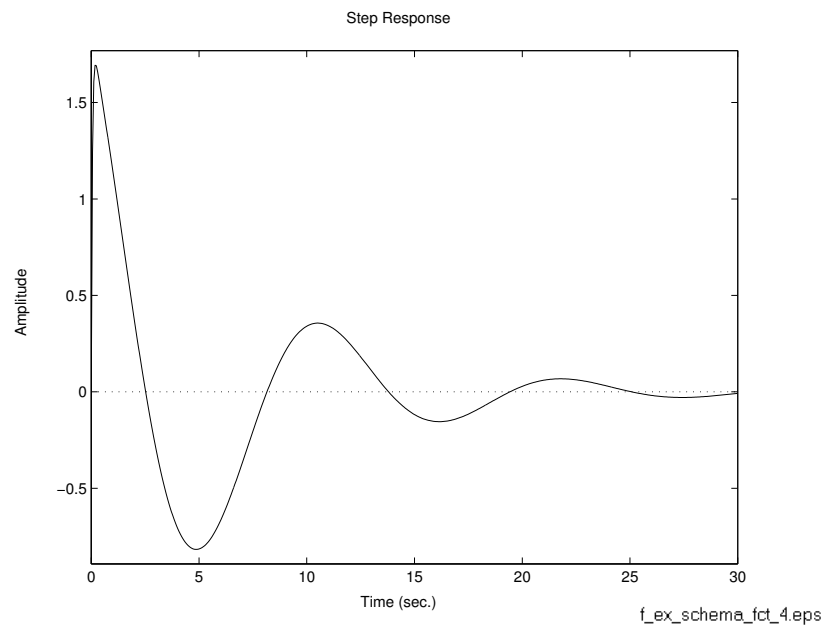
```
[numGv, denGv] = feedback ( numGa, denGa, numGc, denGc, signe );
```



Si le paramètre **signe** n'est pas spécifié ou vaut -1 , la fonction de transfert $G_c(s)$ est en contre-réaction, alors qu'elle est réactionnée pour une valeur de signe égale à 1.

L'exemple ci-dessous calcule le fonction de transfert en régulation de maintien du système asservi précédemment traité.

```
[numG1, denG1] = series ( numGc, denGc, numGa1, denGa1 );  
[numGv, denGv] = feedback ( numGa2, denGa2, numG1, denG1 );
```



4.5 Calcul et tracé de réponses de systèmes dynamiques linéaires

4.5.1 Réponse temporelle

Lorsque qu'aucun argument de sortie n'est spécifié (*lhs, left handside argument*), le calcul et le tracé des réponses sont simultanés.

Les fonctions `impulse`, `step`, `lsim`, et pour les systèmes numériques, `dimpulse`, `dstep`, `dlsim` sont disponibles. Leur signification sont données sur les tables 4.5.1 page suivante et 4.5.1 page 26.

Le tracé correspondant est directement obtenu en tapant les commandes telles que données dans les tableaux ci-dessus.

Les paramètres `t`, `n`, et `w` sont des optionnels et **MATLAB** les détermine lui-même par défaut. Si l'on souhaite les fixer, on peut par exemple le faire selon les indications du tableau 4.5.1 page 26.

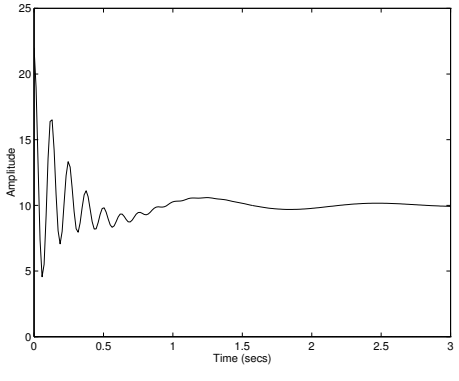
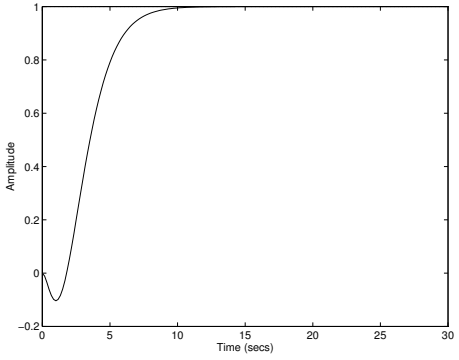
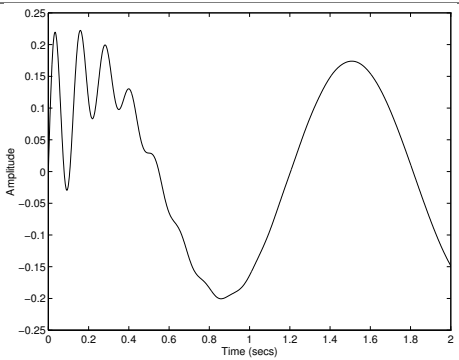
Lors du calcul de la réponse harmonique de systèmes numériques, il convient de spécifier la période d'échantillonnage h .

Il est souvent utile d'effectuer ces calculs de réponse sans tracer celle-ci immédiatement. Dans ce cas, on procède comme ci-dessus en spécifiant toutefois des arguments de sortie dans lesquels **MATLAB** sauvera les résultats de ses calculs :

SYSTEMES ANALOGIQUES	SYSTEMES NUMERIQUES
<code>[y,x,t]=impulse(numG,denG,t);</code>	<code>[y,x]=dimpulse(numH,denH,n);</code>
<code>[y,x,t]=step(numG,denG,t);</code>	<code>[y,x]=dstep(numH,denH,n);</code>
<code>[y,x]=lsim(numG,denG,u,t);</code>	<code>[y,x]=dlsim(numH,denH,u);</code>

`y` est un vecteur-colonne contenant la réponse cherchée et `t` un vecteur-ligne contenant les instants auxquels elle a été calculée. `x` est une matrice contenant l'évolution du vecteur d'état système dynamique. La figure suivante montre le calcul préalable des réponses impulsionnelle et indicielle avant leur tracé à l'aide de la fonction `plot`.

```
[ys,x,t] = step(numGw,denGw);
[yi] = impulse(numGw,denGw,t);
figure
plot(t,[yi,ys])
title('Réponses impulsionnelle et indicielle en boucle fermée')
xlabel('t [s]')
```


SYSTEMES ANALOGIQUES	REPONSE	EXEMPLE
<code>impz(numG,denG,t)</code>	réponse impulsionnelle	
<code>step(numG,denG,t)</code>	réponse indicielle	
<code>lsim(numG,denG,u,t)</code>	réponse à une entrée u quelconque définie par l'utilisateur	
<code>initial(A,B,C,D,x0,t)</code>	réponse du système lorsque ses conditions initiales sont x0	

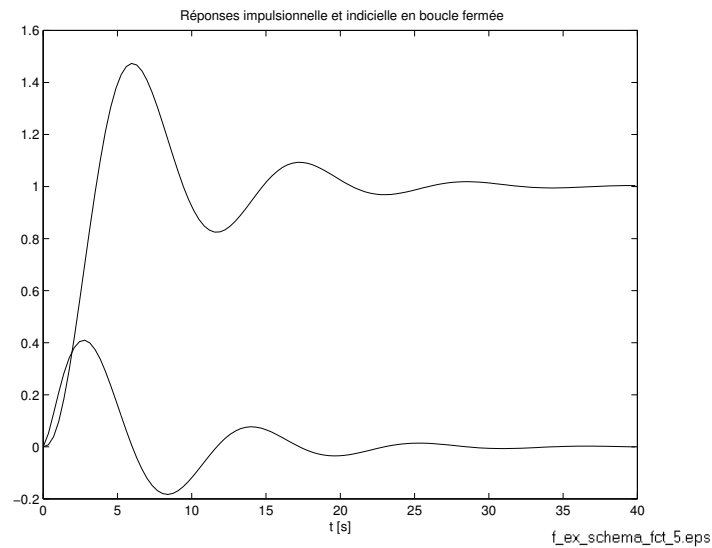
TAB. 1 –

SYSTEMES NUMERIQUES	REPONSE
<code>dimpulse(numH,denH,n)</code>	réponse impulsionnelle
<code>dstep(numH,denH,n)</code>	réponse indicielle
<code>dlsim(numH,denH,u)</code>	réponse à une entrée u quelconque définie par l'utilisateur
<code>dinitial(A,B,C,D,x0,n)</code>	réponse du système lorsque ses conditions initiales sont x_0

TAB. 2 –

PARAMETRE	SIGNIFICATION	EXEMPLE
t	(facultatif) vecteur-ligne de temps, spécifiant les instants où la réponse doit être calculée (ce paramètre est obligatoire si l'on utilise <code>lsim</code>)	<code>t=[0 :0.01 :0.2];</code> ou <code>t=linspace(0,0.2,201);</code> (crée un vecteur temps variant entre 0[s] et 0.2[s] par pas de 0.01[s])
n	(facultatif) nombre d'échantillons désirés	<code>n=10;</code> (seuls les 10 premiers échantillons de la réponse seront affichés)
w	(facultatif) vecteur-ligne de pulsation, spécifiant les pulsations où la réponse doit être calculée	<code>w=logspace(2,5,100);</code> (crée un vecteur pulsation de 100 points espacés logarithmiquement et variant entre 10^2 [rad/s] et 10^5 [rad/s])
u	vecteur-colonne de l'entrée simulée du système (ce paramètre est obligatoire si l'on utilise <code>lsim</code> ou <code>dlsim</code>)	<code>u=1.5*sin(2*pi*10*t)';</code> (crée un vecteur u représentant une entrée sinusoïdale d'amplitude 1.5 et de fréquence 10[Hz]. u est calculé pour chaque instant défini dans le vecteur t , par exemple celui donné ci-dessus)

TAB. 3 –

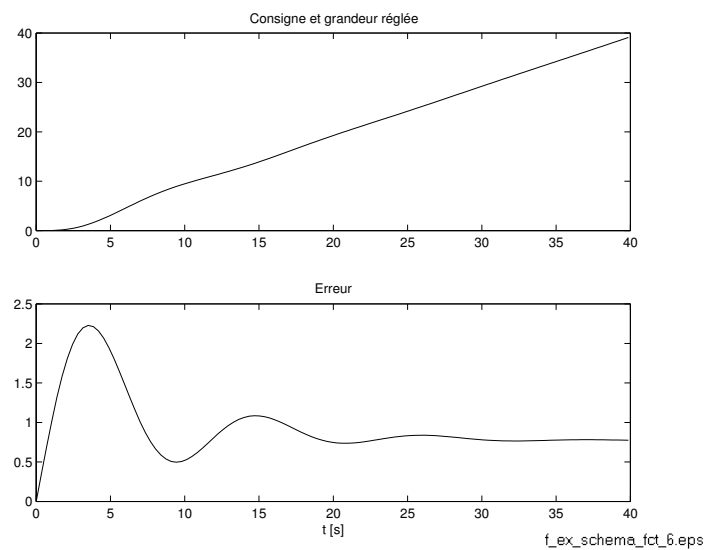


De même, l'exemple suivant montre le tracé de la réponse d'un système asservi à une rampe de consigne, en faisant notamment usage de la fonction `lsim`.

```

wr = t';
yr = lsim(numGw,denGw,wr,t);
figure
subplot(211), plot(t,yr)
title('Consigne et grandeur réglée')
subplot(212), plot(t,wr-yr)
title('Erreur')
xlabel('t [s]')
subplot(111)

```



4.5.2 Réponse fréquentielle

Les fonctions `bode`, `nyquist`, `nichols`, et pour les systèmes numériques, `dbode`, `dnyquist`, `dnychols` sont disponibles. Leur signification est la suivante :

SYSTEMES ANALOGIQUES	SYSTEMES NUMERIQUES
<code>bode(numG,denG,w)</code>	<code>dbode(numH,denH,h,w)</code>

Si les résultats des calculs doivent être sauvegardés en vue d'un traitement ultérieur, on indique également des arguments de sortie :

SYSTEMES ANALOGIQUES	SYSTEMES NUMERIQUES
<code>[A,phi,w]=bode(numG,denG,w)</code>	<code>[A,phi,w]=dbode(numH,denH,h,w)</code>

A et phi sont des vecteurs-colonne contenant respectivement le gain et la phase et w un vecteur-ligne contenant les pulsations correspondantes.

4.6 Analyse des propriétés des systèmes

<code>dcgain(num,den)</code>	Gain statique d'un système analogique.
<code>ddcgain(num,den)</code>	Gain statique d'un système numérique.
<code>damp(den)</code>	Taux d'amortissement ζ , pulsation propre non-amortie ω_n et pôles d'un système analogique ayant den pour dénominateur
<code>ddamp(den)</code>	Taux d'amortissement ζ , pulsation propre non-amortie ω_n et pôles d'un système discret ayant den pour dénominateur.

4.7 Calcul affichage des marges de gain et de phase

<code>[Am,phi_m]=margin(numGo,denGo)</code>	Marges de phase et de gain d'un système analogique.	Si les arguments de sortie ne sont pas spécifiés, trace le lieu de Bode et montre graphiquement la valeur des marges
---	---	--

4.8 Tracé du lieu d'Evans

<code>rlocus(num,den,k)</code>	Trace le lieu d'Evans de la fonction de transfert.	k est une option ; c'est un vecteur-ligne contenant les différentes valeurs du facteur d'Evans pour lesquelles le lieu doit être tracé.
<code>sgrid</code> <code>zgrid</code>	Affiche les courbes équi-amortissement des plans de s et de z respectivement.	A exécuter immédiatement après <code>rlocus</code>
<code>pzmap(num,den)</code>	Graphe la configuration pôles -zéros de la fonction de transfert.	
<code>[k,p]=rlocfind(num,den)</code>	Tracé interactif du lieu d'Evans.	A exécuter directement après <code>rlocus</code> et <code>sgrid</code> ; une croix est alors affichée, que l'on peut déplacer avec la souris sur un point particulier du lieu. En cliquant, on obtient alors dans k le facteur d'Evans correspondant et dans p l'expression du pôle.

4.9 Divers

<code>minreal(num,den)</code>	Force la compensation pôle-zéro.	
<code>printsys(num,den,'s')</code> <code>printsys(num,den,'z')</code>	Affiche les fonctions de transfert comme fractions rationnelles en s ou en z	

5 Les structures de contrôle du "langage" MATLAB

Les structures de contrôle usuelles sont disponibles :

INSTRUCTION	EXEMPLE
<pre>for <i>variable=expression</i> <i>statements</i> end</pre>	<pre>delta_t=0.01 ; for i=1 :1 :21 ; %le pas vaut par défaut 1 y(i)=sin(2*pi*10*(i-1)*delta_t) ; end plot(y)</pre>
<pre>while <i>expression</i> <i>statements</i> end</pre>	<pre>delta_t=0.01 ; i=0 ; while i<21 i=i+1 ; y(i)=sin(2*pi*10*(i-1)*delta_t) ; end</pre>
<pre>if <i>expression</i> <i>statements</i> elseif <i>expression</i> <i>statements</i> else <i>statements</i> end</pre>	<pre>delta_t=0.01 ; i=0 ; if i<21, i=i+1 ; y(i)=sin(2*pi*10*(i-1)*delta_t) ; end</pre>

6 Simulation de systèmes dynamiques linéaires et non-linéaires avec la boîte à outils Simulink

6.1 Introduction

La boîte à outils Simulink est un complément extrêmement puissant à MATLAB. Les contributions de Simulink sont principalement :

1. La construction conviviale de schémas fonctionnels, faite à la souris ;
2. La simulation de systèmes linéaires et surtout non-linéaires, ainsi que de systèmes non-stationnaires ;
3. La simulation de systèmes mixtes analogiques et numériques.

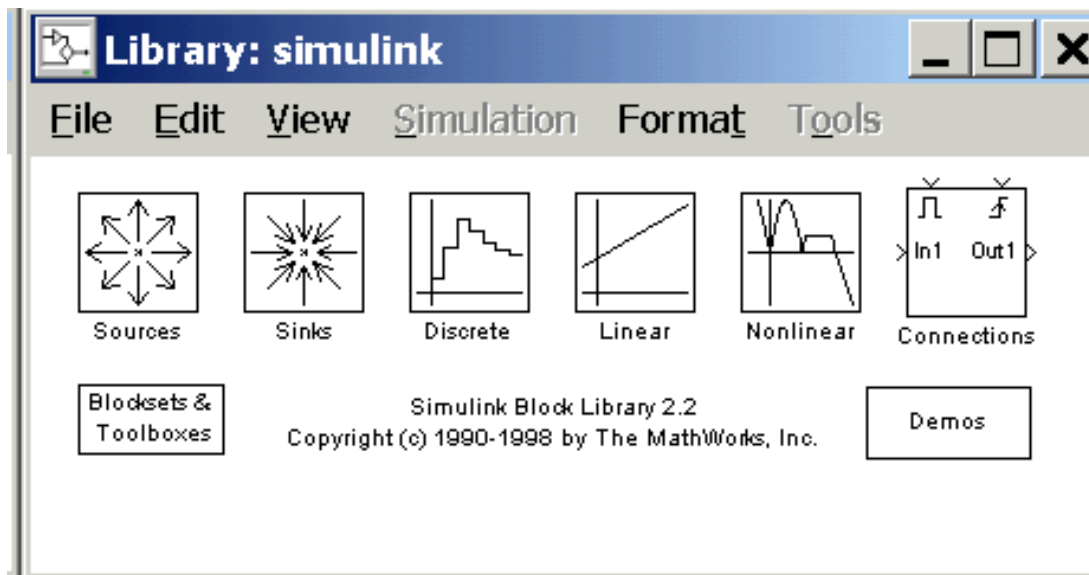


FIG. 1 – Librairie standard de Simulink.

Pour la construction de schémas, le gain de temps se situe au-delà de 10 à 100, car il évite l'utilisation extrêmement fastidieuse des fonctions MATLAB `blkbuild` et `connect`.

Si certains reprochent à MATLAB un certain caractère rébarbatif, Simulink, en plus d'offrir de nouveaux outils très puissants, y remédie complètement en offrant une interface utilisateur extrêmement conviviale. Les deux logiciels restent toutefois complètement liés l'un à l'autre, Simulink n'étant du point de vue hiérarchique qu'une boîte à outils de MATLAB.

L'interface utilisateur de Simulink est l'outil permettant d'introduire directement les schémas fonctionnels de systèmes dynamiques. Bien que théoriquement son usage ne soit pas indispensable, on peut dire qu'il est utilisé dans 90% des

cas de problèmes à résoudre. On y accède à partir l'espace de travail MATLAB par la commande :

simulink

ou en appuyant sur le bouton correspondant de la barre d'outils de la fenêtre de MATLAB.

Une nouvelle fenêtre, appelée **simulink** apparaît. Elle n'est en fait qu'une bibliothèque de blocs fonctionnels standards, réunis ici en sept groupes, fournis avec le logiciel. La figure 1 page précédente montre ces groupes.

On remarque notamment les bibliothèques *Linear* et *Nonlinear* contenant chacune une collection de blocs linéaires et non-linéaires respectivement.

Fidèle à la philosophie de MATLAB, Simulink est ouvert et l'utilisateur peut rajouter ses propres blocs, qu'il peut organiser en une ou plusieurs bibliothèques ([2, et p.4.11 et p.3-19 et ss). Dans ce sens, les possibilités sont quasi illimitées.

Bien que cela ne paraisse pas impératif au premier abord, il se révèle assez tôt indispensable de bien connaître MATLAB pour utiliser Simulink de manière cohérente et organisée, i.e. professionnellement. Dans tous les cas, on a intérêt à utiliser Simulink en forte connection avec MATLAB ; il faut savoir que tous les blocs Simulink peuvent être paramétrés de manière symbolique. Ceci permet de définir les paramètres dans l'espace de travail MATLAB, soit manuellement, soit en exécutant un fichier de type *script*. Dans ce cas, plusieurs fichiers de paramétrisation peuvent être créés et lancés dans MATLAB avant le début de la simulation. La documentation desdits fichiers permet de rationaliser et d'organiser le grand nombre de simulations que l'on peut faire. C'est dans ce genre de situation que les compétences en programmation (organisation, décomposition et analyse du problème, structuration) de l'utilisateur peuvent s'avérer déterminantes.

Des boîtes à outils complémentaires (*Real Time Workshop*, *Matlab C Compiler*) permettent de générer le code C du schéma de simulation, ainsi que le code objet pour des processeurs de signaux (par exemple Texas TMS320C30, système produit par la firme DSPACE). Simulink peut être programmé relativement simplement en C. Dans ce cas, les performances en terme de temps de calcul seront nettement meilleures. Notons que le laboratoire d'Automatique de l'eivd dispose d'une licence du compilateur C/C++ de Watcom version 10.6 supporté par MATLAB/Simulink. Le compilateur Borland C/C++, dont l'école a la licence de site, n'est supporté que par MATLAB et n'apporte aucune contribution quant à la vitesse de calcul. Il faut penser à cette variante de programmation (en C) lorsque le temps de calcul doit être réduit et lorsque l'on souhaite intégrer à la simulation du code C existant. D'autre part, on peut de cette façon profiter de toutes les fonctionnalités Windows et personnaliser son application. Enfin, il faut reconnaître que le fait de pouvoir tester son code source C avec MATLAB/Simulink avant de le livrer et l'exécuter sur l'application réelle permet d'accélérer et facilite considérablement le développement. Il s'agit incontestablement d'un des points

forts de MATLAB/Simulink.

La combinaison de Simulink et d'un système d'acquisition en temps réel est possible mais très délicate et limitée en rapidité, notamment à cause de la lenteur et de la complexité de Windows. Un travail allant dans cette direction a été effectué dans le cadre de l'institut d'Automatisation industrielle de l'eivd.

La programmation graphique, i.e. l'introduction directe de schémas fonctionnels, est un outil fantastique offert par Simulink. Cependant, les limites de ce genre de programmation sont rapidement atteintes lorsque le système est relativement complexe, auquel cas il sera plus facile de programmer Simulink "en texte" de manière classique, i.e. en créant des *fonctions S* (*S-function*), plutôt que d'interconnecter les blocs par de nombreuses lignes créées à la souris. Les fonctions S ont un format un peu particulier, propre à Simulink, mais s'écrivent presque aussi simplement que les fonctions MATLAB ; elles consistent à programmer les équations différentielles du système à simuler.

6.2 Exemple introductif : simulation d'un système dynamique linéaire

On se propose d'illustrer l'utilisation de Simulink par l'exemple classique d'un moteur à courant continu à excitation séparée constante exploité en boucle ouverte (figure 2).

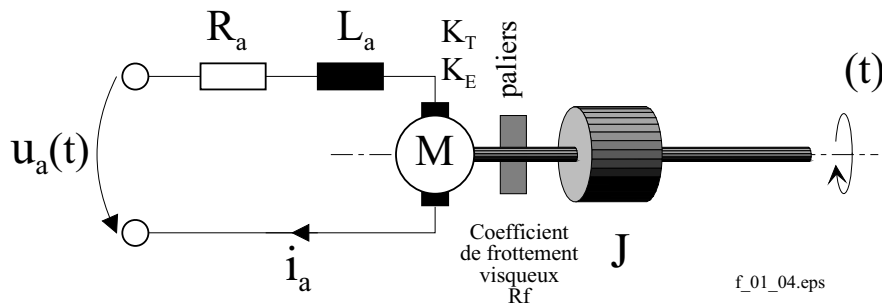


FIG. 2 – Schéma technologique d'un entraînement DC à excitation séparée constante. Le frottement est purement visqueux, proportionnel à la vitesse, de coefficient R_f .

On admettra que le système est parfaitement linéaire, en faisant les hypothèses simplificatrices suivantes, ceci pour simplifier l'exemple et se concentrer sur l'essentiel de cette étude, i.e. le logiciel MATLAB/Simulink :

- on ne prend pas en compte l'effet des perturbations ;
- le frottement sur l'arbre moteur est purement visqueux ;
- le moteur à courant continu étant compensé, l'effet de réaction d'induit est négligeable.

Plusieurs démarches sont possibles pour la construction et l'organisation du schéma, de même que pour la simulation. On propose ici une façon de faire relativement laborieuse par rapport à la simplicité de l'exemple, calquée sur des problèmes concrets d'une certaine envergure, pour lesquels la méthodologie employée est déterminante. Comme on le verra, le lien avec **MATLAB** est sous-jacent.

6.2.1 Modélisation

Les modèles en t et en s du système sont (les conditions initiales étant supposées identiquement nulles) :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_a = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + K_E \cdot \omega \\ T_{em} = K_T \cdot i_a \\ J \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_{em} - R_f \cdot \omega \end{array} \right\} \mathcal{L} \left\{ \begin{array}{l} U_a = R_a \cdot I_a + L_a \cdot s \cdot I_a + K_E \cdot \Omega \\ T_{em} = K_T \cdot I_a \\ J \cdot s \cdot \Omega = T_{em} - R_f \cdot \Omega \end{array} \right\}$$

Après mise en équations, le schéma fonctionnel détaillé est celui de la figure 3.

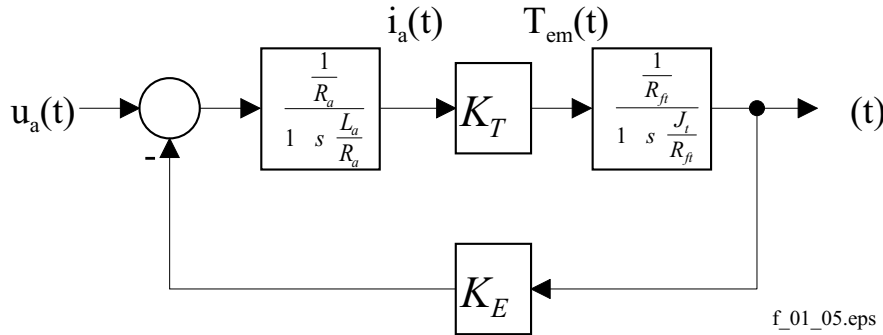


FIG. 3 – Schéma fonctionnel correspondant au schéma technologique de la figure 2 page précédente.

6.2.2 Construction du schéma

Pour introduire le schéma fonctionnel de la figure 3 dans **Simulink**, il faut commencer par appeler **Simulink** à partir l'espace de travail de **MATLAB**, comme déjà fait précédemment.

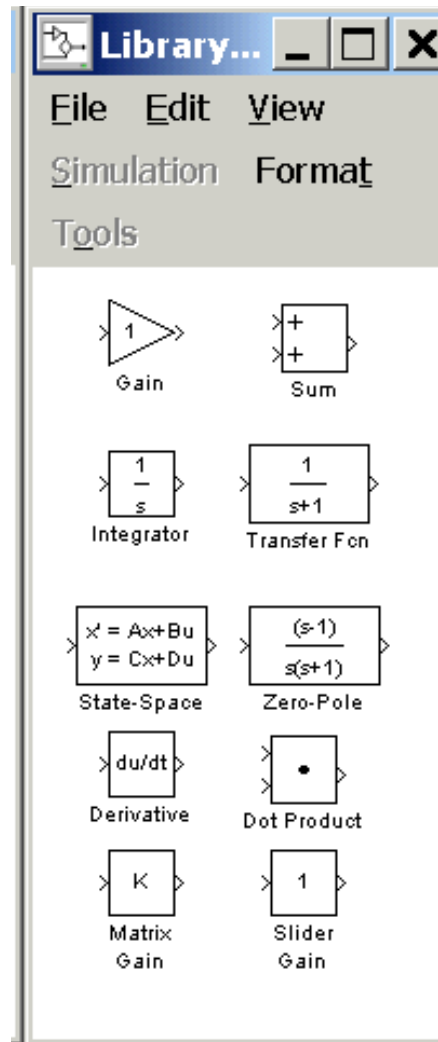


FIG. 4 –

Pour définir la fenêtre de travail, sélectionner **New** dans le menu **File**. Une nouvelle fenêtre est alors activée, nommée automatiquement **Untitled**. C'est dans cette même fenêtre que le schéma sera construit à partir des blocs contenus dans les bibliothèques **Simulink**, voire d'autres blocs créés par l'utilisateur et réunis dans d'autres bibliothèques. Revenant à la fenêtre **Simulink** et double-cliquant sur le groupe **Linear**, apparaissent alors certains blocs utiles à la construction (figure 4) :

- le sommateur (**Sum**) ;
- le gain (**Gain**)
- la fonction de transfert (**Transfer Fcn**).

Sélectionnant le premier de ces blocs à l'aide de la souris dont le bouton gauche est maintenu pressé, on amène le bloc dans la fenêtre de travail en déplaçant la

souris. Comme le gain et la fonction de transfert apparaissent chacun deux fois dans le schéma fonctionnel, l'opération est répétée en conséquence. La fenêtre de travail **Untitled** a maintenant l'allure de la figure 5.

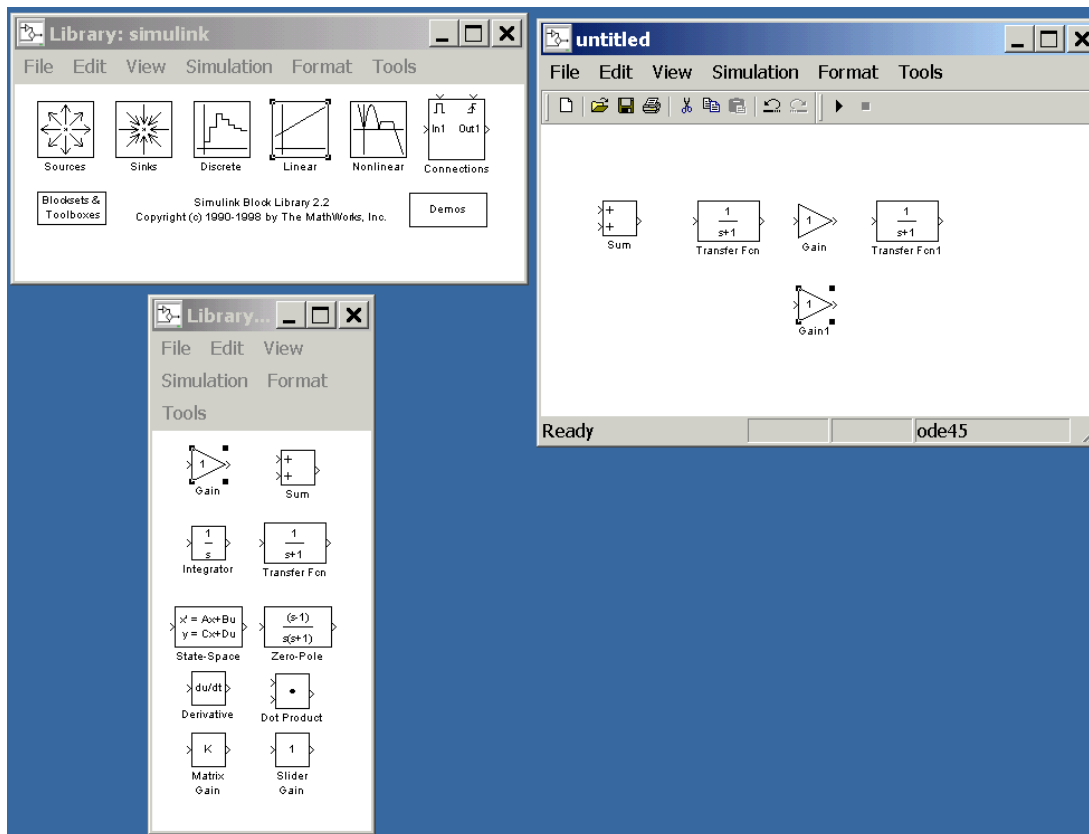


FIG. 5 –

Pour faciliter la schématisation, le bloc **Gain 1** peut être changé de sens en le sélectionnant (le sélectionner avec la souris) et en choisissant **Flip Horizontal** dans le menu **Options**. On peut aussi faire usage des fonctionnalités offertes par le bouton droit de la souris.

Il faut alors réaliser les interconnexions, toujours à la souris, en maintenant le bouton gauche pressé, la souris pointant sur la flèche symbolisant l'entrée ou la sortie du bloc à connecter (le curseur prend la forme d'une fine croix, alors qu'il a l'allure d'une croix en trait épais dans le cas aucune entrée ou sortie ne sont sélectionnées). Le bouton gauche étant toujours pressé, on amène la souris sur la flèche du port à relier. On obtient alors facilement le schéma de la figure 6 page suivante.

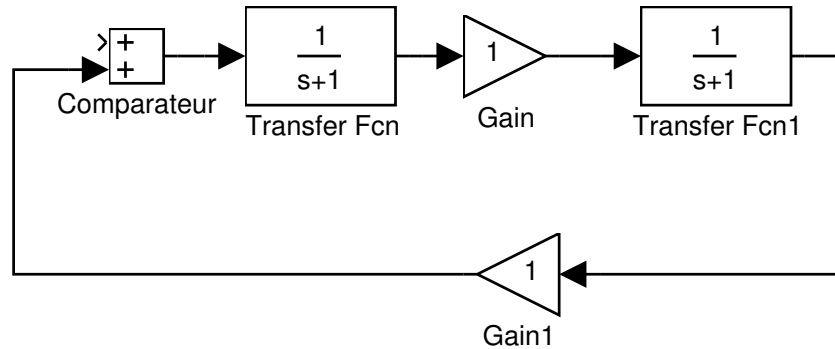


FIG. 6 –

Les équations du moteur à courant continu montrent que la FEM est contre-réactionnée. Double-cliquer alors sur le bloc **Sum** et changer la liste des signes de ++ en +-. A titre de documentation, il vaut également la peine de renommer ces blocs, en cliquant sur les textes les accompagnant et les remplaçant par des désignations plus parlantes, comme par exemple induit, constante de couple, charge mécanique et constante de FEM (figure 7). Tant qu'à faire, pourquoi ne pas aussi nommer les signaux, en cliquant à l'endroit où le commentaire doit apparaître (ne pas cliquer l'un des blocs ou l'une des connections) et en tapant le texte. L'utilisation d'accents est aux risques et périls de l'utilisateur d'un logiciel d'origine américaine !

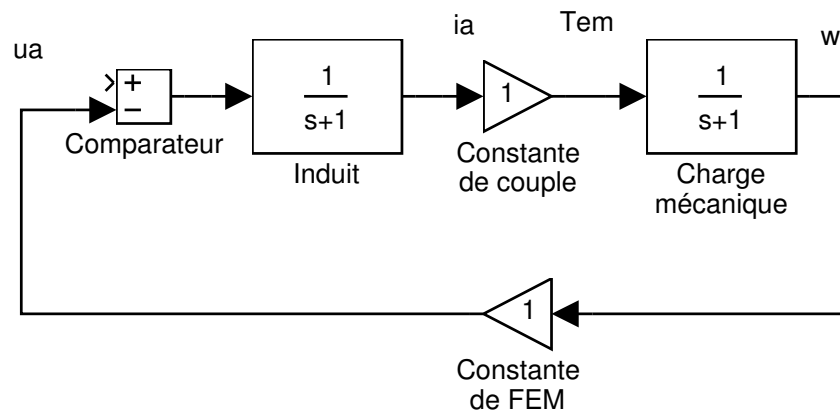


FIG. 7 –

La paramétrisation des blocs s'effectue en double-cliquant et en remplissant les rubriques de la boîte de dialogue qui apparaît alors (figure 8 page suivante). Par

exemple, pour le bloc **Induit**, il faut spécifier les numérateur et dénominateur de la fonction de transfert. On recommande ici vivement de ne pas introduire de valeurs numériques, mais d'indiquer les nom de variables qui seront ultérieurement définies dans l'espace de travail **MATLAB**. On donnera donc **numGa1** et **denGa1**, que l'on initialisera dans **MATLAB** par les commandes

```
numGa1 = 1/Ra;
denGa1 = [La/Ra, 1];
```

les valeurs numériques de R_a et L_a étant supposées connues dans l'espace de commande **MATLAB**.

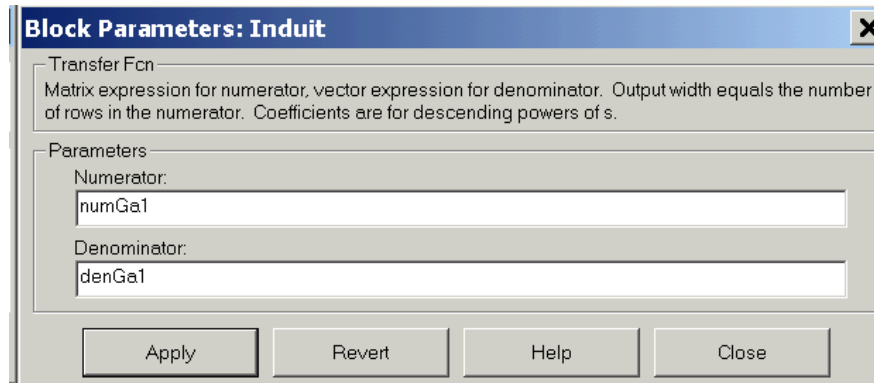


FIG. 8 –

Il reste à spécifier le signal d'entrée (la tension d'induit $u_a(t)$) et les signaux intéressants à visualiser ainsi que les moyens pour le faire. On propose pour cet exemple que $u_a(t)$ ait la forme d'un saut unité, que l'on visualise en plus de la vitesse angulaire $\omega(t)$ à l'aide d'un oscilloscope.

Pour générer la tension d'induit $u_a(t)$, on ouvre le groupe **Sources** de la fenêtre **simulink** et l'on amène le bloc **Step Input** dans la fenêtre de travail, en le connectant au comparateur. Pour visualiser les signaux, on ouvre le groupe **Sinks** de la fenêtre **simulink** et l'on amène également le bloc **Scope**. Comme l'on souhaite afficher deux signaux simultanément, il faut aller chercher dans le groupe **Connections** un multiplexeur (bloc **Mux**).

Il est encore nécessaire de paramétrer ces nouveaux blocs. En double cliquant successivement sur chacun d'eux, on peut spécifier que :

- le saut-unité s'effectue dès l'instant zéro, son amplitude étant 1 ;
- l'échelle horizontale de l'oscilloscope est 0.08 (selon § 6.2.4 page 40) ;
- le multiplexeur a deux entrées ($u_a(t)$ et $\omega(t)$).

Après avoir connecté ces blocs, on obtient le schéma suivant de la figure 9 page suivante.

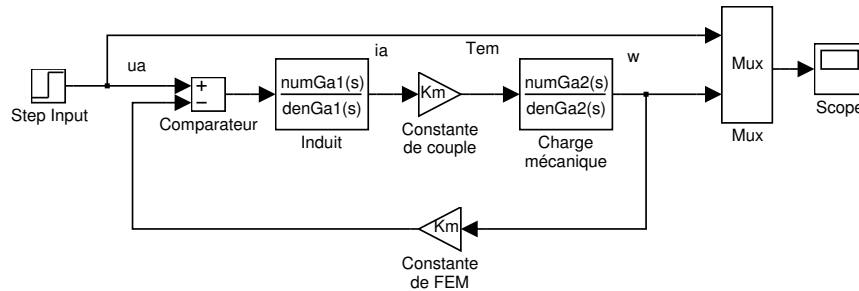


FIG. 9 –

Il est alors temps de sauver le schéma dans un fichier, ce qui se fait à partir du menu File, option **SaveAs...** On propose d'appeler ce schéma **ex_01**, à sauver dans **d:\users**. Simulink le sauve d'office avec l'extension **.mdl**.

6.2.3 Initialisation des paramètres

Pour initialiser les paramètres, on propose de créer un fichier MATLAB de type *script*, i.e. un fichier batch contenant la suite des commandes nécessaires. Profitant de la connaissance que l'on a de MATLAB, on obtient rapidement le fichier d'initialisation baptisé **ini_01.m** ci-dessous :

```
%/*
%*****
%                               INI_01.M
%*****
%                               Fichier script contenant la suite des commandes
%                               nécessaires a l'initialisation des parametres
%                               du moteur DC
%
%*****
%*****
%                               Version      Date      Auteur      Motif
%                               0             18/03/96   MEE           Creation
%                               21/05/97   MEE           Mise a jour notation KT et KE
%                               29/11/01   MEE           Mise a jour
%                               ...          ...          ...          (Modifications)
%*****
%*****
%/*
%                               Initialisation
%                               Parametres d'un moteur DC
%                               Ra = 1.84;           %resistance de l'induit
%                               La = 0.00077;        %inductance de l'induit
%                               KT = 0.9;            %constante de couple
%                               KE = KT;             %constante de FEM
%                               Rf = 0.001;          %coefficient de frottement visqueux (Nms/rad)
%                               J = 0.0061;          %Moment d'inertie total
%
%                               Fonctions de transfert
%                               numGa1 = 1/Ra;
%                               denGa1 = [La/Ra,1];
%
%                               numGa2 = 1/Rf;
%                               denGa2 = [J/Rf,1];
```

L'exécution de ce fichier se fait dans MATLAB en tapant son nom :

```
ini_01
```

On peut vérifier que MATLAB connaît désormais toutes les variables (vues par les blocs Simulink comme des paramètres) nécessaires à la simulation en tapant `who` (figure 10).

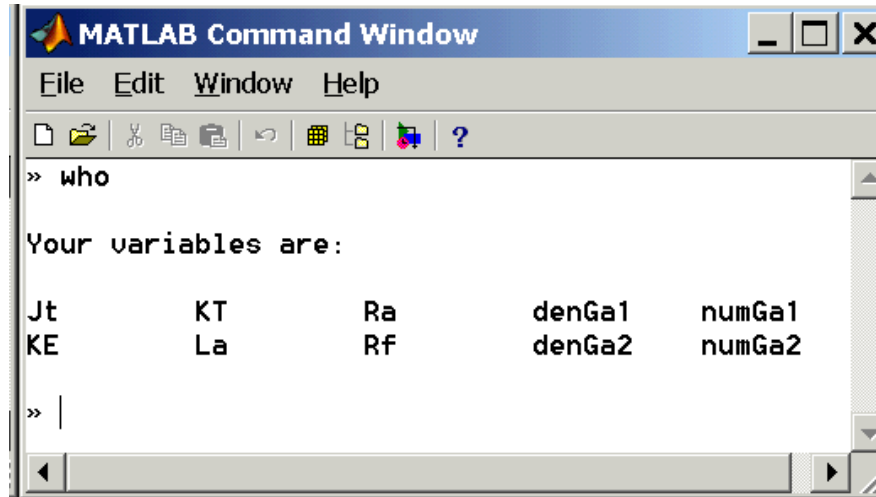


FIG. 10 –

6.2.4 Simulation

On peut maintenant revenir à la fenêtre Simulink `ex_01` (si elle n'est plus ouverte, simplement taper son nom dans MATLAB) et entrer dans le menu **Simulation**, option **Parameters**, ou plusieurs choix importants doivent être faits (11 page suivante).

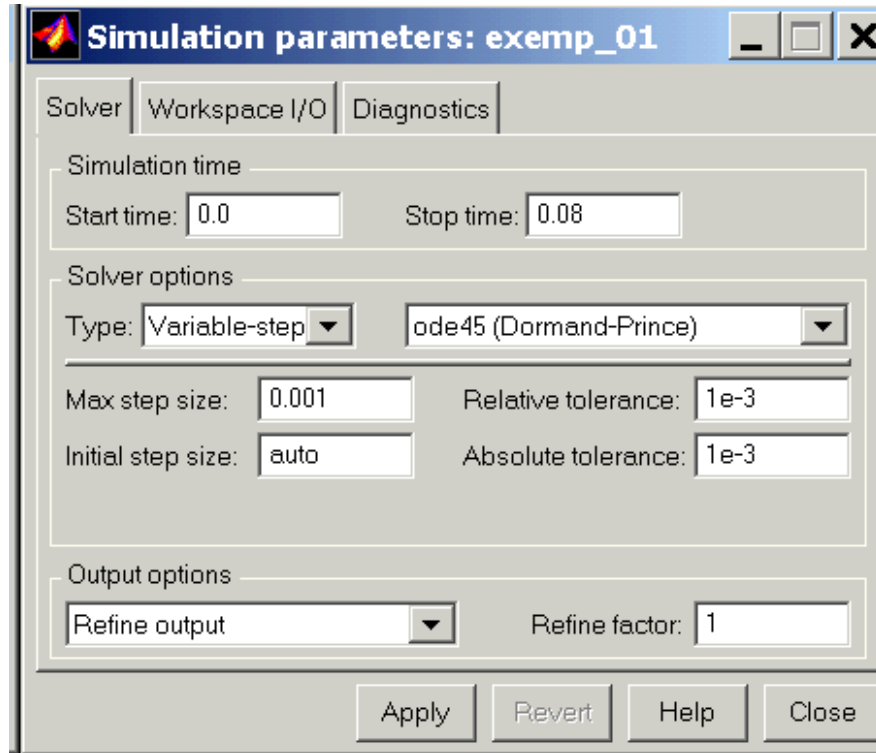


FIG. 11 –

Il s'agit de déterminer tout d'abord la **méthode d'intégration** numérique des équations différentielles. On choisira par défaut Runge-Kutta 45.

L'**instant de départ** de la simulation ainsi que celui auquel elle se **termine** sont fixés notamment en fonction de la durée de la simulation désirée.

Le **pas d'intégration maximum** est à ajuster avec précaution, puisqu'il a une influence déterminante sur la précision et le temps de calcul. On voit qu'il est nécessaire, avant de démarrer la simulation, de se faire une idée de la rapidité des phénomènes. Dans le cas de l'exemple traité, la constante de temps mécanique T_m et électrique T_e

$$T_m = \frac{R_a \cdot J}{K_T \cdot K_E} = \frac{1.84 [\Omega] \cdot 0.0061 [kg \cdot m^2]}{(0.9 [\frac{N \cdot m}{A}])^2} = 0.0139 [s]$$

$$T_e = \frac{L_a}{R_a} = \frac{7.7 [mH]}{1.84 [\Omega]} = 0.0042 [s]$$

nous indiquent qu'avec un pas d'intégration maximum de l'ordre de 0.001 [s], la précision fixée par le paramètre **tolérance** devrait être atteinte facilement.

Grosso modo, le pas maximum devrait avoir une valeur de l'ordre de la durée d'un millièmme de la durée de simulation.

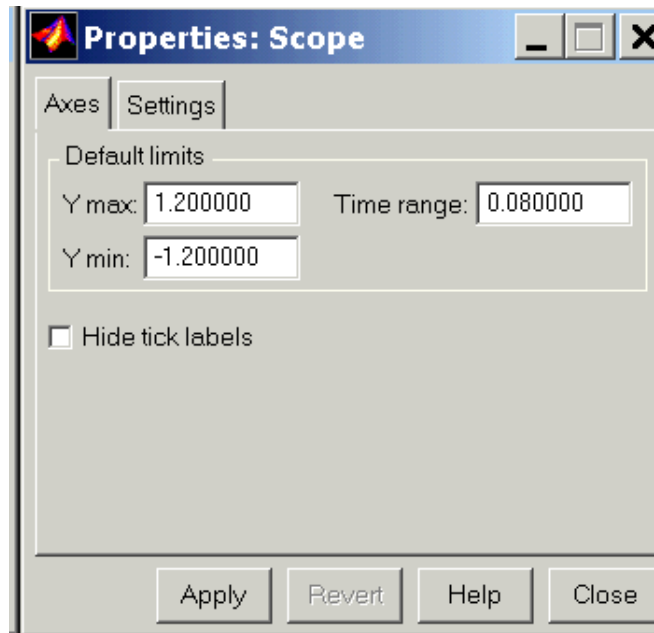


FIG. 12 –

En double-cliquant sur l'oscilloscope, on peut encore ajuster ses échelles horizontale et verticale, que l'on choisira ici à $0.08 [s]$ et $1.2 \left[\frac{\text{rad}}{s} \right]$ respectivement. A noter que $0.08 [s]$ représente la largeur totale de l'écran de l'oscilloscope (soit 5 divisions), $1.2 \left[\frac{\text{rad}}{s} \right]$ étant équivalent à la moitié de la hauteur (soit 3 divisions).

Il reste maintenant à lancer la simulation, en choisissant l'option **Start** du menu **Simulation**.

Si l'on bascule (**Alt Tab**) sur l'oscilloscope, l'affichage est alors normalement conforme à la figure 13 page suivante. Au besoin, on peut appuyer sur le bouton zoom (symbole jumelles).

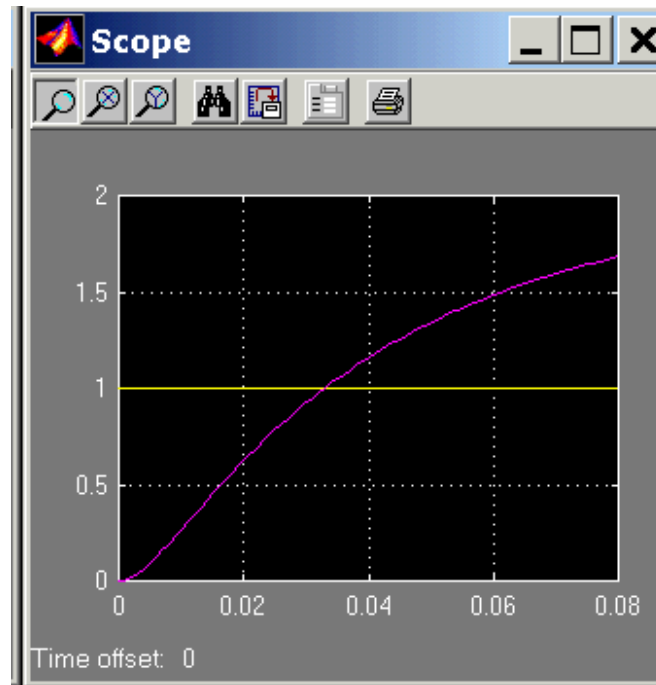


FIG. 13 –

6.2.5 Sauvegarde des signaux puis traitement dans l'espace de travail MATLAB

Il vaut également la peine de sauvegarder dans une variable MATLAB les signaux intéressants pour effectuer un traitement ultérieur dans MATLAB. On choisit $u_a(t)$, le couple électromagnétique $T_{em}(t)$ et la vitesse angulaire $\omega(t)$. En effectuant cette sauvegarde, il ne faut pas omettre l'information temps t , que l'on peut obtenir en allant chercher le bloc **Clock** dans le groupe **Sources** de la bibliothèque. Les trois informations à sauver sont de préférence multiplexées, i.e. réunies en un signal de type vecteur, à l'aide d'un nouveau bloc **Mux**, du groupe **Connections**, que l'on paramétrise à trois entrées. Enfin, le signal issu de ce multiplexeur est transmis à un bloc assurant la liaison avec l'espace de travail MATLAB, le bloc **To Workspace**, que l'on trouve dans le groupe **Sinks**. Ce dernier bloc a pour paramètres (figure 14 page suivante) le nom de la variable MATLAB dans laquelle les résultats seront sauvés, ainsi qu'une indication relative au nombre maximum de pas de calcul à sauver. Si la durée du pas est faible et que celle de la simulation est grande, on conçoit que le nombre de données à sauver soit prohibitif et provoque une saturation de l'espace mémoire. Pour l'éviter en partie, on peut en option spécifier au bloc **To Workspace** de ne sauver qu'à intervalles réguliers, de durée plus grande que le pas d'intégration.

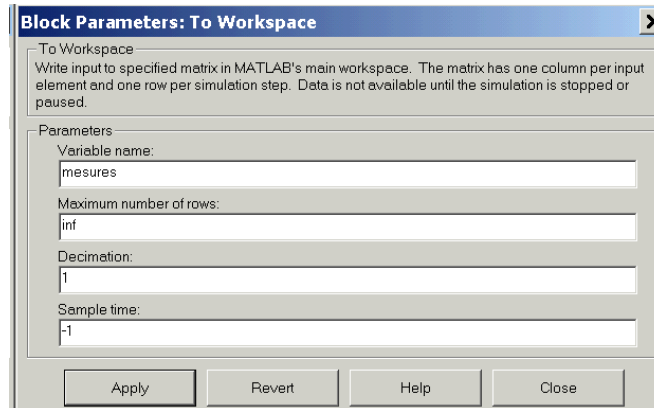


FIG. 14 –

Le schéma se présente alors comme suit, sauvé dans le fichier `ex_02.mdl` (figure 15)

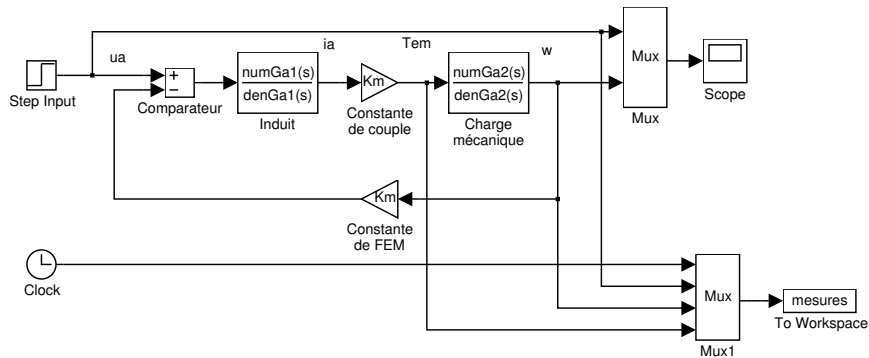


FIG. 15 –

Comme précédemment, on démarre la simulation et lorsque celle-ci est terminée, on peut revenir à l'espace de travail MATLAB et découvrir l'existence de la variable `mesures`, créée par le bloc `To Workspace`.

Le fichier MATLAB `cal_01.m` suivant en extrait les informations et trace les trois courbes $u_a(t)$, $\omega(t)$ et $T_{em}(t)$, ainsi que la puissance mécanique $P_{mec}(t)$ après avoir calculé celle-ci (figure 16 page suivante).

```
%/*
%*****
%                               CAL_01.M
%*****
%      Fichier script contenant la suite des commandes
%      nécessaires à l'interprétation de la variable
%      mesures produite par ex_02.m
%*****
%*****
%      Version      Date      Auteur      Motif
%      0            18/03/96  MEE          Creation
```

```

%      ...      ...      ...      ( Modifications )
%*****
%*****
%*/

%      Extraction du temps t et des 3 signaux ua, omega et Tem

t = mesures(:,1);
ua = mesures(:,2);
omega = mesures(:,3);
Tem = mesures(:,4);

%      Calcul de la puissance mecanique instantanée

Pmec = Tem .* omega;

%      Affichage sur un ecran form d'un colonne de 4 graphiques
figure(gcf)
subplot(411), plot(t,ua)
xlabel('t [s]')
ylabel('u_a(t)')
title('MESURES')

subplot(412), plot(t,omega)
xlabel('t [s]')
ylabel('\omega(t)')

subplot(413), plot(t,Tem)
xlabel('t [s]')
ylabel('T_{em}(t)')

subplot(414), plot(t,Pmec)
xlabel('t [s]')
ylabel('P_{mec}(t)')

subplot(111)

```

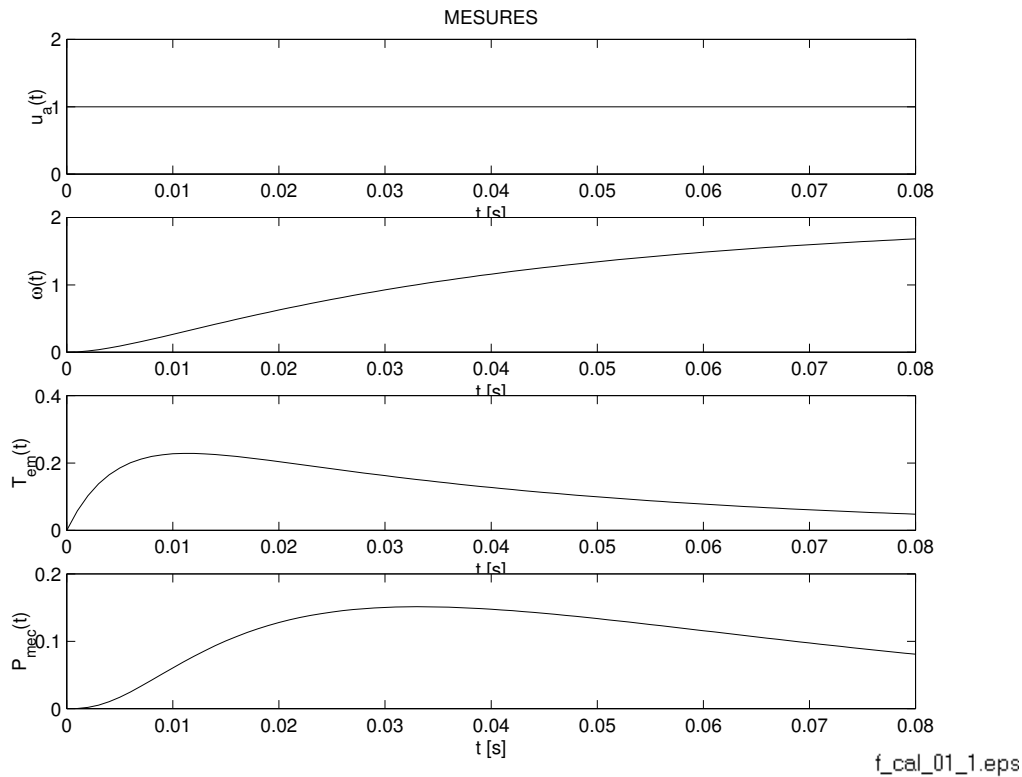


FIG. 16 –

6.2.6 Lancement de la simulation à partir de **MATLAB**

Les simulations effectuées peuvent être lancées à partir de l'espace de travail **MATLAB**, sans même ouvrir la fenêtre du schéma de simulation. La ligne de commande est la suivante :

```
[t,x,y] = sim('ex_01',tfinal,options,u);
```

Dans notre cas :

```
ini_01  
[t,x,y] = sim('exemp_01',0.08,[],);
```

t, **x** et **y** seront à la fin de la simulation des vecteurs-colonne contenant respectivement les instants de simulation, le vecteur d'état correspondant et les sorties à ces instants. Ces dernières doivent être explicitement connectées à des blocs de type **Outport**, groupe **Connections**;

- **tfinal** est l'instant auquel la simulation prend fin;
- **x0** est optionnel et représente le vecteur d'état (colonne) initial, i.e. les conditions initiales;
- **options** est un vecteur à plusieurs composantes. Voir l'aide de **MATLAB**;
- **u** est un tableau spécifiant les valeurs prises par les entrées en fonction du temps, spécifié dans la première colonne. Les entrées sont amenées au schéma de simulation par des blocs de type **Inport**, groupe **Connections**.

Il est important de réaliser que cette commande peut être intégrée sans autre à tout fichier **MATLAB**, qu'il soit de type **script** ou **function**.

Pour des informations plus détaillées, on consultera le §4-104 de [2].

6.3 La bibliothèque standard

6.3.1 Sources

Cette bibliothèque (figure 17) contient des éléments **générateurs de signaux** tels que saut unité, sinusoïde, fichiers de points, variable MATLAB, bruit, séquences, le temps courant de la simulation (horloge), etc, sans oublier le générateur de signal lui-même. Sans parler du fait que l'on peut soit-même créer son propre générateur de signal, on note ici qu'il y a vraiment intérêt à paramétrer ces blocs dans à l'aide de variables définies proprement dans MATLAB.

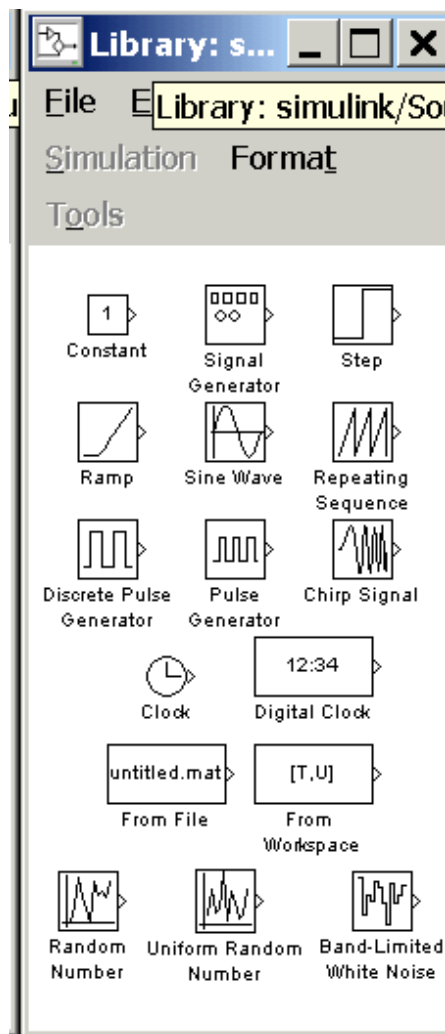


FIG. 17 –

6.3.2 Sinks

Cette bibliothèque (figure 18) contient des éléments **récepteurs de signaux** tels que fichiers, variable **MATLAB** ainsi que l'oscilloscope. S'agissant de ce dernier, il est à considérer plutôt comme un gadget permettant de vérifier le bon fonctionnement de la simulation. La combinaison de l'oscilloscope avec un multiplexeur analogique (bibliothèque *Connections*) permet de grouper plusieurs signaux sur une seule ligne de créer ainsi un oscilloscope multi-traces. La présence d'un grand nombre d'oscilloscopes dans un même schéma ralentit considérablement la simulation, comme d'ailleurs la sauvegarde systématique des signaux dans des variables **MATLAB**.

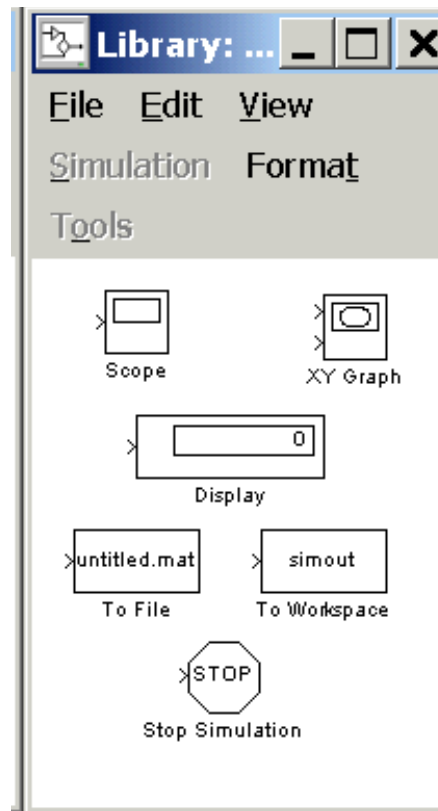


FIG. 18 –

Dans le cadre d'un projet, c'est toutefois cette dernière solution qui sera préférée, l'analyse des signaux pouvant s'effectuer dans **MATLAB** une fois la simulation terminée. On dispose alors de toutes les fonctions **MATLAB** pour procéder aux analyses et traitements (par exemple, filtrage, interpolation, transformée de Fourier, calcul de la puissance, etc). C'est une règle simple qui mérite d'être soulignée : **il faut utiliser Simulink pour la simulation, et MATLAB pour l'analyse et le traitement off line.**

A titre illustratif, si un schéma de simulation fournit les signaux de tension $u(t)$ et de courant $i(t)$, il vaut mieux sauver ces deux signaux dans l'espace de travail **MATLAB** à intervalles réguliers et calculer la puissance instantanée $p(t) = u(t) \cdot i(t)$ lorsque la simulation a pris fin, plutôt que de faire ce calcul dans le schéma de simulation (comme fait au § 6.2.5 page 43). Dans ce dernier cas, on augmente inutilement la quantité de calculs à faire en cours de simulation, et de plus on ajoute une non-linéarité au schéma. Globalement, la perte de temps peut être considérable.

D'une manière plus générale, il faut réserver **Simulink** à la simulation de la partie dynamique des systèmes et lui épargner les autres calculs. En langage de représentation des systèmes dans l'espace d'état, ceci revient à limiter le schéma de simulation à l'équation d'état différentielle, i.e.

$$\frac{d}{dt}\vec{x} = f(\vec{x}) + g(\vec{u}) \quad ,$$

et à omettre l'équation d'observation

$$\vec{y} = h(\vec{x}) + i(\vec{u})$$

6.3.3 Discrete

Cette bibliothèque (figure 19) contient des éléments **discrets** linéaires (dicrotisation du temps exclusivement), tels que gains, systèmes dynamiques linéaires (transmittance isomorphe, équations d'état), élément de maintien, etc. L'intégrateur limité, curieusement présent dans cette bibliothèque, est en fait un élément non-linéaire.

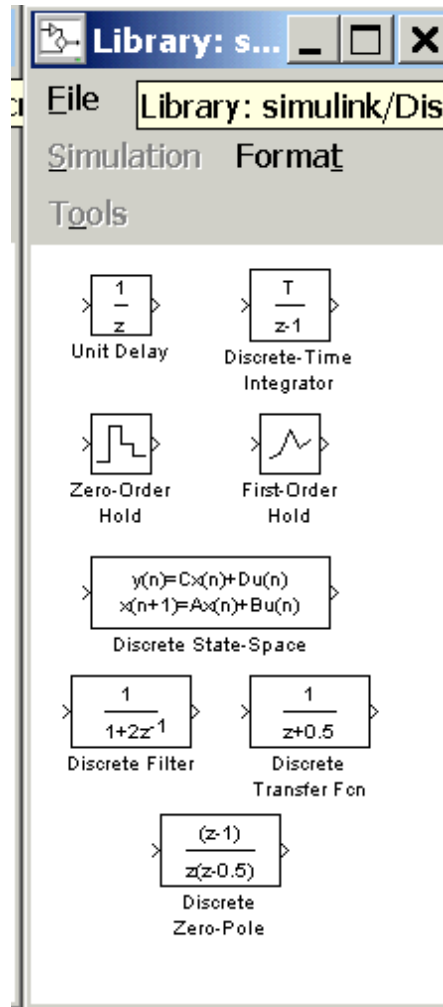


FIG. 19 –

6.3.4 Linear

Cette bibliothèque (figure 20) contient des éléments **analogiques** effectuant tous des opérations **linéaires** sur les signaux, tels que gains, sommateurs, systèmes dynamiques linéaires représentés par leur fonction de transfert ou leurs équations d'état.

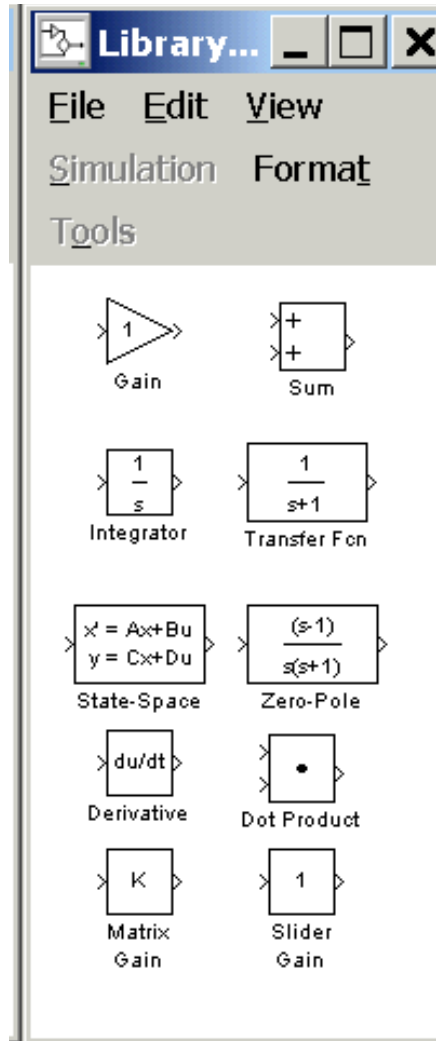


FIG. 20 –

6.3.5 Nonlinear

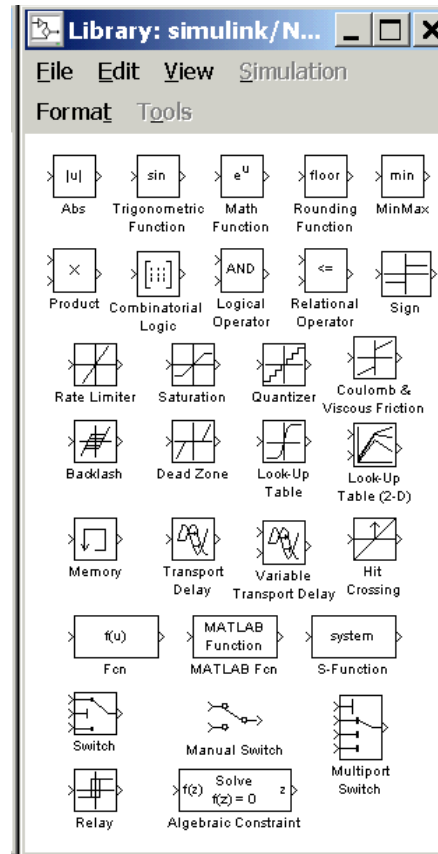


FIG. 21 –

Cette bibliothèque (figure 21) contient des éléments non-linéaires statiques ou dynamiques. C'est l'une des plus intéressantes, puisque grâce aux différents blocs mis à disposition, on peut simuler par exemple

- un élément de type tout-ou-rien avec ou sans hystérèse (**Sign**, **Relay**) ;
- un élément introduisant une saturation (**Saturation**) ;
- un effet de jeu (**backlash**) ;
- la quantification de l'amplitude apportée par un convertisseur A/D ou D/A (**Quantizer**) ;
- un effet de seuil ou de zone morte (**Dead zone**) ;
- un effet de limitation de la variation par rapport au temps (**Rate limiter**) ;
- une non-linéarité de type valeur absolue (**Abs**) ;
- un élément effectuant le produit de deux signaux (**Product**) ;
- des opérations logiques simples ou complexes (**AND**, **Combinatorial logic**) ;
- un élément créant un retard pur (**Transport delay**) ;

- un élément dont la caractéristique statique est disponible dans une table (look up table) ;
- etc.

Là aussi, il est vivement conseillé de paramétrer ces blocs au moyen de variables définies dans **MATLAB**.

Cette liste non-exhaustive, bien qu'offrant déjà de nombreuses possibilités, ne doit pas faire oublier les possibilités fantastiques offertes par les blocs

- **MATLAB Fcn** ;
- **S-Function**.

Le premier de ces blocs permet d'appeler une fonction **MATLAB** standard ou définies par l'utilisateur (linéaire ou non). Celle-ci peut être multivariable.

Le second offre les mêmes possibilités que le premier, à ceci près qu'il s'agit d'une fonction directement exécutable par le noyau de calcul de **Simulink** : aucune conversion préalable n'est nécessaire, la fonction **S** fournissant à **Simulink** les informations demandées, celles-ci étant spécifiées par les paramètres d'appel. Cette fonction **S** peut donc être un autre schéma **Simulink**, voire être écrite explicitement par l'utilisateur dans un fichier respectant les conventions d'appels (simples) de **Simulink**. Dans ce dernier cas, la fonction peut être programmée soit en langage **MATLAB** ou même directement en langage **C**.

6.3.6 Connections

Cette bibliothèque (figure 22) contient essentiellement des éléments permettant de grouper plusieurs signaux sur une même ligne (**Mux**) et celui faisant l'opération inverse (**Demux**).

Les blocs **Inport** et **Outport** sont mono-dimensionnels et ne sont pas directement utiles, sauf dans le cas où la simulation est effectuée depuis l'espace de travail **MATLAB** à l'aide d'une ligne de commande, sans ouvrir l'interface graphique de **Simulink**. Ils permettent alors de définir clairement les signaux d'entrée et de sortie. **Simulink** les rajoute automatiquement à un schéma lorsque que l'on groupe plusieurs blocs un seul, afin d'alléger le schéma ou d'identifier plus facilement les ensembles de blocs dédiés à une seule fonction globale.

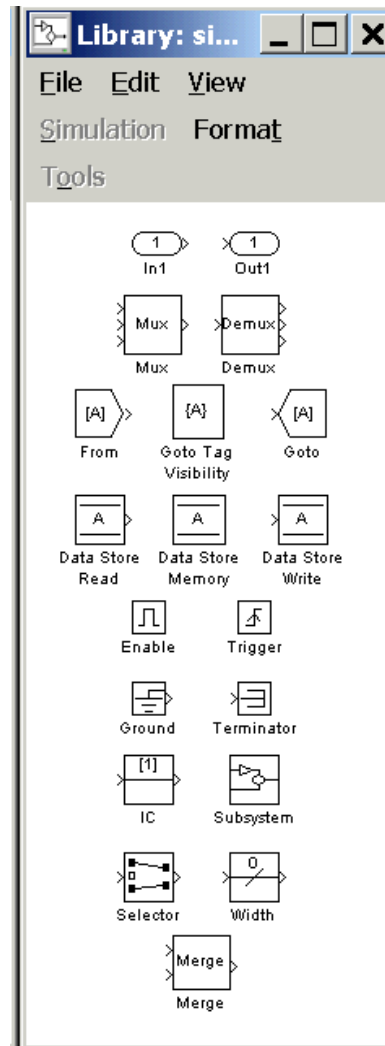


FIG. 22 –

6.4 Les S-functions de Simulink (version provisoire)

La boîte à outils Simulink de MATLAB est avant tout un ensemble de routines de résolution numérique des équations différentielles (ou aux différences dans le cas discret) régissant le comportement de systèmes dynamiques. Parmi celles-ci, on note par exemple rk45 (Runge-Kutta d'ordre 4 ou 5). Ces routines peuvent traiter des fichiers décrivant le système à simuler à condition que celui-ci ait un format défini : il doit apparaître comme étant une **S-function**.

Il n'en va pas autrement lorsque l'utilisateur, plutôt que de décrire son système par son modèle d'état, profite de l'éditeur de schéma de Simulink pour construire directement le schéma fonctionnel du système à la souris : en arrière-plan, l'éditeur de Simulink transforme en fait le schéma en une S-function compatible avec les routines de résolution numérique.

Si l'on connaît le format d'une S-function, il est donc possible de se passer de l'éditeur de schéma de Simulink et d'écrire directement un fichier satisfaisant le format précité, i.e d'écrire une S-function. Dans certains cas, il est plus rapide d'implanter les équations de la dynamique sous forme texte plutôt que graphique. Outre le modèle d'état du système, le fichier de la S-function devra implanter le protocole d'échange de données entre la routine de résolution numérique et la S-function. Or, ce dernier est relativement simple ; dans les grandes lignes, on dira que la routine de résolution interroge la S-function en affectant des valeurs aux arguments (signaux d'entrée et éventuellement paramètres). Par exemple,

```
[ sys , x0 ] = rk45 ( ' si_02_02 ', u , parametre , flag )
```

La S-function peut être écrite en langage MATLAB, C, ou Fortran. La forme de la fonction "S" est très générale et s'adapte aussi bien à des systèmes continus, discrets, voir hybrides. Il en résulte que n'importe quel système dynamique peut être décrit par une "S-Function".

Le bloc "S-Function" est disponible parmi les blocs de la librairie "Nonlinear".

6.4.1 Conventions d'appel des S-functions

- Informations diverses quant à la nature du système
Si le noyau de calcul appelle la fonction si_02_02 en posant flag=0, il attend en retour sys qui doit alors être un vecteur contenant respectivement le nombre d'états analogiques, d'états discrets, de sorties, d'entrées, de racines discontinues ainsi qu'une indication si la matrice D est non nulle. De plus, il attend dans x0 le vecteur d'état initial (i.e. conditions initiales).
- Equation de sortie
Si le noyau de calcul appelle la fonction si_02_02 en posant flag=3, il attend en retour sys qui doit alors correspondre à la sortie du système.
- Equation d'état différentielle

Si le noyau de calcul appelle la fonction `si_02_02` en posant `flag=1`, il attend en retour `sys` qui doit alors correspondre à la dérivée du vecteur d'état.

6.4.2 Exemple

```
function [sys,x0] = si_02_02(t,x,u,flag,param)
%/*
%*****
%                               si_02_02.M
%*****
%                               Fonction S contenant les equations differentielle d'un systeme
%                               a inertie variable
%
%*****
%*****
%Version   Date           Auteur   Motif
%0         03/12/96      MEE       Creation
%         ...           ...       ...      (Modifications)
%*****
%*/

%
%                               Equation d'etat differentielle
%
%                               Si le noyau de calcul appelle la fonction si_02_02 en posant
%                               flag=1, il attend en retour sys qui doit alors correspondre
%                               a la derivee du vecteur d'etat
%
    if abs(flag) == 1
        %                               Extraction des parametres
        %
        Jn = param(1);
        Rf = param(2);
        La = param(3);
        Ra = param(4);
        KT = param(5);
        Ke = param(6);
        alpha = param(7);
        temp = alpha+sin(x(3));

        xdot(1) = -Ra/La*x(1) - Ke/La*x(2) + 1/La*u;
        xdot(2) = KT/Jn/temp*x(1) - Rf/Jn/temp*x(2);
        xdot(3) = x(2);
        sys = xdot;

%
%                               Equation de sortie
%
%                               Si le noyau de calcul appelle la fonction si_02_02 en posant
%                               flag=3, il attend en retour sys qui doit alors correspondre
%                               a la sortie du systeme
%
        elseif flag == 3
            sys = x(2);

%
%                               Information diverses quant a la nature du systeme
%
%                               Si le noyau de calcul appelle la fonction si_02_02 en posant
%                               flag=0, il attend en retour sys qui doit alors etre un vecteur
%                               contenant respectivement le nombre d'etats analogiques,
%                               d'etats discrets, de sorties, d'entrees, de racines discontinues
%                               ainsi qu'une indication si la matrice D est non nulle. De plus, il
%                               attend dans x0 le vecteur d'etat initial (i.e. conditions initiales)
%
        elseif flag == 0
            sys = [3,0,1,1,0,0]';
            x0 = param(8:10)';
    end
```

6.4.3 Autres fonctionnalités de Simulink

Signalons que d'autres outils que les méthodes de résolution numérique sont disponibles avec Simulink. En particulier, la routine `linmod('si_02_02',x0)` permet de d'extraire un modèle d'état du système linéarisé autour du point de fonctionnement spécifié.