République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou

Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Automatique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Automatique

Thème

CREATION D'UNE BOITE A OUTILS A ELEMENTS BOND GRAPHS POUR SIMULATION DES SYSTEMES DYNAMIQUES

Proposé et dirige par : Mr A.MAID

Présenté par :

Younsi khellaf
Aichoun youcef

Soutenu le : 30 /10 /2012

Promotion 2012

Remerciements :

NOUS SOMMES TRÈS HEUREUX D'EXPRIMER NOS REMERCIEMENTS ET NOTRE PROFONDE GRATITUDE A NOTRE PROMOTEUR MR A.MAIDI.

NOUS REMERCIONS TOUS LES MEMBRES DU JURY D'AVOIR ACCEPTER DE PORTER UN AVIS SUR NOTRE MÉMOIRE.

C'EST LE MOMENT AUSSI POUR DIRE MERCI A TOUS LES PROFESSEURS QUI NOUS ONT SUIVI DU PRIMAIRE JUSQU'À CE JOUR.

UN TRÈS GRAND MERCI A NOS PARENTS QUI ONT TOUJOURS ÉTÉ A NOS COTES.

NOUS REMERCIONS CHALEUREUSEMENT LE CHEF DU DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE MR BENSIDHOUM POUR SES CONSEILS.

ENFIN MERCI A TOUS NOS AMIS (ES) POUR LEURS SOUTIENS. .

SOMMAIRE

CHAPITRE II : LES BOND GRAPHS

CHAPITRE III : REALISATION DE LA BOITE A OUTILS ET EXEMPLE DE SIMULATION

CONCLUSION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

Le modèle mathématique d'un système dynamique est indispensable pour la démarche de l'automaticien. Le modèle est utilisé pour la simulation, l'analyse des propriétés fondamentales (commandabilité, observabilité et stabilité), et pour la conception de lois de commande et leur validation. Le modèle utilisable dépend du système.

Le modèle mathématique peut être obtenu en suivant deux démarches différentes. La première consiste à écrire les lois physiques régissant le comportement dynamique du système, et conduit au modèle nommer model de connaissance (boite blanche). Ce type de modèle est obtenu en considérant certaines hypothèses simplificatrices physiquement acceptables. Ces hypothèses simplificatrices permettent de réduire la complexité du modèle. La deuxième approche consiste à utiliser des mesures entrée-sortie réalisées sur le système dynamique et à partir de ces mesures un modèle mathématique est déterminé. Cette démarche s'appelle l'identification ou la modélisation expérimentale et son principe consiste à choisir une structure pour le modèle d'après les résultats expérimentaux obtenus, puis en utilisant des méthodes d'identification graphiques ou numériques, on détermine les paramètres du modèle. L'identification des systèmes conduit à des modèles de comportement (boite noire).

Pour utiliser le modèle, ce dernier doit être validé. Cette étape est plus importante car toutes les étapes d'analyse des propriétés fondamentales et de synthèse de correcteurs sont basées sur le modèle mathématique. La validation du modèle consiste à comparer les sorties prédites par le modèle avec les sorties mesurées pratiquement. Cette étape passe nécessairement par la simulation en utilisant des logiciels ou des langages de programmation dédiés.

Comme les systèmes dynamiques sont constitués de plusieurs parties physiques (électrique, mécanique, chimique, hydraulique, …), l'étape de modélisation nécessite la coopération d'un ensemble de spécialités des différents domaines. Cette coopération bute généralement au problème de communication entre les spécialistes vu que les langages utilisés ou la terminologie n'est standard. Ces dernières années, les Bond Graphs constituent un des outils de modélisation le plus efficace puisqu'il permet d'avoir un langage unifié entre les différents spécialistes ce qui facilite davantage l'étape de modélisation.

Matlab/ Simulink est un logiciel de calcul scientifique très développé, l'objectif de ce mémoire est de développer une bibliothèque Simulink pour la simulation des systèmes dynamiques par l'outil Bond Graphs. L'étude se limite à certains éléments linéaires.

Le mémoire est structuré de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur la modélisation et le modèle mathématiques.

Le deuxième chapitre aborde l'outil de modélisation Bond Graphs.

Le dernier chapitre est consacré au développement de la bibliothèque Simulink de simulation des systèmes dynamiques avec l'outil Bond Graphs.

Le mémoire se termine par une conclusion sur l'ensemble du travail réalisé.

Chapitre 1. GENERALITE SUR LA MODELISATION

1.1 Introduction

La **modélisation** est la conception d'un modèle. Selon son objectif et les moyens utilisés, la modélisation est dite mathématique, géométrique, 3D ou mécaniste. Elle nécessite généralement d'être évaluée par des vérifications, lesquelles passent par la paramétrisation et le calibrage des *modèles* utilisés en mathématiques appliquées, et en pratique en chimie, en physique, en informatique, en météorologie ou en sciences de la vie et de la terre, la modélisationpermet d'analyser des phénomènes réels et de prévoir des résultats à partir de l'application d'une ou plusieurs théories à un niveau d'approximation donné. Pour l'automatique, un modèle constitue une représentation abstraite du système dynamique à commander. Il est utilisé dans les étapes d'analyse du comportement dynamique du système et de synthèse de lois de commande.

1.2. Définition et notion de système

Un système est défini par ses constituants et les interactions qui existent entre eux, l'ensemble représentant une entité individualisée. Par système, on signifie souvent processus. L'importance de la notion de système réside dans sa généralité. En effet, un système ou un processus peut être de nature quelconque : mécanique, électrique, électromécanique, biologique, chimique, physico-chimique, sociologique, économique, industriel, etc.

Pour ce qui concerne la théorie des systèmes, on considère le système (ou le processus) évoluant dans son environnement et pouvant interagir avec lui. A priori, le système peut être considéré comme une boite noire ou black box en anglais. Il est dès lors important, en premier lieu, de distinguer les grandeurs d'entrée (inputs) et les grandeurs de sortie (outputs) du système étudié. Ensuite, il importe d'essayer de déterminer les relations qui les relient et de connaître la nature et les modes d'interaction avec l'environnement.

Par grandeur de sortie, on entend la grandeur que l'on souhaite réguler ou asservir. Par grandeur d'entrée, on entend les signaux qui permettent d'agir sur le système, c'est-à-dire qui affectent l'état de sa grandeur de sortie. La grandeur de sortie peut être modifiée par l'action des grandeurs d'entrées ou sous l'effet de perturbations provenant de l'environnement ou encore sous l'effet de la variation des constituants du système lui-même.

1.3. Modélisation des systèmes linéaires

On s'intéressera principalement à l'étude des systèmes linéaires invariants dans le temps. Par invariance dans le temps, on entend que les paramètres du modèle sont constants et indépendants du temps. Mathématiquement, un système linéaire invariant est gouverné par des équations différentielles linéaires à coefficients constants. Ces équations différentielles relient la sortie à l'entrée. L'identification des grandeurs d'entrée et de sortie pour un processus ainsi que l'établissement d'équations les reliant constitue l'étape de **modélisation mathématique** du système à étudier.

La restriction aux systèmes physiques linéaires (gouvernés par des équations différentielles linéaires) est due au fait que seules ces dernières disposent de solutions analytiques connues. Cependant, il est évident que la plupart des systèmes physiques étudiés sont fondamentalement non linéaires. Certains systèmes non linéaires peuvent être linéarités et peuvent ainsi être étudiés, sous certaines hypothèses, dans le cadre de la théorie des systèmes linéaires. En réalité, le modèle d'un processus donné n'est jamais parfait; par conséquent, on commet immanquablement une erreur de modélisation.

1.4 Définition de la modélisation

La modélisation est un problème épineux, car pour savoir modéliser des systèmes électriques, mécaniques, thermiques, hydrauliques et autres, il faudrait être tout à la fois électricien, mécanicien, thermicien, hydraulicien, etc. Aussi une bonne modélisation est souvent le fruit d'une collaboration entre l'automaticien et un ou plusieurs spécialistes des disciplines que nous avons citées ; encore le premier doit avoir une culture scientifique suffisamment large pour pouvoir entretenir avec les seconds un dialogue fécond.

Le modèle est donc un ensemble de relations mathématiques décrivant le comportement d'un système dynamique.

1.5 Intérêt de la modélisation

Le model ne doit pas seulement définir la structure, mais aussi ce que les paramètres veulent vraiment signifier. En disposant d'un modèle, on évite d'avoir à faire des mesures sur le système réel pour chaque cas à analyser et l'on peut ainsi limiter les coûts (durée des essais, déplacements, …) et parfois les risques. En utilisant un simulateur (par exemple MATLAB, SysQuake, …). Il existe également des situations où le système réel n'existe pas encore!

De plus certaines propriétés (le gain statique, la structure notamment, …) du système apparaissent plus clairement si le modèle de connaissance est établi, ce qui permet par exemple de déterminer précisément les modifications à entreprendre sur une installation afin de rendre son asservissement plus performant.

1.6. Types de modèle

1.6.1. Modèle de connaissance ou bien boite blanche

Les lois physiques qui gouvernent le système sont incluses dans le modèle mathématique du système. Ce modèle, ainsi construit sur la base de lois physiques, est appelé modèle de connaissance. La modélisation de connaissance est donc la phase d'un projet d'automatique consistant à obtenir les équations (différentielles) régissant le système.

.

Dans ce cas les équations sont déterminées par l'écriture des lois physique régissant le comportement du système dynamique.

1.6.2. Modèle de comportement ou bien boite noire

On l'appel aussi le model entrée/sortie (fonction de transfert). On détermine le modèle en choisissant une structure du premier ordre ou de second ordre à partir des mesures expérimentales effectués sur le système à modéliser. Les paramètres du modèle sont déterminé en utilisant des méthodes d'identification (Strejec, Broïda, Moindres carrés,…).

1.6.3. Modèle intermédiaire ou bien boite grise

Pour ce type de modèle, les équations sont déterminées par l'écriture des lois physiques régissant le comportement du système et les paramètres sont déterminés par l'identification en utilisant des mesures.

1.7. Etapes de la modélisation :

La modélisation mathématique d'un système physique passe par les étapes suivantes :

1. Définition de système : le but est de connaitre les différentes variables et les différentes constantes du système, le point de fonctionnement et sa nature (linéaire, non linéaire, …).
2. Hypothèses simplificatrices : la modélisation nécessite de poser certaines hypothèses simplificatrices qui sont physiquement acceptables. Le but de ces hypothèses est de simplifier le modèle tout en traduisant de manière fiable le comportement dynamique du système.
3. Ecriture des lois de la physique : cette étape est importante et consiste à écrire correctement les différentes lois de la physique régissant le comportement dynamique du système.
4. Validation de modèle : une fois le modèle est établi, une comparaison du comportement dynamique du système et celui du model physique est indispensable pour valider le modèle. Dans le cas contraire, on doit revoir l'étape de modélisation.

1.8. Identification des systèmes

1.8.1 Définition

L'identification des systèmes dynamiques consiste à proposer une structure pour le modèle et à déterminer ses paramètres en utilisant des mesures entrée-sortie.

1.8.2. Etapes d'identification

Les différentes étapes pour l'identification d'un système dynamique sont donnés par l'organigramme suivant.

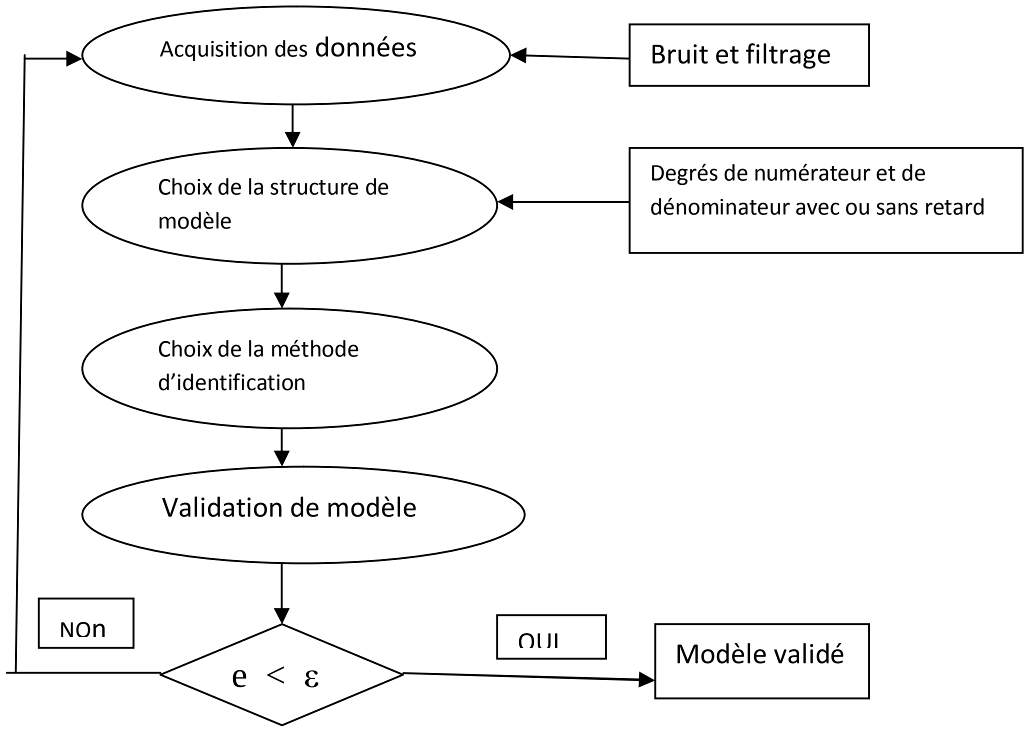


Figure 1. Schéma explicatif du chemin à suivre pour identifier le modèle d'un système dynamique

Acquisition des données : cette première étape consiste à choisir l'entrée comme signal d'excitation possédant une densité spectrale homogène pouvant couvrir l'ensemble de la bande passante du procédé à identifier.

Choix de la structure du modèle : cette étape consiste à choisir le modèle de comportement du système (fonction de transfert) en fixant l'ordre des polynômes (numérateur et dénominateur) de la fonction de transfert. Cependant une modélisation, une expérience humaine ou un algorithme peuvent être utilisé comme procédures pour fixer l'ordre de la fonction de transfert à partir des mesures.

Choix de la méthode d'identification : pour les signaux d'excitation possédant de faibles amplitudes, la sortie mesurée sera accompagnée d'un bruit. En effet, ce dernier introduit des biais (erreur d'estimation paramétrique) et généralement il est très difficile de caractériser le type du bruit d'où la nécessité d'introduire à chaque fois une hypothèse sur ces structures puis choisir un algorithme d'estimation paramétrique approprié et enfin tester la validation du modèle obtenu.

Validation du modèle : la dernière étape d'identification est l'étape de validation du modèle. Parmi les procédures les plus utilisées, on trouve celles de type statistique. Le but recherché est de montrer que la sortie du modèle excité par le même signal que le système reproduit les variations de la sortie causées par le signal de commande en s'affranchissant de l'effet du bruit de mesure.

1.8.3. Méthodes d'identification

Plusieurs méthodes ont été développées pour l'identification des systèmes, ces méthodes peuvent être classées en trois grandes familles :

- méthodes graphiques,
- méthodes numériques,
- méthode du modèle.

a. Méthodes graphiques

Elles sont basées sur les réponses temporelles indicielle, impulsionnelle ….etc. du système, elles ne permettent pas d'avoir des résultats bien précis mais elles donnent des renseignements intéressants sur la dynamique de ce système.

b. Méthodes numériques

Sont des méthodes basées sur l'utilisation des algorithmes, on trouve deux types de méthode: méthodes récursives et méthodes non récursives.

- Méthodes non récursives : elles traitent les données (entrées-sorties) obtenues sur un horizon de temps et calculent les paramètres du modèle.

- Méthodes récursives : ces méthodes traitent les données (entrées-sorties) à chaque instant, elles permettent de calculer à chaque instant le nouvel estimé du vecteur des paramètres du système.

c. Méthode du modèle

Cette méthode, permet de minimiser l'écart quadratique entre la sortie du système mesurée aux différents instants de l'expérience et la sortie du prédite par le modèle $y_m(t)$, expression mathématique en fonction des paramètres à identifier. Ces paramètres sont identifiés en utilisant des méthodes d'optimisation numérique.

1.9 Représentation mathématiques d'un système dynamique

Le modèle mathématique d'un système dynamique peut être donné sous forme :

- d'équations différentielles,
- fonction de transfert,
- représentation d'états.

1.9.1. Equations différentielles

L'écriture des équations de la physique régissant le fonctionnement du système conduit généralement à des équations différentielles ordinaires liant les différentes variables caractéristiques du système. En faisant des manipulations mathématiques, on se ramène à une seule équation différentielle liant l'entrée du système u(t) et la sortie y(t), c'est-à-dire

$$f(y^n(t), \dots, y(t), u^m(t), \dots, u(t)) = 0 \tag{1.1}$$

Dans le cas linéaire, on a :

$$a_n y^n(t) + \cdots + a_1 y(t) + a_0 = b_m u^m(t) + \cdots + b_1 u(t) + b_0 \tag{1.2}$$

1.9.2 Fonction de transfert

La fonction de transfert constitue un modèle de comportement obtenu, généralement, par identification ou par le calcul de la transformée de Laplace de l'équation différentielle (1.2) régissant la dynamique entrée-sortie du système. La fonction de transfert est utilisée seulement pour représenter des systèmes linéaires. Pour le cas des systèmes non linéaires, la fonction de transfert est utilisée en considérant un point de fonctionnement.

La modélisation par fonction de transfert conduit à la fonction de transfert suivante :

$$G(s) = \frac{b_m s^m + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \cdots + a_1 s + a_0} \tag{1.3}$$

avec $m < n$. La variable s représente la variable de Laplace.

1.9.3 Représentation d'état

La représentation d'état est obtenue en écrivant les différentes lois physiques régissant la dynamique du système en s'arrangeant à avoir que des équations différentielles du premier ordre. Le modèle d'état est donné comme suit :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \tag{1.4}$$

$$y(t) = h(x(t), u(t), t) \tag{1.5}$$

Les équations (1.4) et (1.5) représentent respectivement l'équation d'état et l'équation de sortie. $x(t) \in \Re^n$ est le vecteur d'état, $u(t) \in \Re^m$ est le vecteur de commande, $y(t) \in \Re^r$ est le vecteur de sortie.

Remarque : le passage d'une représentation à une autre est toujours possible. Par exemple, on peut passer de l'équation différentielle à la représentation d'état ou inversement.

1.10 Utilisation du modèle

Un modèle mathématique représente une représentation abstraite du système dynamique. En automatique, un modèle mathématique est utilisé en simulation pour évaluer les performances du système en boucle ouverte, pour l'analyse des propriétés fondamentales du système (commandabilité, observabilité et stabilité), et pour la synthèse des lois de commande. Pour qu'il soit exploité, un modèle mathématique ne doit pas être complexe et trop simplifié.

Pour certains systèmes complexes, composés de plusieurs parties électriques, mécaniques, hydrauliques, un automaticien ne peut pas écrire son modèle mathématique mais plusieurs spécialistes doivent être associés pour obtenir leurs modèles mathématiques.

1.11. Conclusion

Ce premier chapitre a été consacré à des notions relatives au système, au modèle et à la notion de modélisation. Les différentes méthodes utilisées pour déterminer un modèle mathématique ont aussi présentées suivi des différentes représentations du système. La complexité de certains systèmes dynamiques a poussé les spécialistes de la modélisation à proposer un langage unifié pour pouvoir modéliser un système dynamique. Ce langage de modélisation est appelé Bond Graphs. Le chapitre suivant est consacré à cet outils de modélisation.

CHAPITRE II. LES BOND GRAPHS

1. introduction

Le bond graph est un langage graphique qui constitue un intermédiaire entre le système physique que l'on étudie et la formulation mathématique nécessaire à sa modélisation. La conception d'un bond graph ou graphe de liens repose sur l'échange d'énergie entre les éléments du système étudié et s'appuie sur la notion de causalité. Cette prise en compte de la causalité représente un avantage majeur de cette approche. D'autres formalismes, tels les graphes de fluences ou les graphes d'interconnections de ports, ne prennent pas en compte cet aspect. Afin de préciser cette notion de causalité nous prendrons deux exemples : Si nous sommes dans le domaine mécanique, pour une masse en mouvement, la force constitue la cause et la vitesse l'effet. En électronique, l'évolution de la tension aux bornes d'un condensateur est la conséquence du courant le traversant. La méthodologie des bond graphs suppose que le système soit à paramètres localisés, dans ce cas, il est possible de décomposer l'ensemble étudié en éléments appelés *ports*. Entre ces *ports* l'énergie est transmise, celle-ci se décomposant entre un *effort* et un *flux*, ces dénominations générales pourront se décliner dans plusieurs domaines de la physique. Cette dernière remarque constitue un autre atout de la représentation d'un système par bond graphs. En effet, il sera possible avec le même formalisme, de représenter des phénomènes électriques, mécaniques, thermiques, chimique. Avant d'entrer dans les détails du formalisme par bond graph nous allons spécifier ses principales caractéristiques.

*C'est un langage unifié quelque soit le domaine physique considéré.

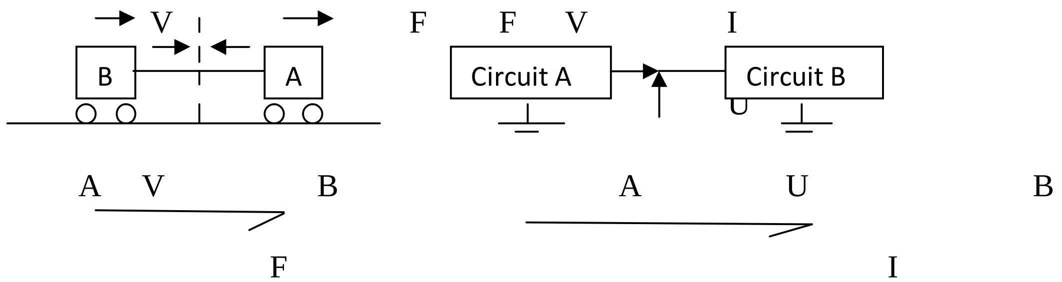
- *Il est basé sur une formulation énergétique des échanges entre les sous systèmes ;

Afin de décrire la variété des phénomènes dans différents domaine de la physique une typologie d'éléments que nous détaillerons ultérieurement est définie.

- Source idéale d'énergie
- Stockage d'énergie
- Dissipation d'énergie
- Transformation et conversion de l'énergie

2. Liens et ports.

2.1 Définitions. Comme nous venons de l'entrevoir, cette approche permet de représenter les échanges d'énergie en terme de *flux* et d'*effort* entre les éléments du système physique appelé *ports*. Ainsi si le véhicule A entraîne la charge B, la force de traction F sera l'*effort* et la vitesse le *flux* ; la demi-flèche donne alors le sens de passage de l'énergie.

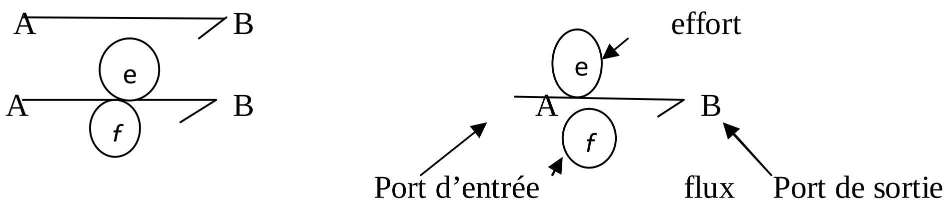


Entrainement mecanique Circuit eleclectrique

. Figure 2.1 Conventions d'un lien

Dans le domaine électrique, lorsque le circuit A alimente le circuit B, la tension U représente l'*effort* et le courant I le *flux* (au sens des bond graphs).

Pour résumer, si deux composants d'un système physique s'échangent de l'énergie. Par convention la demi-flèche appelée *lien* indique le sens du transit. Pour ce sens, le transfert de la puissance sera considéré comme positive. Par convention, A sera le port d'entrée et B le port de sortie.



Représentations d'un lien entre deux ports

Le lien comportera deux grandeurs, la variable de *flux* notée *f* est une variable extensive et correspond à un nombre de particules par unité de temps. La variable d'*effort*, notée ***e*** est une variable intensive indépendante de toute quantité de matière. La variable *f* de *flux* est notée du coté de la demi-flèche et l'*effort e* sur le coté opposé. Le produit de l'*effort* par le *flux* représente la puissance échangée. Lors de l'élaboration d'un bond graph, chaque élément est schématisé par un ensemble de ports communiquant par des liens indiquant le sens de transfert de la puissance. Pour des ensembles importants, il est parfois utile de faire une analyse plus macroscopique en définissant des sous-systèmes, dans ce cas le bond graph à mots est utilisé. Afin d'illustrer cette approche, pour un véhicule électrique, une analyse par bond graph à mots donne la décomposition suivante :

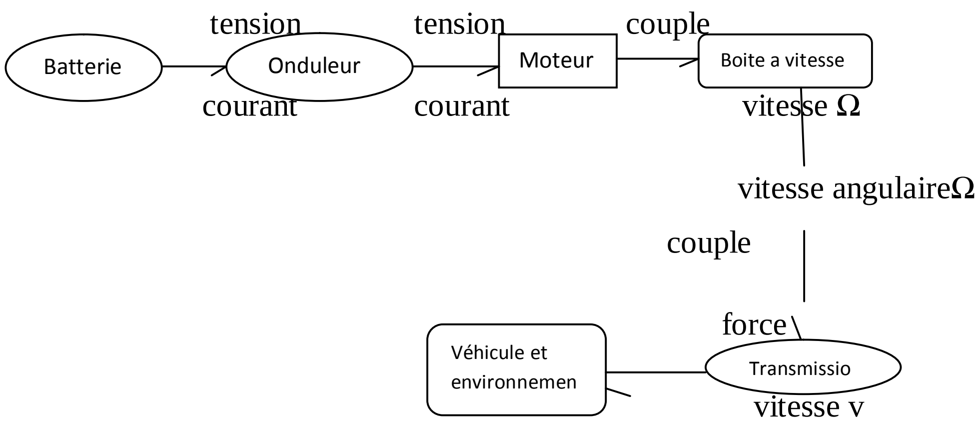


Figure Bond graph à mots

2.2 Expressions de la puissance et de l'énergie

A partir des grandeurs de *flux* et d'*effort* d'autres variables peuvent être définies :

2.2.1 La variable de puissance (P)

La puissance échangée résulte du produit d'un *flux* par un *effort* : P = *e* + *f*

Exemples :

En mécanique l'*effort,* est la force ou le couple et le *flux* la vitesse linéaire ou angulaire, nous aurons dans ce domaine les expressions classiques

P= F. V avec la *force* en newton et le *flux* en m/s.

P= C ·ω Ici la *force* correspond au couple en Nm et le *flux* à la vitesse angulaire en rad/s.

2.2.2 La variable de moment généralisé p(t)

Le *moment généralisé* noté *p*(t) correspond à l'intégrale de l'*effort :* $P(t)= {}_0\int^t e(\tau)\, d\tau + p(0)$

Exemples :

<u>Domaine électrique</u>.

Ici l'*effort* et le *flux* sont représentés, respectivement par la tension et le courant, il vient :

$p(t)={}_0\int^t V(\tau).d\tau + p(0)$

<u>Domaine mécanique.</u>

Pour un mouvement de translation, l'*effort* est la force et le *flux* la vitesse linéaire. Dans le cas d'une translation $p(t)= {}_0\int^t F(\tau).d\tau + p(0)$

Ici, le *moment généralisé* p(t) représente l'impulsion en N.s. Pour les mouvements de rotation, l'*effort* est le couple et le *flux* la vitesse de rotation angulaire.

En rotation $p(t)= {}_0\int^t C(\tau).d\tau + p(0)$ et le *moment généralisé* p(t) sera l'impulsion angulaire en Nms.

2.2.3 La variable de déplacement généralisé q(t)

Cette notion de *déplacement* est la grandeur duale du *moment généralisé*. Cette variable s'exprime par l'intégrale du *flux* soit : $q(t)= {}_0\int^t f(\tau).d\tau + q(0)$

Exemples :

<u>Domaine électrique</u>.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'*effort* et le *flux* correspondent respectivement à la tension et au courant. $q(t)={}_0\int^t I(\tau).d\tau + q(0)$

Dans le domaine électrique le *déplacement* représente la charge en Coulomb.

<u>Domaine mécanique</u>.

Pour un mouvement de translation $q(t)= {}_0\int^t V(\tau)\, d\tau + q(0)$.

L'intégrale de la vitesse est ici le déplacement exprimé en m. $x(t)= x_0 + {}_0\int^t V(\tau)\, d\tau$.

C'est de la particularité, de cette variable dans le domaine mécanique, que vient la dénomination de *déplacement*.

Pour un mouvement en rotation $q(t)= {}_0\int^t \omega(\tau).d\tau + q(0)$.

L'intégration de la vitesse angulaire donne l'angle, dans ce domaine le *déplacement* correspond donc à la rotation angulaire exprimée en rad. $\theta(t)= \theta_0 + {}_{t0}\int^t \omega(\tau)\cdot d\tau$

2.2.4 Variable d'énergie E(t).

L'énergie correspond à l'intégration de la puissance : $E(t)= E(0) + {}_0\int^t e(\tau).f(\tau).d\tau$.

Exemples :

<u>Domaine électrique.</u>

Dans le domaine électrique nous aurons : $E(t)= {}_0\int^t V(\tau).I(\tau)d\tau + E(0)$

<u>Domaine mécanique</u>.

Pour un mouvement de translation l'*effort* est la force et le *flux* la vitesse linéaire. En rotation l'*effort* est le couple et le *flux* la vitesse de rotation.

En translation $E(t)={}_0\int^t F(\tau).V(\tau).d\tau + E(0)$.

En rotation $E(t)={}_0\int^t C(\tau).\,\omega(\tau).d\tau + E(0)$.

2.3 Variables de flux et d'effort.

Résumé des variables d'effort et de flux :

Domain	Effort *e*	Flux *f*	Moment p	Déplacement q
Electrique	La tension en Volt	Le courant en ampère	Impulsion p en V.s	
Magnétique	La force magnétomotrice	La dérivé du flux magnétique	……………	Le flux magnétique
Mécanique de translation	La force en N	La vitesse en m/s	Impulsion p en N.s	Déplacement en mètre
Mécanique de rotation	Le couple en Nm	La vitesse en rad/s	Impulsion p en N.m.s	Angle en radian
Hydraulique	Pression en pascale (N/m^2)	Débit	………..	Volume en M^3
Thermique	Température en ^0K	Dérive de l entropie S	………..	Entropie S
Chimique	Potentiel chimique µ	Flux molaire	………..	Nombre de moles

3. Eléments du langage bond graph

Les phénomènes mis en jeux sont analysés en termes de sources d'*effort* et sources de *flux*. La puissance étant le produit d'un *effort* par un *flux*.

Nous allons distinguer 3 types d'éléments : Les éléments actifs, les éléments passifs, les éléments détecteurs, les jonctions et les éléments de transformation.

3.1 Les éléments actifs

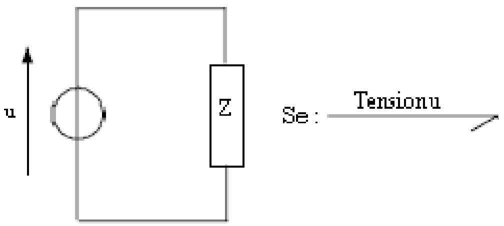
Dans un système, l'énergie peut être apportée soit par une source d'*effort* soit par une source de *flux*. Dans le domaine électrique, ce sont respectivement les sources de tension et de courant. Ces sources sont orientées par une demi-flèche opposée à la source considérée.

3.1.1 Source d'effort

La variable *effort* est supposée indépendant du *flux* fourni par la source. Pour une source de tension, cela revient à dire que sa résistance interne est nulle.

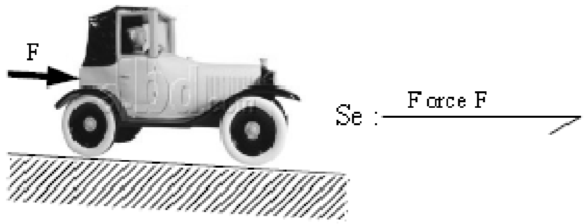
Exemples : Source d'efforts (Se)

Domaine électrique.



Source de tension, alimentation par une nulles et source d'impédance nulle.

Domaine mécanique.



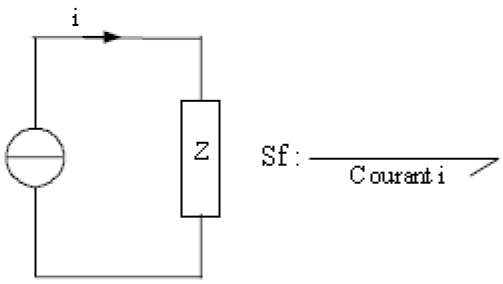
Moteur d'entraînement ayant des pertes fournissant une force de propulsion F.

3.1.2 Source de flux

Ici cette source est la duale de la précédente. Dans le domaine électrique cela correspond à une source de courant d'impédance infinie.

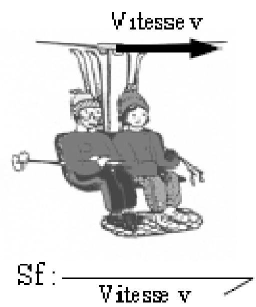
Exemples. S *f*

Domaine électrique.



Source de courant, alimentation par.
une source d'impédance.
-

Domaine mécanique.



Moteur d'entraînement ayant une inertie infinie et fournissant une vitesse constante.

3.2 Eléments passifs

Ce sont les éléments passifs qui dégradent l'énergie en chaleur, une résistance électrique, le frottement qui s'oppose à un mouvement…etc.

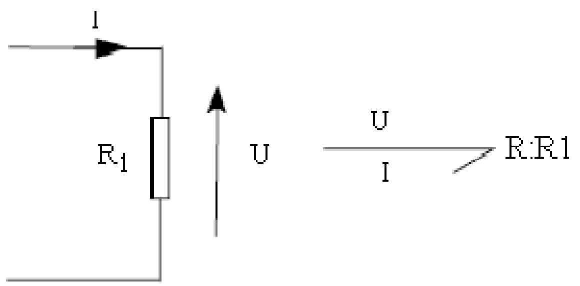
3.2.1 Elément R.

Cet élément est utilisé pour modéliser un phénomène physique liant les variables *flux* et *effort*, la puissance étant dissipée sous forme calorifique.

Dans le domaine électrique se sont les résistances, en mécanique, les amortisseurs ou tout phénomène de frottement, en hydraulique une restriction. En fait tout phénomène dégradant l'énergie en chaleur.

Exemples:

Domaine électrique.

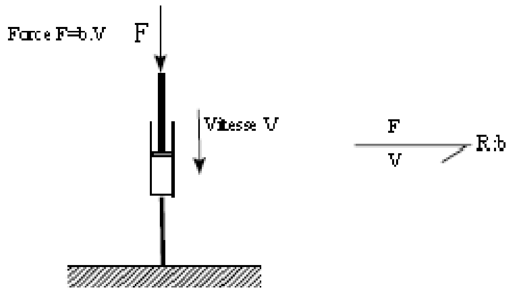


.

La résistance : Puissance dissipée P= U. I=R.I^2.

.

Domaine mécanique.



Frottement. S'opposant à un déplacement.

Frottement sec ; F constant,

P= V .F

Frottement fluide ; F= b. V · P= V. F = b. V^2.

3.2.2 Eléments de stockage

Les éléments de stockage sont des éléments passifs mais réversibles en énergie. Un barrage accumule de l'énergie potentielle, une inertie en rotation stocke de l'énergie cinétique. Dans le domaine électrique, un condensateur contient une quantité d'électricité et une inductance de l'énergie magnétique. Deux types d'éléments de stockage existent selon qu'ils accumulent un *flux* ou un *effort*.

3.2.3 Elément C (stockage de type potentiel)

Cet élément prend en compte le stockage d'un *effort*. L'élément C est utilisé pour tout phénomène physique liant la variable d'*effort* à la variable de ***déplacement***, ce stockage est dit *potentiel*.

Le déplacement est défini par la relation $q = q_c(C, e)$ dans le cas linéaire $q = C \cdot e$.

L'énergie stockée peut s'exprimer : $E(t)= {}_0\int^t e(\tau).\, f(\tau).d\,\tau + E(0)$

Le déplacement s'exprimant vis-à-vis du *flux* par : $q(t)= {}_0\int^t f(\tau).d\,\tau$, il vient :

$E(q)={}_{q0}\int^q e(q).\, dq + E(q0)$.

Exemples :

<u>Energie stockée dans un ressort</u>.

Pour un ressort la force est proportionnelle à l'écrasement soit : F = k. x ;

$E(x)= {}_{x0}\int^x F(x).d\,x+E(x0)= {}_{x0}\int^x k.\, x.\, d\,x+E(x0)=K.x^2/2$

<u>Energie stockée dans un condensateur</u>.

Pour un condensateur la charge Q (***déplacement***) est reliée à la tension (***effort***) par la relation Q= C. U ;

$E(x)={}_{q0}\int^q F(q).d\,q+ E(q0)= {}_{x0}\int^x (q/C).\, d\,q+E(q0) =q^2/2C$,

si on exprime cette énergie stockée en fonction de la tension, nous retrouvons la relation classique $E=C.U^2/2$

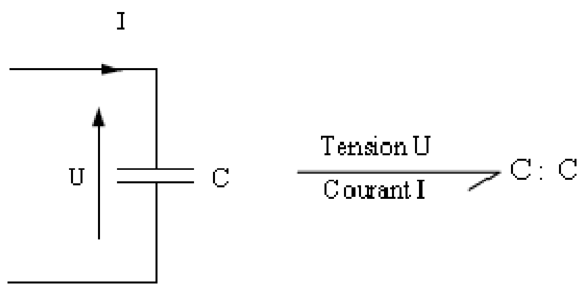
L'élément C peut s'exprimer par deux causalités :

Causalité intégrale : $e= 1/C\int f$, l'*effort* et l'intégrale d'un *flux*.

Causalité dérivée : $f=C.\, e$, le *flux* et la dérivée de l'*effort*.

<u>Exemple</u>.

<u>Domaine électrique</u> .



.

Le condensateur permet lorsqu'il reçoit un courant (*flux*) d'emmagasiner une charge électrique exprimée en Coulomb (***déplacement***).

Déplacement : $q=\int f \Rightarrow q(t)= {}_0\int^t i(\tau).d\tau$.

sachant que pour un condensateur :

$u(t)=1/c\ {}_0\!\int^t i(\tau).d\ \tau \Rightarrow q= C.\ u$ ·

Nous retrouvons la relation générique en régime linéaire e =C. q ou q représente la quantité d'électricité en Coulomb

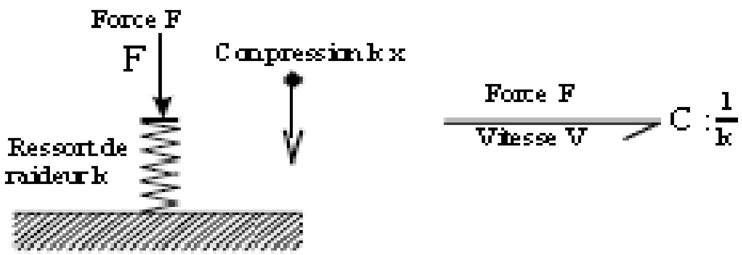
Causalité :

Pour avoir une causalité intégrale, un condensateur doit être alimenté par une source de courant la tension étant la conséquence.

En causalité intégrale : $u(t)=u0+1/C\ {}_0\!\int^t i(\tau).d\tau$.

En causalité dérivée : $i\ (t)= C.\ u(t)$.

Domaine mécanique :



Le ressort permet lorsqu'il est soumis à une vitesse (*flux*) d'emmagasiner un ***déplacement*** exprimé en mètre.

Déplacement : $q=\int f \Rightarrow q(t)= {}_0\!\int^t V(\tau).d\tau$·

Pour un ressort, la force due à la compression vaut : $F(t)= k\ {}_0\!\int^t V(\tau).d\ \tau \Rightarrow q$ =F/k et nous retrouvons comme pour le condensateur la relation valable dans le cas linéaire q= C ·e . Nous vérifions ici que le déplacement correspond à la compression x= F/ k et que la valeur de la variable C de cet élément vaut C=1/ k.

Causalité :.

En causalité intégrale : $F= F0+ k\ {}_0\!\int^t V(\tau).d\ \tau$.

En causalité dérivée : $v(t)= (1/k).F(t)$ ·

. ***3.2.4 Elément I (stockage de type inertiel).***

Cet élément permet de modéliser un phénomène physique liant la variable *flux* à la variable moment. $p = p_I\ (I\ ,f)$. Si le système est linéaire $p = I\cdot f$.

Cet élément de stockage est de type inertiel.

L'énergie stockée peut s'exprimer : $E(t)= {}_{p0}\!\int^p e(\tau)\ .f(p).\ d\ \tau +E(0)$. Le déplacement s'exprimant vis-à-vis du *flux* par : $p(t)= {}_0\!\int^t e(\tau).d\ \tau$, il vient : $E(p) = {}_{p0}\!\int^p f(p).d\ p+ E(p_0)$.

Energie emmagasinée dans une masse.

Ici p représente la quantité de mouvement $p = M.V$ ·

$E(p)= {}_{p0}\int^{p} V(p).d\,p + E(p0) = {}_{p0}\int^{p}(p/M).d\,p + E(p0) = 1.p^2/2.M = 1.M.V^2/2$, qui correspond à l'énergie cinétique.

Energie emmagasinée dans une inductance.

Dans le domaine électrique, p représente l'*impulsion* en (V. s), p =L . I.

$E(p)= {}_{p0}\int^{p} I(p).d\,p + E(p0) = {}_{p0}\int^{p} (p/L).d\,p + E(p0) = (1.p^2/2.I) = (1/2).L.I^2$, nous retrouvons la relation usuelle donnant l'énergie magnétique emmagasinée dans une inductance.

L'élément I peut s'exprimer par deux causalités :

Causalité intégrale $f= (1/I) \int e$, le *flux* et l'intégrale de l'*effort.*

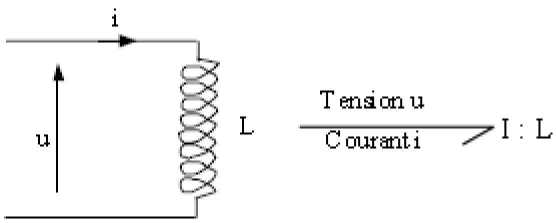
Causalité dérivée e=I. f , l'*effort* et la dérivée du *flux.*

Pour des circuits électriques le courant représente le *flux,* dans le formalisme des graphes de fluence c'est l'inductance qui représente l'élément I.

En mécanique le *flux* étant la vitesse c'est l'inertie qui est l'élément de stockage.

Exemple.

Domaine électrique.



L'inductance permet lorsqu'elle est soumise à une tension (*effort)* d'emmagasiner une *impulsion* en V.s. $p = \int e \Rightarrow p(t) = {}_0\int^t v(\tau).d\,\tau$, sachant que pour une inductance :

$i(t)=1/L\,{}_0\int^t v(\tau).d\,\tau$ $\Rightarrow$ Qui correspond bien au cas linéaire $p = I \cdot f$ pour lequel le paramètre I est l'inductance.

$p(t)= {}_0\int^t v(\tau).d\,\tau + p(o)$

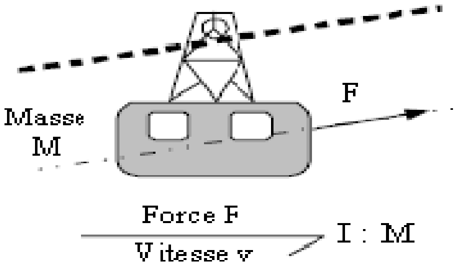
Causalité :

Avec une formulation intégrale la cause est la tension et la conséquence est le courant.

$i(t)=I(0)+(1/L)\,{}_0\int^t U(\tau).d\,\tau$

En causalité dérivée nous retrouvons la relation classique : u(t)=L.d i(t)/dt .

Domaine.mécanique :



En mécanique l'élément I est la masse M pour un mouvement de translation ou l'inertie pour une rotation.

La masse soumise à une force (*effort*) emmagasine une quantité de mouvement en Kg.m/s (*moment*). $P= \int e \Rightarrow p(t)= {}_0\int^t F(\tau).d\,\tau$, la loi fondamentale de la dynamique donne :

$V(t)=(1/M)\ {}_0\int^t F(\tau).d\,\tau$ Ce qui fourni p = M.V· qui est bien la quantité de mouvement.

Causalité :

Pour un mouvement la vitesse est la conséquence de la force. $V(t)=V0+(1/M)\ {}_0\int^t F(\tau).d\,\tau$

Avec une formulation dérivée nous rentrouvrons la loi fondamentale de la dynamique.

F(t)=M.V'(t)

3.3 Les détecteurs.

Ce sont des éléments qui placé dans le bond graph indiquent la présence d'un capteur ou d'un instrument de mesure supposé idéal. Ainsi aucune puissance n'est consommée par le détecteur, nous distinguerons selon le type de mesure faite deux type de détecteur :

3.3.1 Détecteur d'effort

$$\xrightarrow[f=0]{e}$$

Detecteur d' *effort*

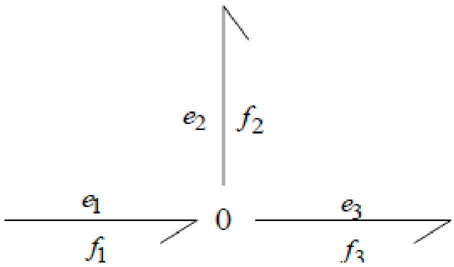
3.3.2 Détecteur de flux

$$\xrightarrow[f]{e=0}$$

Détecteur de flux

3.4 Jonctions

3.4.1 Jonction 0



La jonction 0 permet de coupler des éléments soumis à un même *effort*.

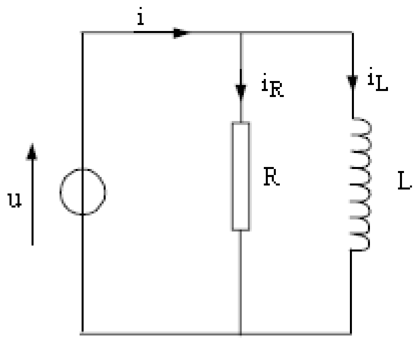
Les *efforts* sont identiques : e1=e2=e3=e

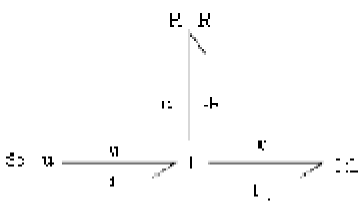
Le *flux* entrant est égal à la somme des *flux* sortants *f1=f2+f3*

Le corollaire de ces 2 propriétés se traduit par un bilan de puissance nulle e1.*f*1-e2.*f*2-e3.*f*3=0

<u>Exemple</u>.

<u>Domaine électrique</u>.



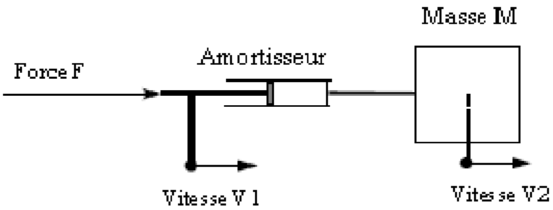


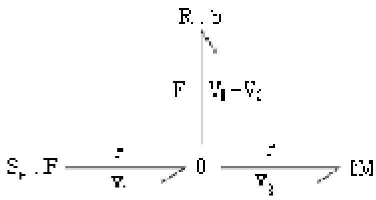
Alimentation par une source de tension d'une inductance et d'une résistance en parallèle

L'*effort* étant commun, ici la tension, la jonction 0 correspond à la mise en parallèle d'éléments . Nous retrouvons ici une source de tension **Se**, un élément dissipatif R qui dissipera par effet Joule R. i_r^2

L'inductance sera parcourue par un courant $i_L=1/L\int U$

<u>Domaine mécanique</u> :





Association série d'éléments soumis à une même force.

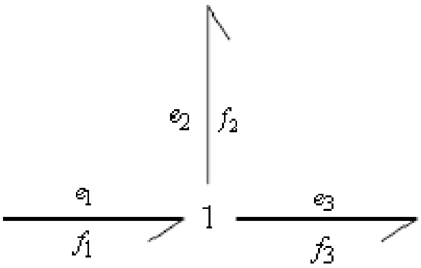
L'amortisseur est considéré sans masse, les forces sont identiques à chaque extrémité.

L'amortisseur est animé de la vitesse V3= V1- V2 et dissipera une puissance $b.V^2$.

La masse sera soumise à une force tel que : V2= 1/M ∫F.

<u>Remarque</u> : on remarque que la jonction 0 correspond pour les circuits électriques à une mise en parallèle, alors qu'avec un montage en mécanique cela correspond à un montage en série.

3.4.2 Jonction 1

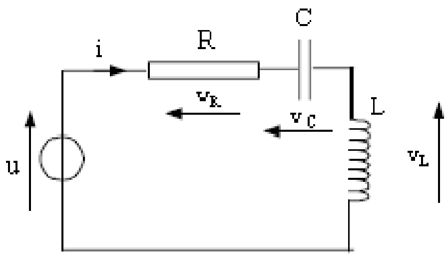


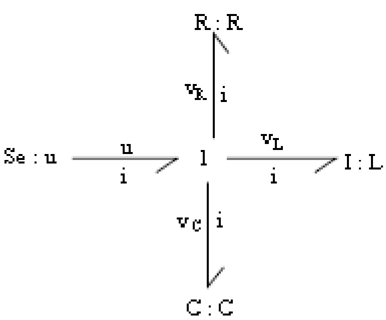
Pour une *jonction* 1, les *flux* sont communs et l'*effort* entrant est égal à la somme des *efforts* sortants. e1=e2+e3 . Comme précédemment, le bilan de puissance est nul : $e_1.f_1- e_2.f_2-e_3.f_3=0$.

<u>Exemple</u>:

<u>Domaine électrique.</u>

Une jonction 1 partageant le même *flux*, cela correspond en électricité à la mise en série de composants.

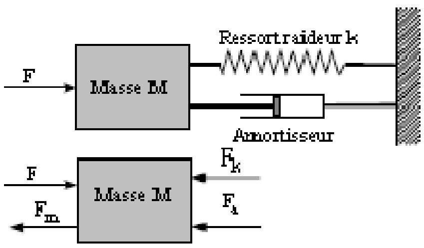


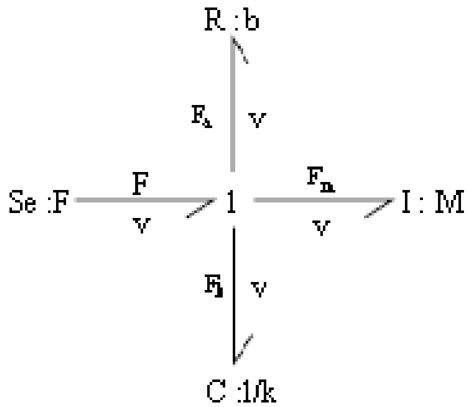


Avec cette jonction le courant est constant (*flux*). Les liens reliés aux éléments R, L et C traduisent respectivement les tensions aux bornes de la résistance, de l'inductance et du condensateur

<u>Domaine mécanique :</u>

Considérons une masse reliée à un ressort et à un amortisseur conformément au schéma de principe suivant



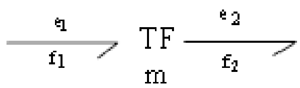


fa.fm.fk . Pour cette jonction la vitesse est commune, ce qui traduit l'état d'équilibre de la masse M. Les liens permettant de prendre en compte la force motrice (Source Se) et les forces résistantes du ressort et de l'amortisseur (liens reliés aux éléments R et C). La force d'inertie due à l'accélération correspond au lien aboutissant à l'élément I.

3.5 Eléments de transformation.

3.5.1 Transformateur TF.

Cet élément à 2 ports permet un changement des *flux* et des *efforts* tout en étant conservatif en puissance.

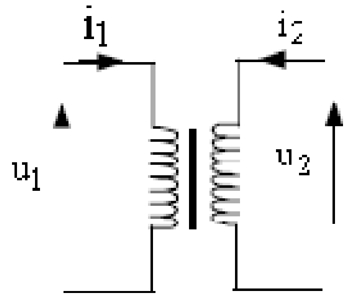


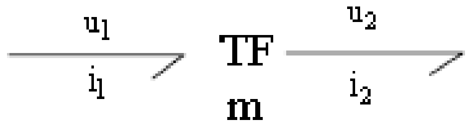
Le transformateur TF possède un coefficient de transformation *m* tel que : $e_1/e_2=f_2/f_1=m$.
Nous vérifions bien au vue de la relation précédente que le transformateur TF est conservatif en puissance puisque $P=e_1.f_1=e_2.f_2$.
Cet élément est utilisé lors de la modélisation des transformateurs électriques, en mécanique pour les leviers, les engrenages et poulies. Le transformateur intervient aussi lors des changements de domaines physiques, ainsi un vérin hydraulique peut être vu comme la transformation de pressions et débits volumiques, en force et vitesse.

<u>Exemple</u>

<u>Domaine électrique</u>.

Transformateur électrique.

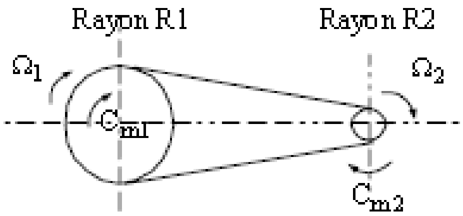


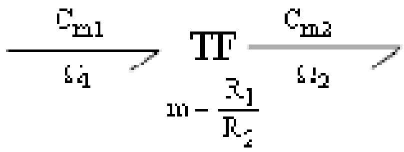


Pour un transformateur idéal sans pertes : $p=u_1.i_1=u_2.i_2$ avec $i_2/i_1=u_1/u_2=m$.

m, représentant le facteur de transformation

Transmission par courroie.





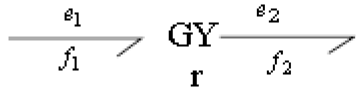
.

Si nous n'avons pas de pertes il y a conservation de la puissance. $P=C_{m1}.\,\Omega_1=C_{m2}.\,\Omega_2$

$R_1/R_2=\Omega_2/\Omega_1=C_{m1}/C_{m2}=m$.

3.5.2 Gyrateur GY.

Cet élément est comme le précédent ; conservatif en puissance, il permet de transformer un *effort* en *flux* tel que : $e_1=r.f_2$ et $e_2=r.\,f_1$.



Le gyrateur peut être utilisé pour prendre en compte les changements de domaine physique qui se font sans perte de puissance.

<u>Exemple</u>.

<u>Moteur à courant continu.</u>

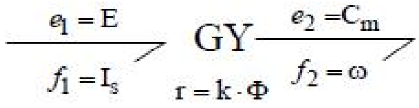
Un moteur transforme de la puissance électrique en puissance mécanique.

Pour un moteur à courant continu le couple moteur est proportionnel à une constante technologique k, au flux de l'inducteur Φ et au courant dans l'induit I s.

(Cm=K. Φ. Is) La force contre électromotrice est quant à elle proportionnelle au flux et à la vitesse, (E= k. Φ. Ω). Si nous identifions pour les variables électriques :

effort e1=E et flux f=Is et pour les grandeurs mécaniques, *effort* e2=Cm *flux f*2= ω nous aurons : E =k. Φ. ω =e1=k. Φ. *f*2 et C m=k. Φ. Is=e2=K. Φ. *f*1 ·

Domaine électrique .



.Domaine mécanique

4. Procédures de construction de modèles.

Nous allons ici présenter une méthodologie simple pour laquelle les phénomènes physiques ne sont pas couplés. Dans les domaines électriques et mécaniques les associations série / parallèle sont duales vis à vis des jonctions 1 et 0. Les lignes directrices seront donc différentes dans les deux cas.

Pour les circuits électriques :

1. Identifier tous les éléments du système étudié.

2. Identifier et nommer le point du système dont les variables d'*effort* différent (tension). Pour toutes ces valeurs d'*effort* placer une jonction 0. Fixer une référence pour l'*effort* (tension). 3. Placer des jonctions 1 entre les jonctions 0 afin de prendre en compte les relations existant entre les *flux* (courant).

4. Relier les jonctions par des liens en respectant le sens du transfert de la puissance.

5. Placer les éléments de base présents dans le circuit, soit sur l'extrémité du lien libre associé, soit sur la jonction concernée

6. Eliminer tous les liens dont le potentiel correspond au potentiel choisit comme référence, puis éliminer toutes les jonctions 0 et 1 relatives à deux liens n'introduisant pas de changement de signe.

Pour les systèmes mécaniques :

1. Identifier tous les éléments du système étudié.

2. Identifier et nommer le point du système dont les variables de *flux* différent (vitesse, courant). Pour toutes les valeurs du *flux* placer une jonction 1. Fixer un axe de référence pour le *flux* (vitesse).

3. Placer des jonctions O entre les jonctions 1 afin de prendre en compte les relations existant entre les *efforts* (tension, force).

4. Relier les jonctions par des liens en respectant le sens du transfert de la puissance.

5. Placer les éléments de base présents dans le système, soit sur l'extrémité du lien libre associé, soit sur la jonction concernée

6. Eliminer tous les liens dont le potentiel correspond au potentiel choisit comme référence, puis éliminer toutes les jonctions 0 et 1 relatives à deux liens n'introduisant pas de changement de signe.

Remarque :

Pour les systèmes électriques les jonctions 1 étant à *flux* constant (courant) les éléments de la jonction correspondent a ceux qui sont en série. Contrairement a la jonction 0 qui est à force constante (tension) représentera les éléments en parallèles.

5. Causalité d'un bond graph.

5.1 Notion de causalité.

Le bond graphs permet de représenter un système en mettant en évidence les échanges d'énergie entre les divers éléments de celui-ci. Pour élaborer la structure de calcul nécessaire à la simulation du système, il est indispensable de faire apparaître les relations de cause à effet. Lorsque 2 sous-systèmes A et B sont couplés en échangeant mutuellement *effort* et *flux,* deux situations duales peuvent se produire.

- A applique un *effort e* à B qui réagit en renvoyant à A un *flux f*.
- A applique un *flux f* à B qui réagit en renvoyant à A un *effort e*.

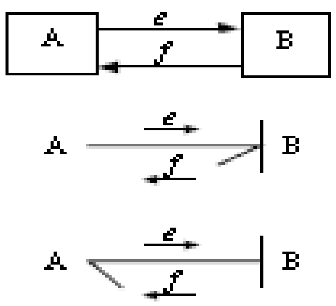


Fig1

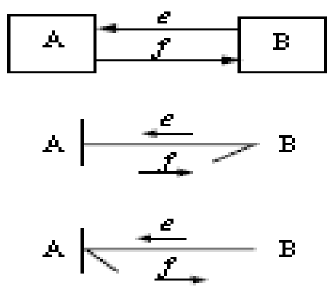
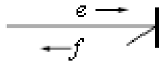
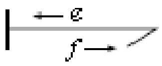


Fig2

Pour représenter ces deux situations d'échange de l'énergie, un trait causal est placé perpendiculairement au lien du coté où l'*effort* est transmis. Le *flux* évidement transitant dans le sens opposé au trait causal. Cette position du trait causal est indépendante du sens du transfert de l'énergie indiqué par la demi-flèche du lien. Sur la figure 1 l'effort est imposé de A vers B et le *flux* transite dans le sens contraire soit du port B vers le port A. La figure 2 représente la situation inverse. Nous allons aborder maintenant la causalité des divers éléments constituant un bond graph.

5.2 Les éléments actifs.

5.2.1 Source d'effort. L'*effort* étant imposé par la source, le trait causal se trouve donc sur le port du coté de la flèche. Se 

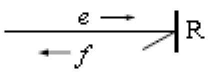
5.2.2 Source de flux. Ici la source impose le *flux* , le trait causal indiquant la causalité de l'*effort* est donc opposé au coté de la flèche. S*f* 

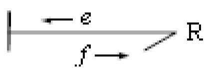
5.3 Les éléments passifs.

5.3.1 Eléments R.

Dans le cas linéaire, la causalité de cet élément est indifférenciée, en effet nous pouvons exprimer le flux en fonction de l'*effort* ou réciproquement. Nous pouvons donc obtenir les deux situations suivantes :

.



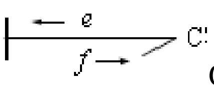


$f = e/R$ dans ce cas c'est le *flux* qui est imposé. $e = R \cdot f$ et c'est l'*effort* qui est fixé.

Lorsque l'élément R n'est plus linéaire, il se peut que la causalité ne soit plus arbitraire et que le *flux* ou l'*effort* soit imposé.

5.3.2 Elément C.

Nous avions évoqué lors de la définition de cet élément que deux causalités sont possibles :



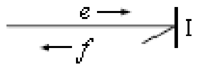
Causalité intégrale : $e = 1/C \int f$, l'*effort* est imposé par l'intégrale d'un *flux*.

Causalité dérivée : $f = C.\ e$, le *flux* est imposé avec la dérivée de l'*effort*.

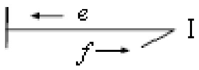
La dérivée étant à proscrire dans un schéma de simulation, seule la causalité intégrale sera à considérer.

5.3.3 Elément I.

Comme pour l'élément C, deux causalités sont possibles et seule la causalité intégrale sera à considérer.



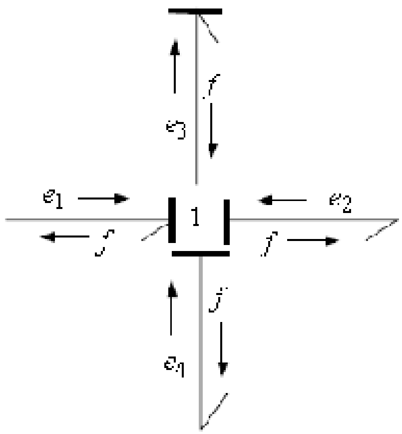
Causalité intégrale $f = 1/I \int e$, le *flux* est l'intégrale de l'*effort*.



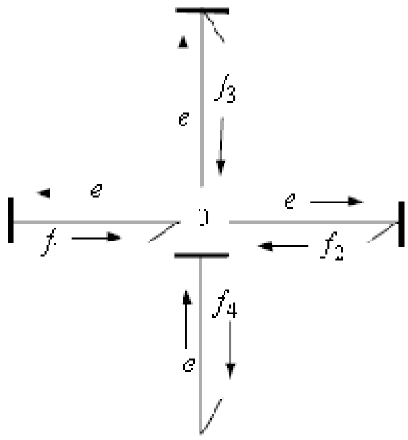
Causalité dérivée $e = I\,.f$, l'*effort* est la dérivée du *flux*.

5.4 Jonctions.

5.4.1 Jonction 1.



5. 4 .2 Jonction 0.



.

Pour une jonction 0 l'effort est commun, et les *flux* se partagent en fonctions du sens des liens. Dans cet exemple *f1=f2+f3+f4* (bilan des puissances nulles à la jonction). Pour que l'*effort* puisse être calculé, il suffit qu'une des quatre jonctions, quelque soit son sens, puisse imposer l'*effort*. Ici le trait de causalité de cette jonction correspond au lien 4, cela exprime le fait que la relation associée à ce lien assure le calcul de l'*effort e*.
<u>Règle de causalité</u> : Pour une jonction 0, un seul *effort* peut donner sa valeur aux autres, ce qui implique qu'il n'y ait qu'un seul trait causal près de la jonction.

Avec une jonction 1, les *efforts* se répartissent, l'orientation des liens fixant la relation entre ceux-ci, ici nous avons : *e1= e2+e3+e4* Il suffit déterminer le *flux* d'un seul lien, cette contrainte impose qu'il n'y ait autour de la jonction qu'un seul trait causal manquant. Dans cet exemple c'est la relation associée au lien 3 qui permet le calcul du *flux*.

Règle de causalité : pour une jonction 1 il ne doit y avoir qu'un seul lien sans trait de causalité près de la jonction.

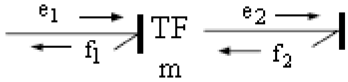
5.5 Eléments de transformation

5.5.1 Transformateur TF

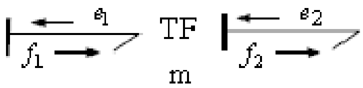
Pour le transformateur deux possibilités s'offrent pour affecter la causalité.

Nous rappelons que les relations caractéristiques d'un TF sont : $e1=m.e2$ et $f2=m.\ f1$.

Le facteur de transformation m est une relation directe entre les efforts e1 et e2 et les flux $f1$ et $f2$. Nous rappelons qu'il y a conservation de la puissance P =e1. $f1 = e2.\ f2$.



Si l'*effort* $e1$ est connu, nous aurons ($e2$= m .$e1$) au secondaire c'est le *flux* $f2$ qui est imposé et ($f1$=m/$f2$) .

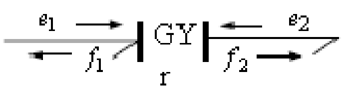


Dans le cas où le *flux* est imposé au primaire, c'est l'*effort* qui est fourni au secondaire et nous aurons ($e1$=m.$e2$ et $f2$=m.$f1$).

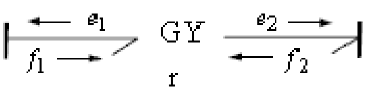
Règle de causalité : Pour une jonction TF il ne doit avoir qu'un seul trait causal près de la jonction.

5.5.2 Gyrateur GY

Ici comme son nom l'indique le gyrateur assure une relation croisée entre les *efforts* et les *flux*. ($e1=r.f2$) et ($e2=r.f1$) Comme pour le transformateur, nous avons deux possibilités d'affectation de la causalité.



Si l'*effort* $e1$ est imposé au secondaire le *flux* vaudra $f2 = e1/$r se qui ramera vers la relation $f1 = e2/$ r la causalité sur le *flux* au primaire.



Dans le cas contraire, au primaire le *flux* est imposé et au secondaire c'est l'effort.
Les relations génériques assurant le calcul sont alors : $e1 = r.f2$ et $e2 = r.f1$.

<u>Règle de causalité</u> :

Pour une jonction gyrateur, 2 traits causaux sont présents ou absents de la jonction.

5.6 Procédure d'affectation de la causalité

1- Affecter la causalité aux sources.

2- Placer les traits en causalité intégrale sur toutes les jonctions I et C.

3- Affecter les causalités aux jonctions O, 1, TF et GY.

4- Fixer des causalités aux éléments R.

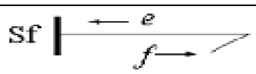
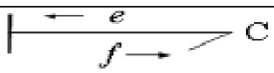
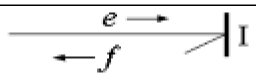
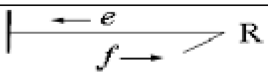
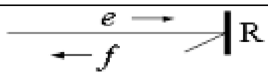
5- Rechercher les éventuels conflits de causalité. En cas de conflit problème !

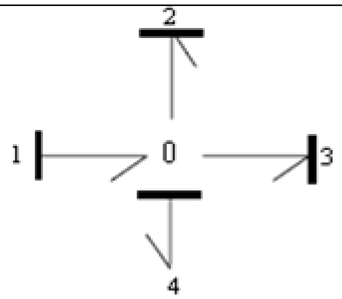
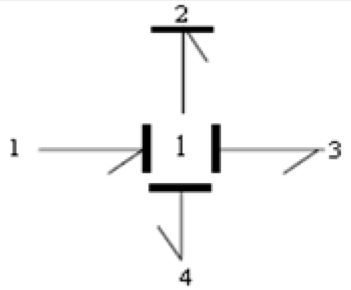
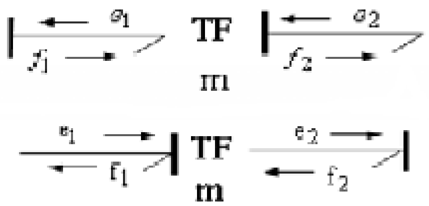
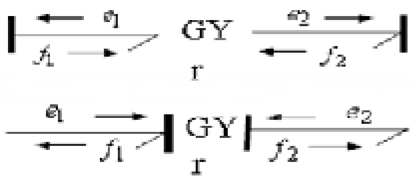
<u>Problème de causalité</u>.

Dans ce cas, il est toujours possible pour certains élément I ou C d'utiliser une causalité dérivée. Dans cette situation, il est probable que nous serions confrontés à des problèmes numériques de résolution. Il est donc indispensable, pour éviter une formulation dérivée de revoir la formulation par bond graph de notre système.
Si vous êtes confronté à un problème de causalité, il est vraisemblable que vous n'ayez pas analysé avec suffisamment d'acuité les phénomènes mis en jeu. La plupart du temps, vous avez omis de formuler un phénomène qui paraissait secondaire en terme d'importance mais primordial pour la causalité.

Dans le domaine électrique la mise en parallèle de sources de tensions ou la mise en série de sources de courants sans considérer les impédances de liaison conduisent à un conflit de causalité.
En mécanique si vous sollicitez les extrémités d'un arbre par deux sources d'*effort* (couples) sans considérer la raideur de la liaison vous aurez un problème de causalité

5.7 Récapitulatif des causalités

Causalité	**Elément**	**Loi de caractérisation**	**Cas linéaire**
Obligatoire		e est imposer par Se	
Obligatoire		*F* est imposé par Sf	
Intégrale		$e=\int f$	$e=q/C$
Intégrale		$f=\int e$	$f=P/I$
Arbitraire			$e=R.f$
Arbitraire			$f=e/R$

Eléments	Règle	Loi
	Un seul lien avec un trait causal prés de la jonction 0.	*Effort* commun imposer par *e* 4 $e1=e2=e3=e4$ Orientation énergie $f1=f2+f3+f4$ Causalité $f4=f1-f2-f3$
	Un seul lien sans un trait causal prés de la jonction 1.	*Flux imposé par f2.* $f1=f2=f3=f4$ Orientation d énergie $e1=e2+e3+e4$ *causalité* $e2=e1-e3-e4$
	Affectation symétrique de la causalité.	$e1=m.e2$ $f2=m.f1$ $e2=e1\ /m$ $f1=f2/m$
	Affectation antisymétrique de la causalité.	$e1=r.f2$ $e2=r.f1$ $f1=e2/r$ $f2=e1/r$

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'outil de modélisation Bond Graphs. C'est un outil de modélisation graphique qui a des règles de construction bien déterminées. Après avoir présentés les différents éléments d'un Bon Graph, nous avons exposé la démarche de construction et l'affectation de causalités. Le prochain chapitre sera consacré au développement d'une boite Simulink pour la simulation des systèmes dynamiques par les Bond Graphs.

Chapitre III

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, on développera une bibliothèque Simulink pour la simulation des systèmes dynamiques en utilisant l'outil de modélisation Bond Graphs. L'objectif est de créer des blocs Simulink correspondant aux éléments du Bond Graphs.

3.2 Langage de programmation utilisé

MATLAB est un langage de programmation et un environnement de développement et de simulation il est utilisé à des fins de calcul numérique. Ce langage de programmation permet la manipulation des matrices, afficher des courbes et des données, mettre en œuvre des algorithmes, créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, dans différents domaines comme l'ingénierie, les sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche. MATLAB peut s'utiliser seul ou bien avec des boites à outils. Dans notre travail, on s'intéresse exclusivement à la partie simulation en utilisent *simulink* de MATLAB. Pour y accéder on clique sur l'icône *Simulink* dans MATLAB.

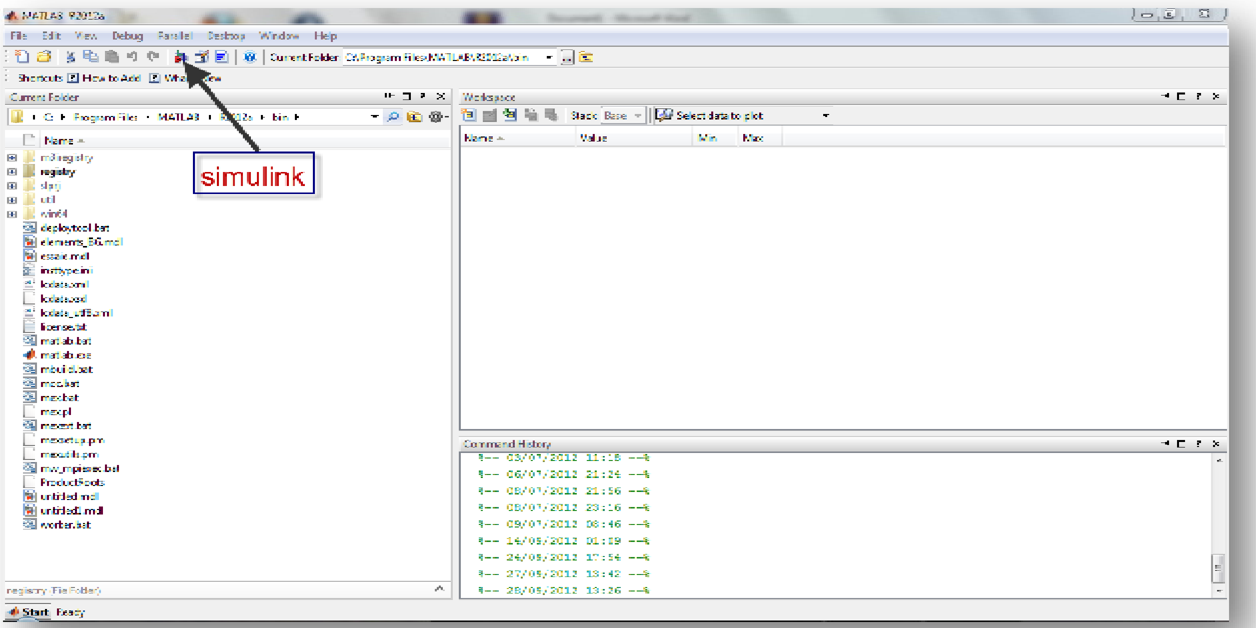


Figure 1. Interface de logiciel MATLAB 10

Simulink est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation de systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes dynamique. *Simulink* est intégré à MATLAB, fournissant ainsi un accès immédiat aux nombreux outils de développement algorithmique, de visualisation et d'analyse de données de MATLAB.

L'environnement *Simulink* peut modéliser un système, simuler son comportement, décomposer le design avant son implémentation. Avec *Simulink*, il est possible de créer des diagrammes hiérarchiques de blocs pour la modélisation haut niveau d'un système, de construire des simulations complètes, d'intégrer des composants comme un signal analogique, des communications numériques ou des logiques de contrôle. *Simulink* peut modéliser des données simples ou multicanaux, des composants linéaires ou non linéaires. Il peut également simuler des composants numériques, analogiques ou mixtes et modéliser des sources de signaux et les visualiser.

Une fois accéder à *Simulink*, une fenêtre comportent la bibliothèque (*Simulink Library Browser*) s'affiche, elle renferme tout les blocs des éléments de simulation. Pour avoir une page de simulation, on clique sur l'icône *New model.*

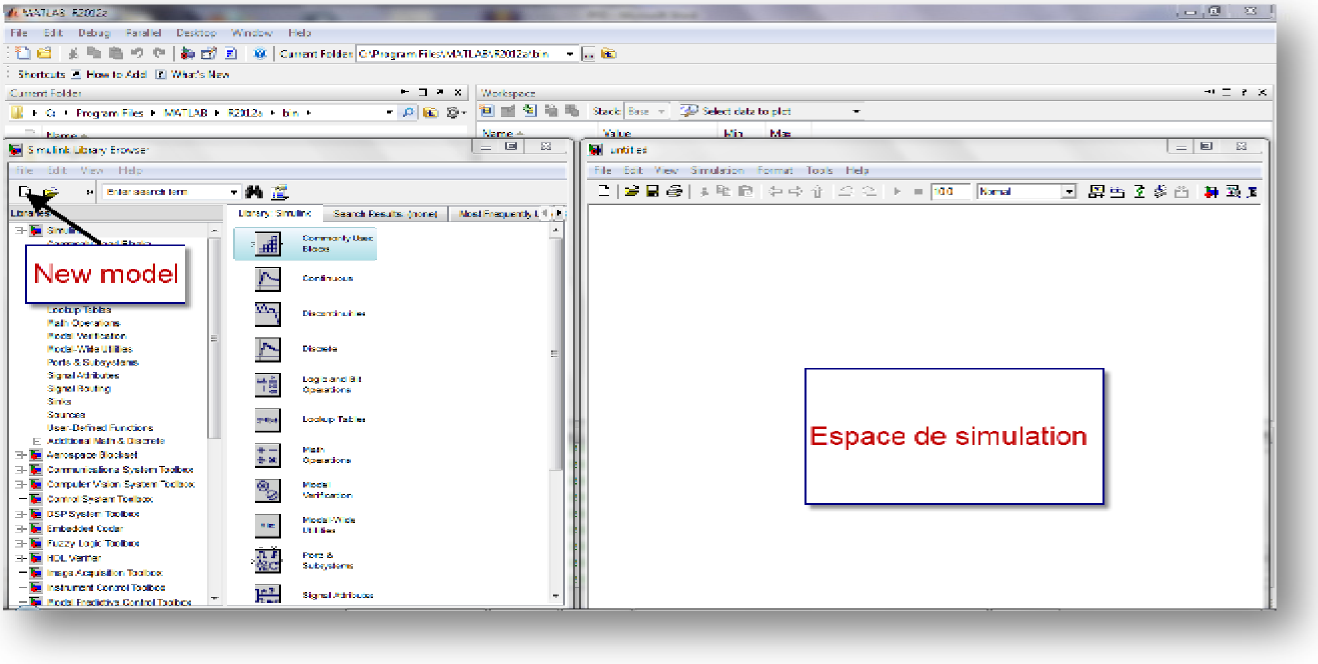


Figure 2. Bibliothèque et espace de simulation.

La bibliothèque de *Simulink* comporte plusieurs blocs d'éléments, quoique pour la réalisation des éléments de la boite BOND GRAPH, on se sert que des blocs suivants :

- **Bloc sources :** ce bloc fournie une interface qui permet d'injecte de l'énergie pour le système sous forme de flux ou effort, il regroupe différents types possibles pour sources de signal, constant, sinusoïdal, rampe, ….
- **Bloc continuous :** il contient l ensemble des éléments qui permet la manipulation des systèmes continus comme intégrateur, dérivateur, fonction de transfert, ...
- **Bloc math opérations :** il regroupe les additionneurs, les multiplicateurs, …
- **Bloc sinks :** il fournie une interface qui permet de stocker, de visualiser et d'analyser les différentes variables.

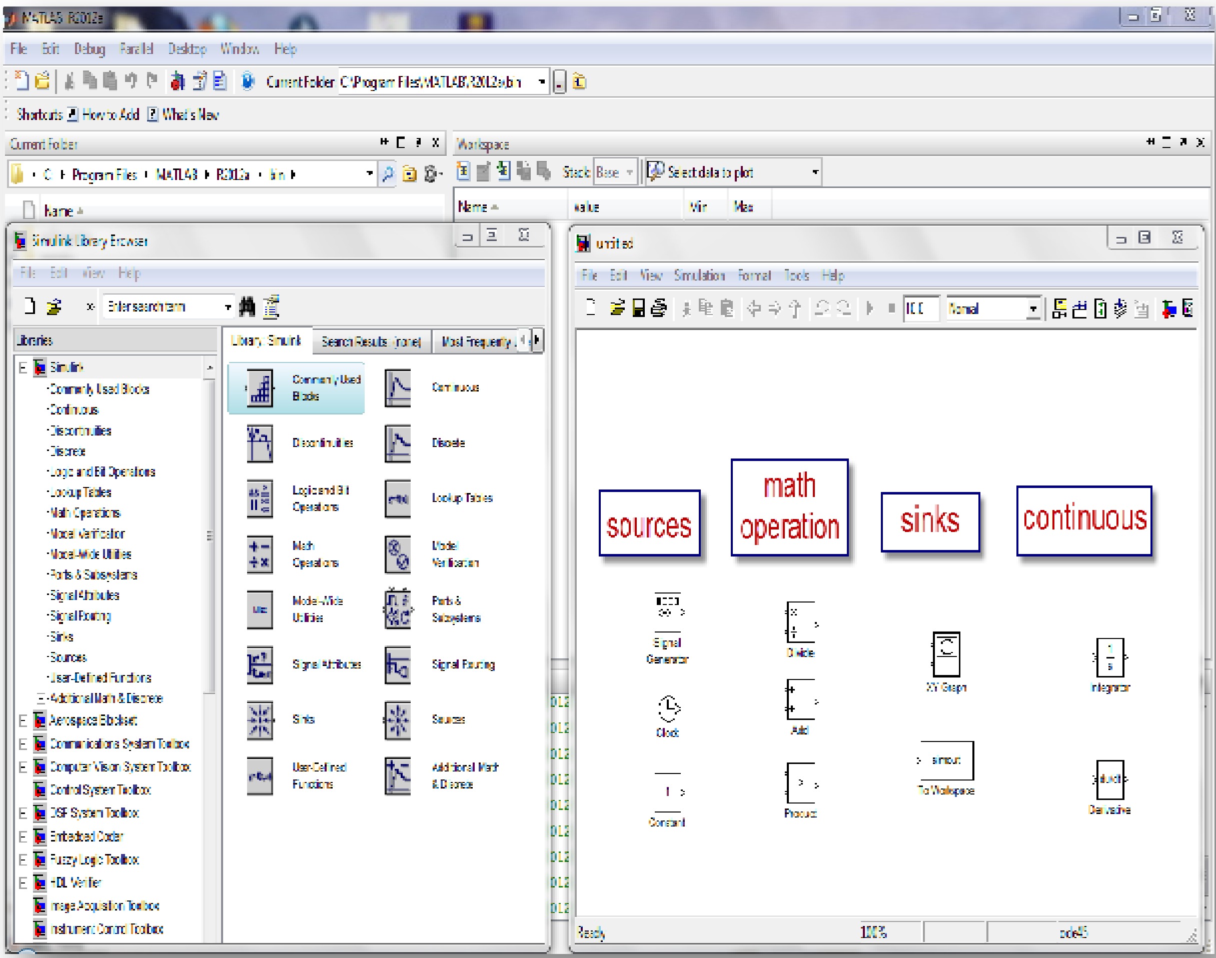


Figure 3. Les différents éléments utilisés.

3.3. Développement de la bibliothèque

La création d'un élément du Bond Graph consiste à concevoir un sous-système à partir de la bibliothèque Simulink. Le principe consiste à sélectionner les éléments fondamentales qui compose le sous-système, et on les place dans l'espace de simulation avec le bouton gauche de la sourie. Puis on effectue les différentes connexions nécessaires entres ces éléments en tenant compte des équations mathématiques qui régissent le comportement dynamique de l'élément BOND GRAPH comme est illustré par la Figure 4. Puis, on sélectionne le système construit et on clique sur le bouton droit de la souris, puis on sélectionne dans le menu déroulant l'option *Create Subsystem*, et un bloc *Subsystem* apparaît.

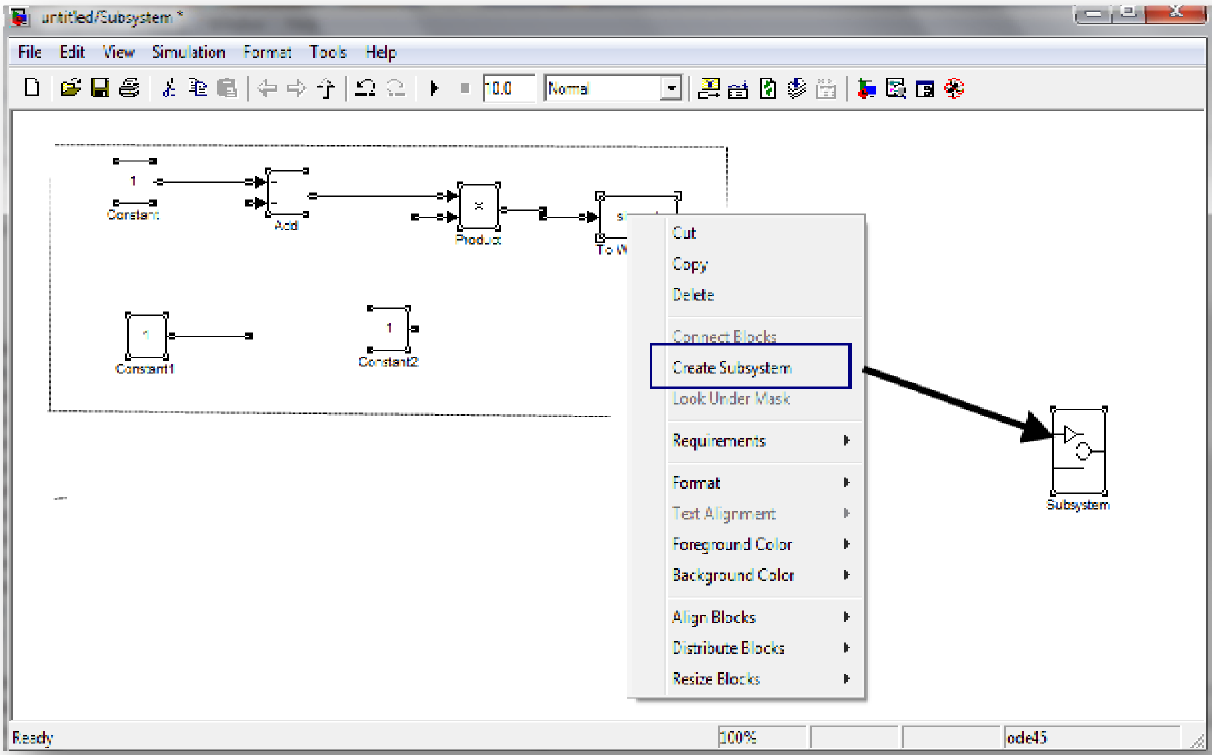


Figure 4. Création d'un sous-système sous Simulink.

L'option de l'éditeur de masque (*Mask Editor*) de Simulink permettre à l'utilisateur de personnaliser et de définir les valeurs des paramètres et l'apparence général du sous-système.

Cet éditeur est accessible en sélectionnant le sous-système et en cliquent sur le bouton droit de la souris puis dans le menu on sélectionne *Create Mask*, par la suite la fenêtre *Mask Editor* apparaît comme le montre la Figure 5.

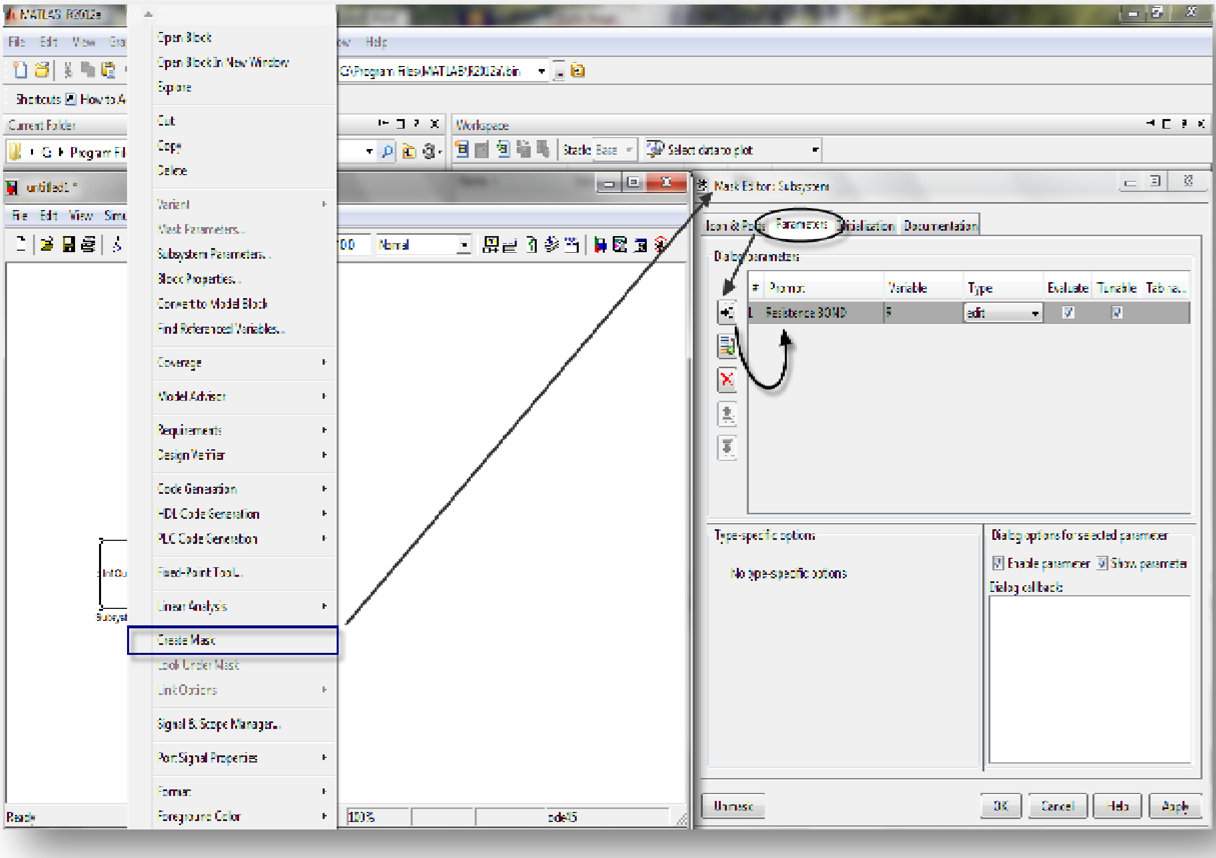


Figure 5. Fenêtre du Mask Editor.

L'éditeur de masque contient un ensemble d'onglets, chaque onglet permet de définir une fonction du masque

- **Icôn & ports :** est utilisé pour créer des icônes de sous-système qui peuvent contenir un texte descriptif, équations d'état, des images et des graphiques, ...
- **Parameters :** permet de créer et modifier les paramètres de masque qui déterminent le comportement du sous-système. En cliquent sur l'icône *paramètres* et sur la premier icône, une ligne apparaît et offre la possibilité de mentionner le nom de la variable dans le label appelé *Variable* et une abréviation dans le label appelé *Prompt.* Un sous-

système peut avoir plusieurs variables et chaque ligne est associée à une seule variable.

- **Documentation :** permet de définir ou de modifier le type, la description et le texte d'aide pour le masque de sous-système.
- **Initialization :** c'est l'initialisation par défaut.

Une fois le masque est créé, il sera prêt à utiliser. Ainsi, en cliquant sur le bloc de sous-système créé, une nouvelle fenêtre s'ouvre pour introduire les différentes valeurs des variables du système. La même fenêtre comprend le nom et la description du masque. La Figure 6 présente un exemple d'un sous-système créé correspondant à l'élément résistif du BOND GRAPH.

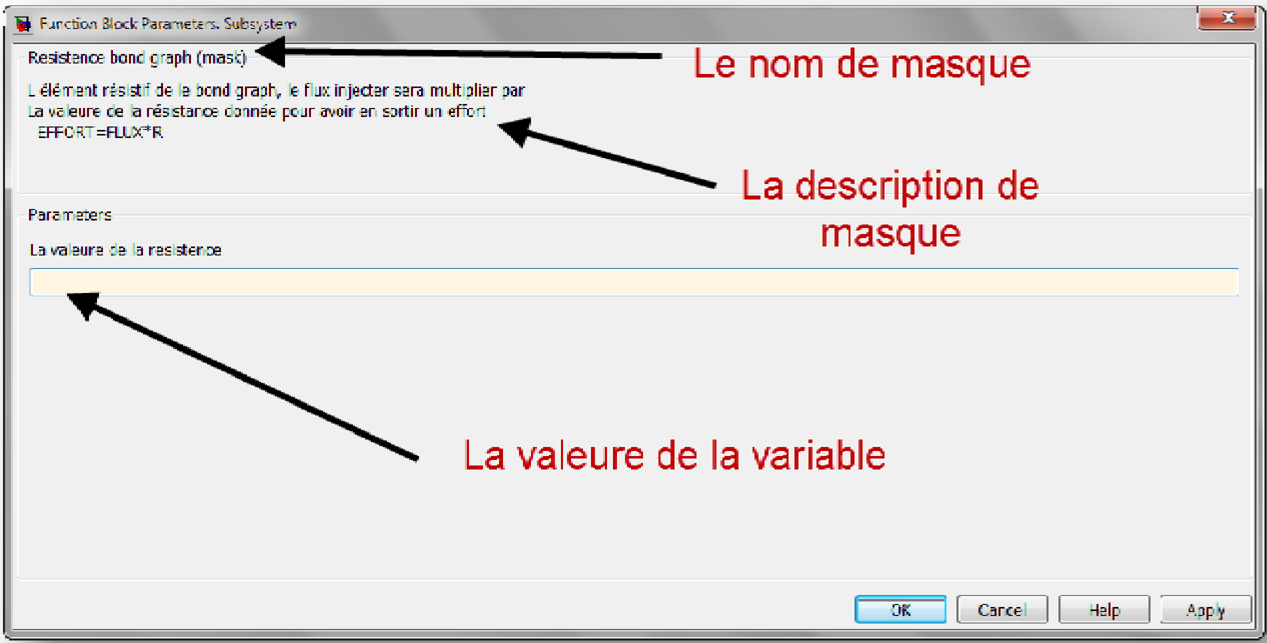


Figure 6. Exemple d'un bloc Simulink.

Remarque :

Nous peuvons toujours modifier le masque en cliquent sur le bloc de sous-système avec le bouton droit de la souris et sélectionner *Edit Mask*, et dans le même menu, on peut aussi sélectionner *Look Under Mask* qui permet de voir et de modifier la conception initial de sous-système.

3.4. Développement de la boite BOND GRAPH

La bibliothèque à développer concerne quelques éléments du BOND GRAPH. Elle regroupe les éléments suivants : Les éléments inertiel, capacitif, résistif, des sources de flux et d'effort, les jonctions 0 et 1, le transformateur, l'élément de sauvegarde (sortie), une horloge, un oscilloscope XY.

- **Jonctions 1 ou0 :** fournit une interface qui permet à l'utilisateur de simuler l'addition des flux ou des efforts. Un additionneur de *Simulink* peut être utilisé directement.
- **La source :** fournit l'énergie à injecter dans le système en tant que flux ou effort.
- **L'élément sauvegarde :** c'est l'élément de sortie qui suavegarde les variables de système dans le but de les analyser une fois la simulation terminée.
- **L'horloge :** utilisée pour la synchronisation de la simulation et pour avoir les autres variables en fonction du temps.
- **L'oscilloscope :** pour visualiser l'évolution des différentes variables du système.

Remarque :

les éléments évoqués précédemment sont tous tirés directement de la bibliothèque *Simulink.*

Dans ce qui suit, on présente les différents éléments créés de la bibliothèque Simulink développée pour la simulation des systèmes dynamiques en utilisant l'outil Bond Graphs. .

3.4.1 Elément résistif

C’est une interface qui permet à l’utilisateur de simuler le phénomène de dissipation d’énergie dans le système. La variable d’entrée est un flux et la sortie c’est l’effort. L’effort constitue l’amplification du flux en le multipliant par un gain R (valeur de la résistance).

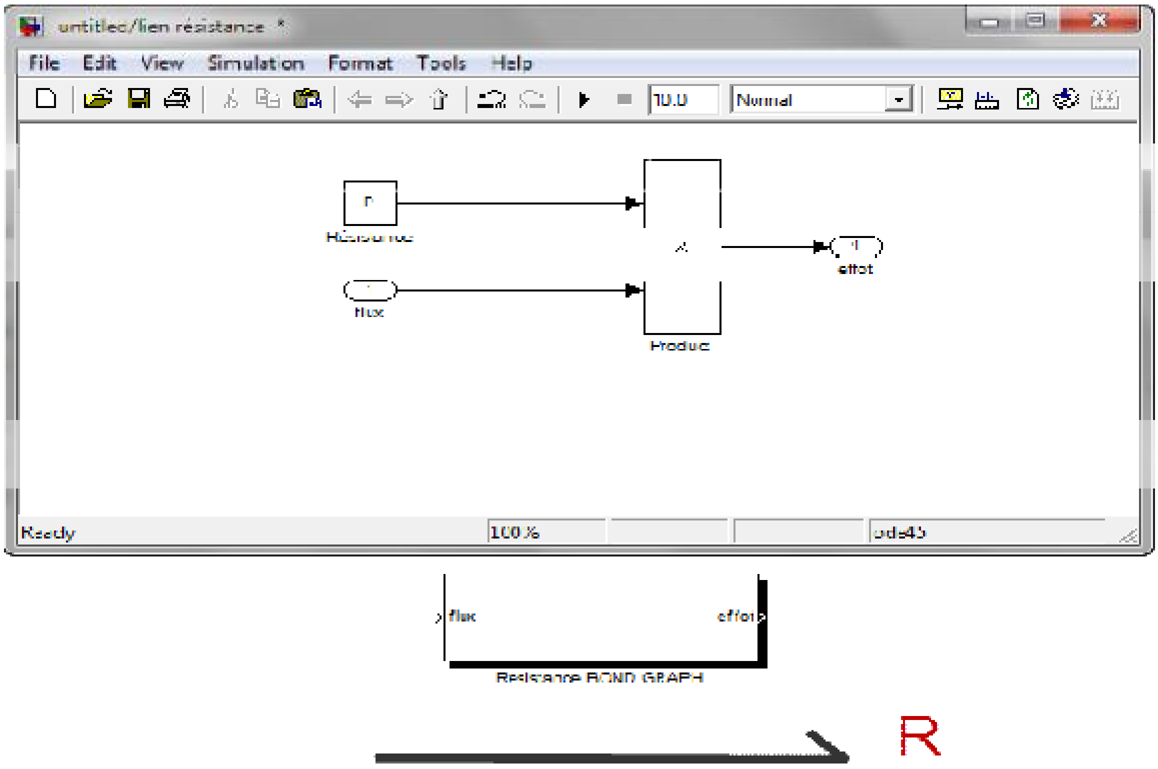


Figure 7. Bloc Simulink de l’élément résistif.

3.4.2. Transformateur

Cette interface permet à l’utilisateur de simuler les éléments en modifiant les valeurs de flux et de l’effort. Les entrées du bloc sont le flux et l’effort pondérés par les paramètres du transformateur.

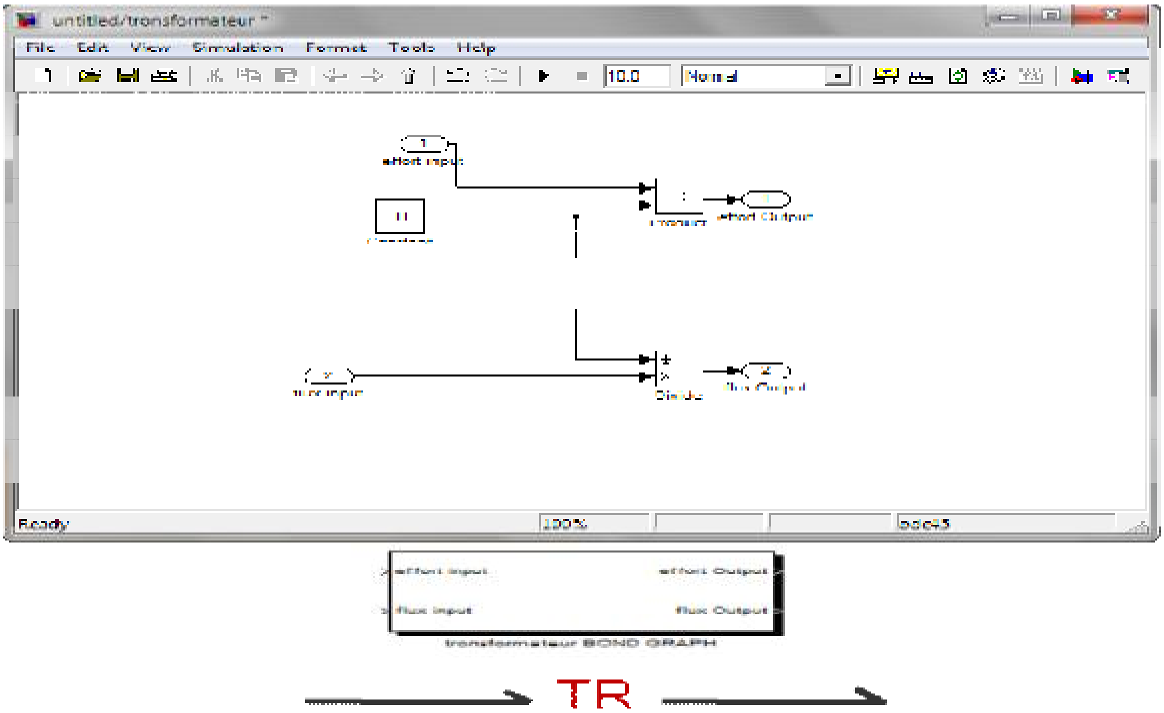


Figure 8. Bloc Simulink correspondant au transformateur.

3.4.3. Elément capacitif

Le bloc Simulink permettant de simuler l'élément capacitif est donné par la Figure 9. La sortie du bloc constitue une intégration du flux pondéré par un facteur.

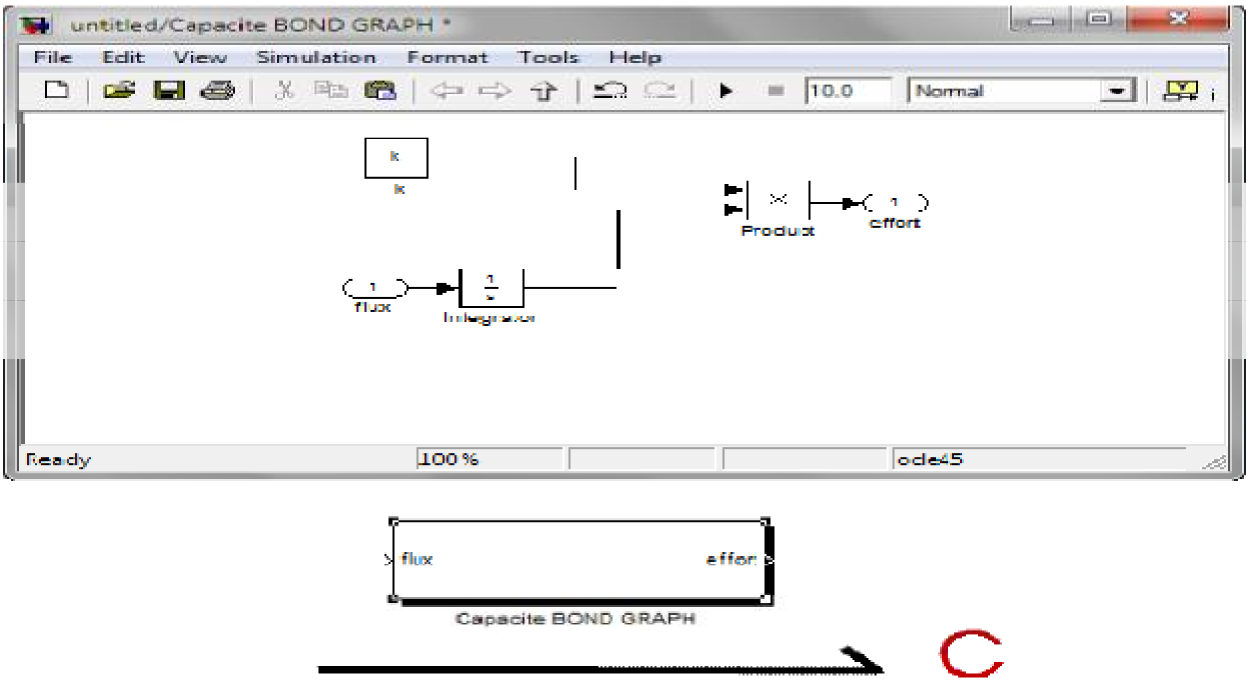
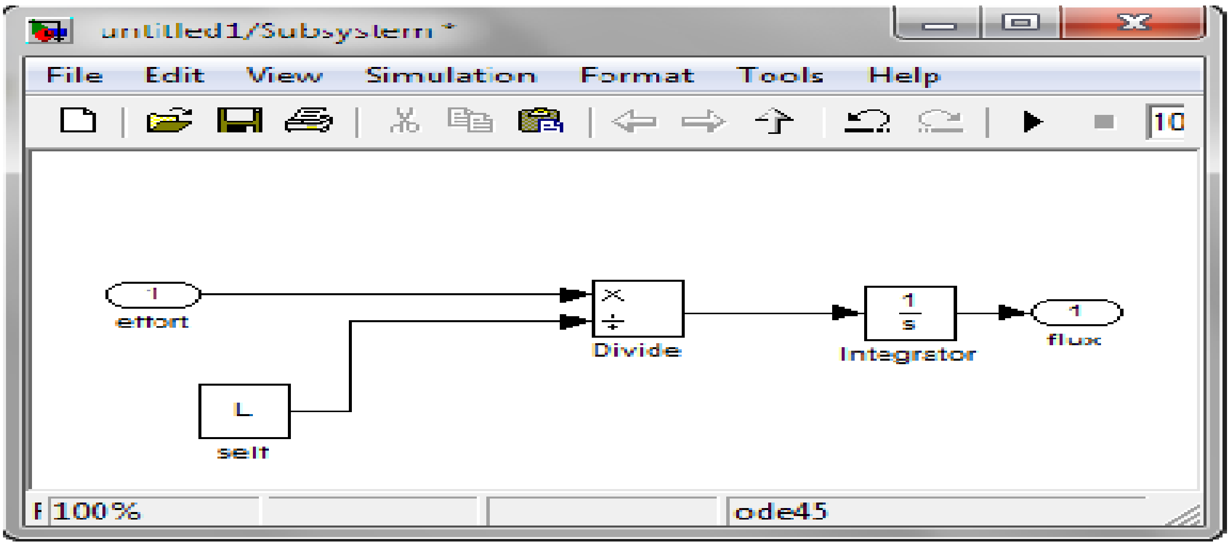


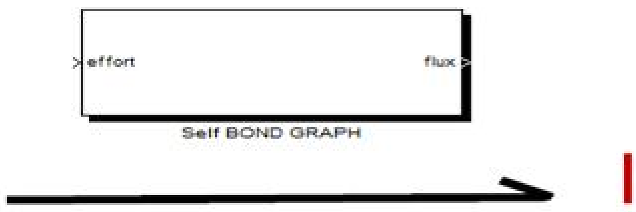
Figure 9. Bloc simulink de l'élément capacitif.

3.4.3 Element inertiel

L'interface de cet élément est donnée par la Figure 10.

Figure 10. Bloc Simulink de l'élément intertiel. Manque de 1/s





3.5. Bibliothèque développée

La Figure 11 donne les différents élements de la bibliothèque développée permettant de simuler le comportement dynamique des systèmes dynamiques en utilisant directement le modèle Bond Graphs.

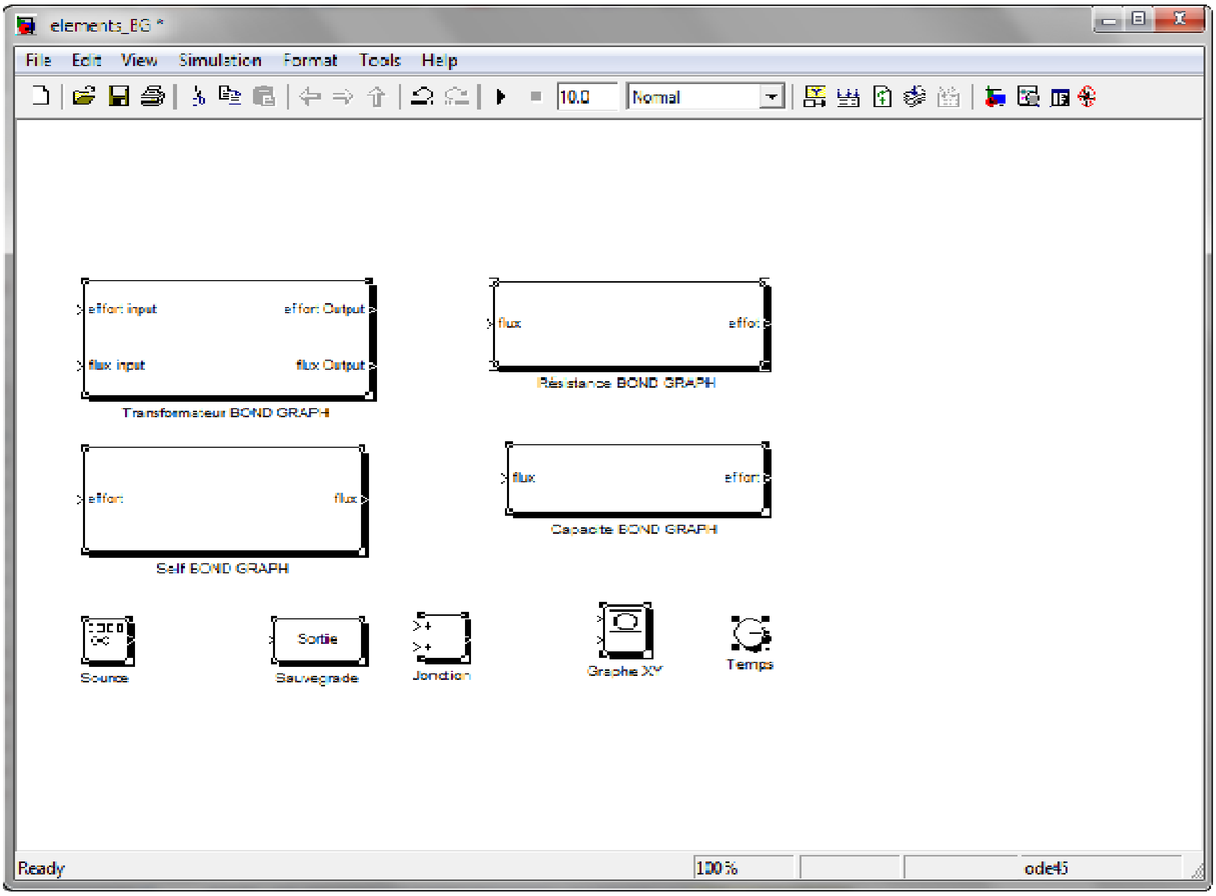


Figure 11. Elements de la bibliothèque Bond Graphs.

3.6. Exemple d'application

Nous désirons simuler le comportement dynamique du système électrique donné par la Figure 12 en utilisant la bibliothèque simulink développée. Le Bond Graphs du système est donné par la Figure 13. Le schéma de simulation réalisé en utilisant les blocs de la bibliothèque développée est donné par la Figure 14.

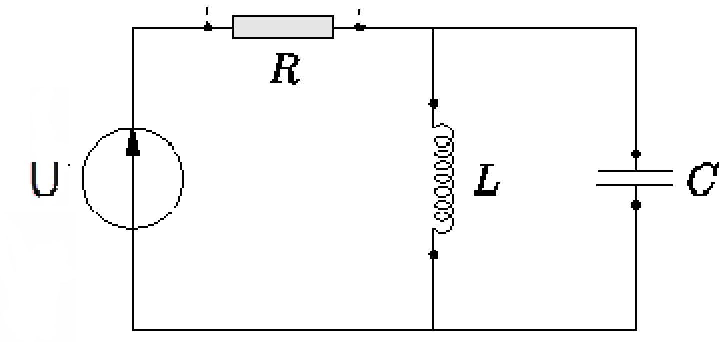


Figure 12. Circuit électrique

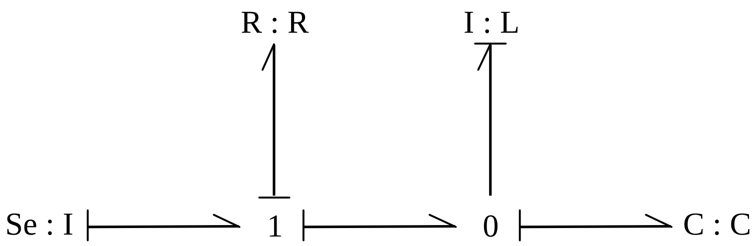


Figure 13. Bond Graphs du circuit électrique

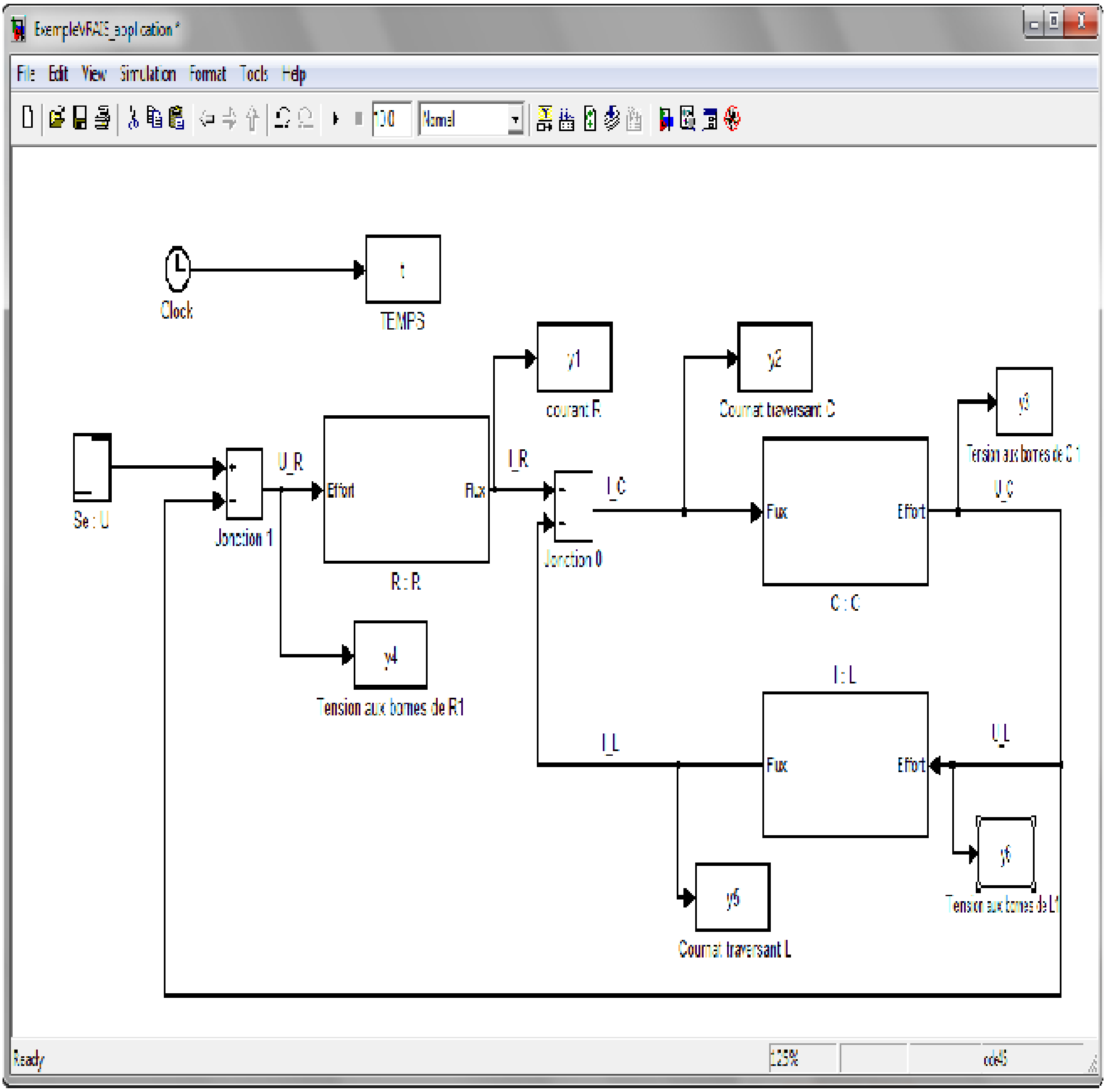
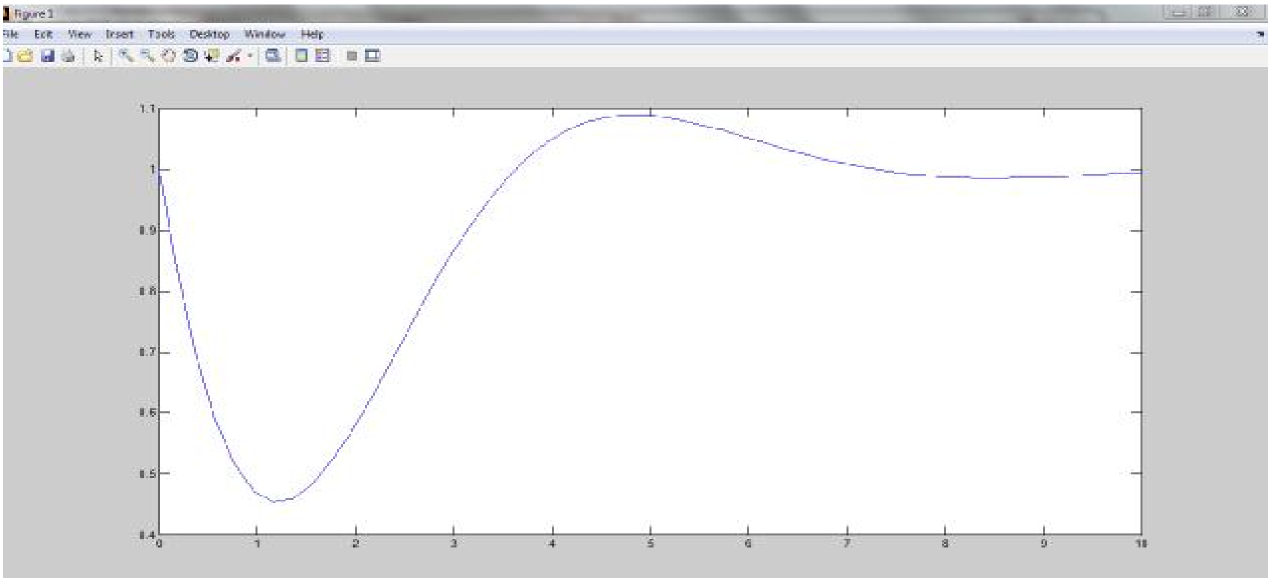
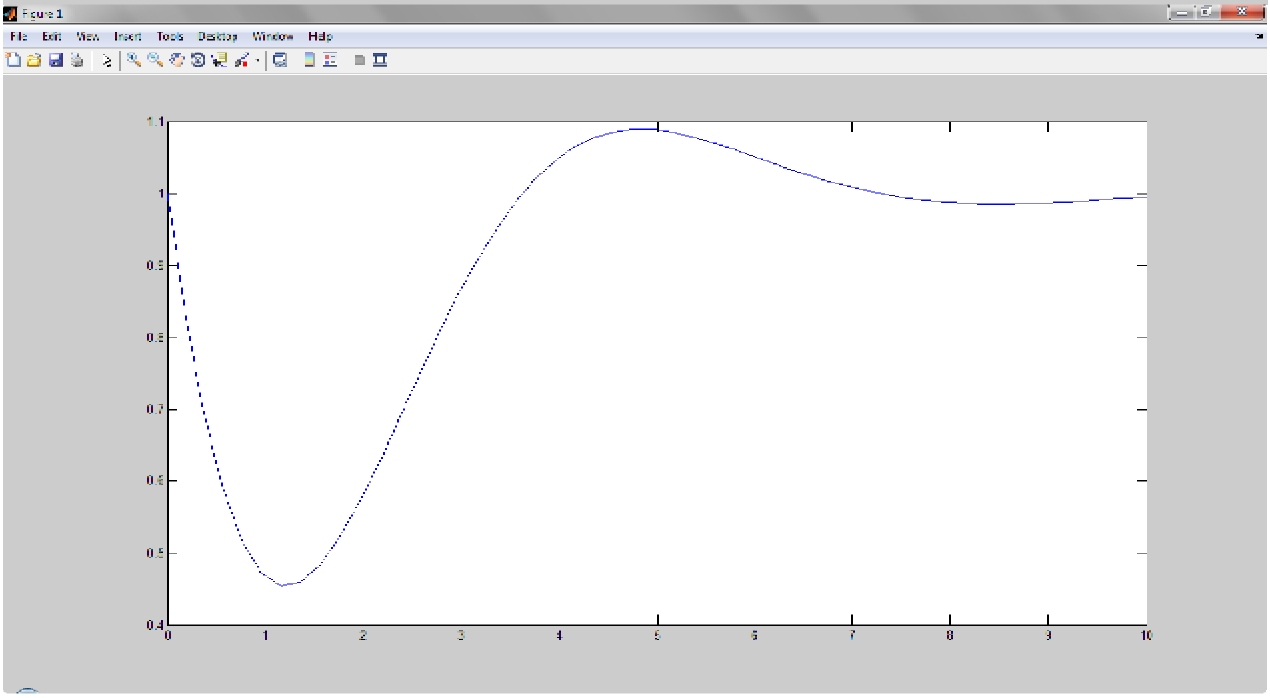


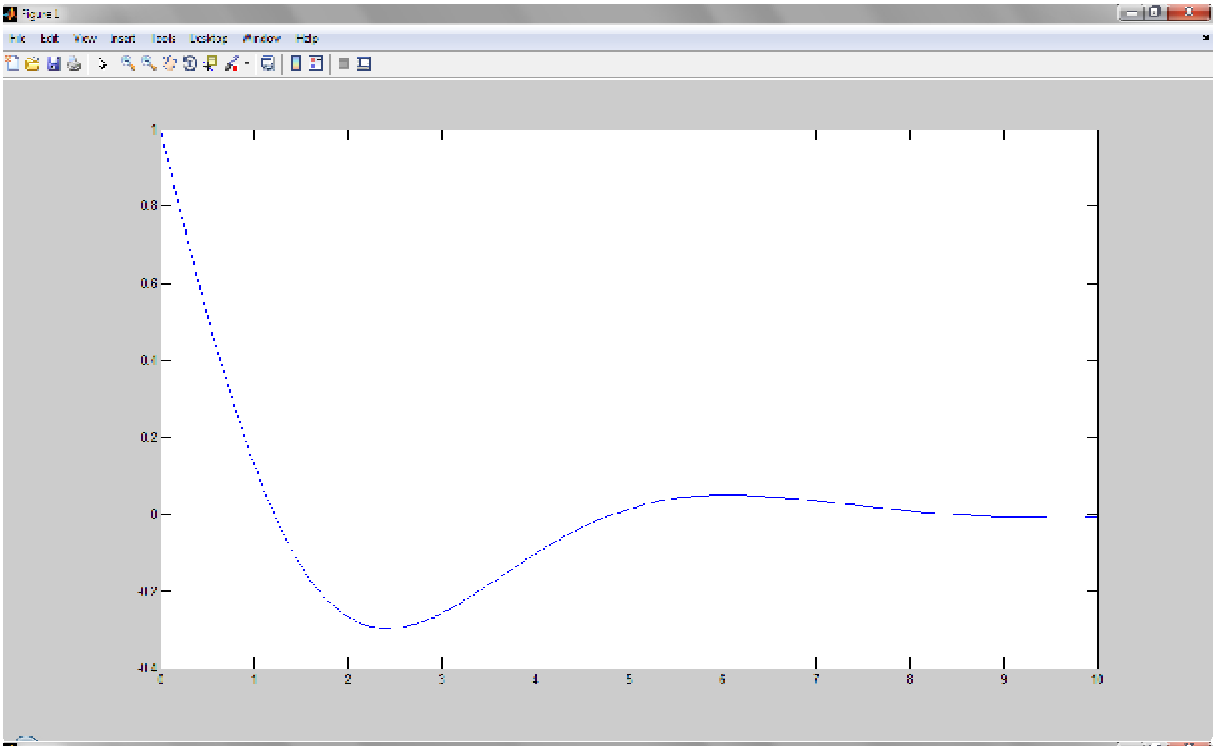
Figure 14. Le schéma de simulation de l'exemple

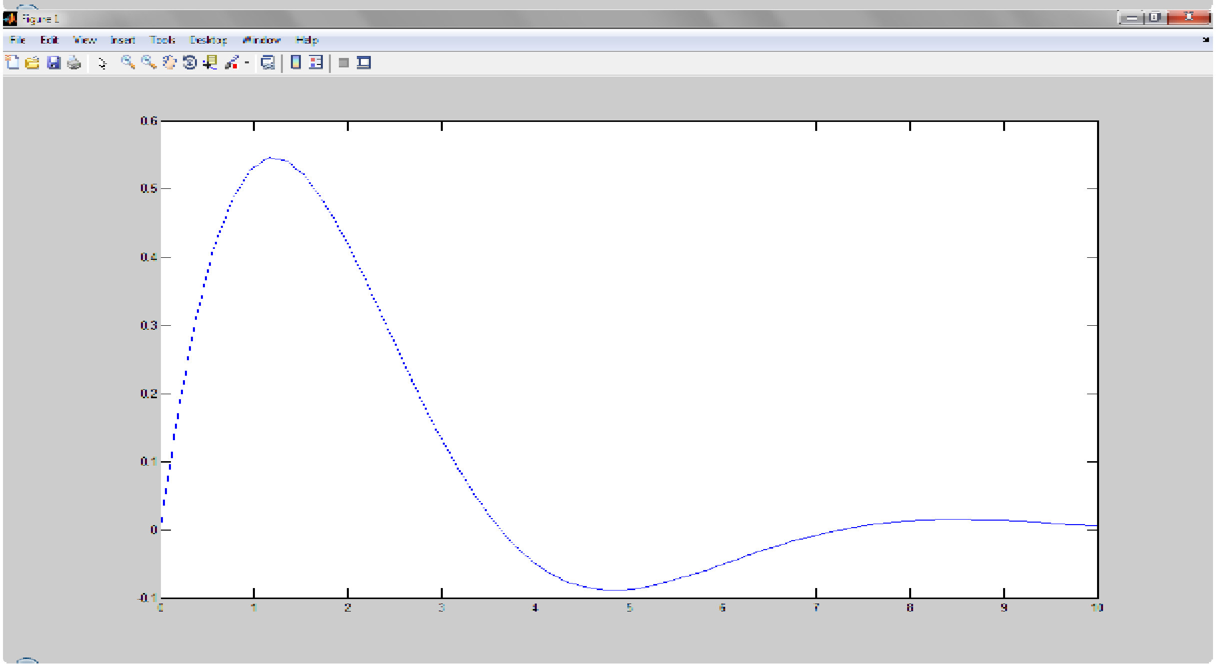
La simulation de l exemple précédant nous a permit d'obtenir les graphs suivant :



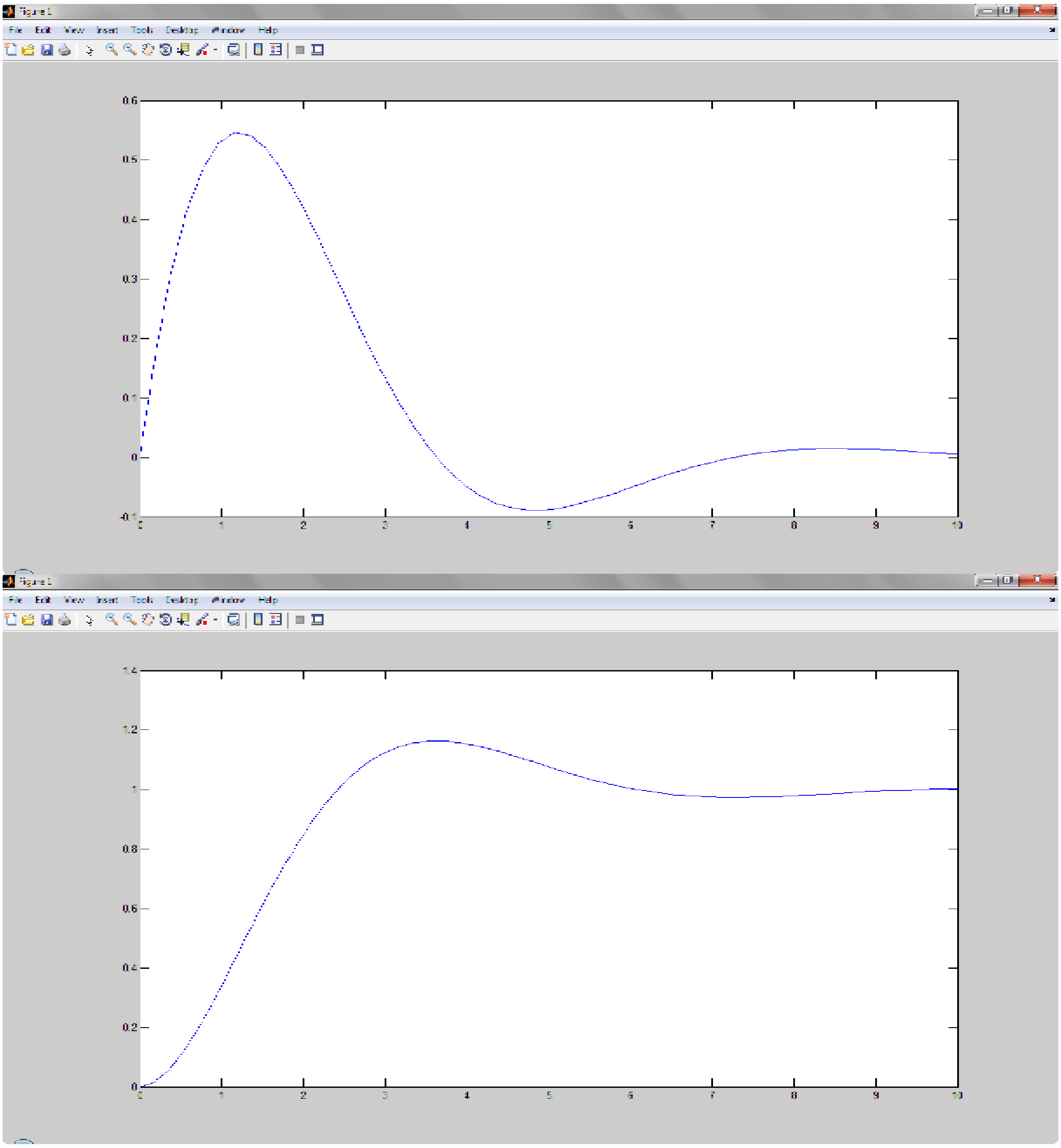


Effort et flux de la résistance.





Effort et flux de la capacite



Effort et flux de la self

3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a expliqué, de manière générale, la création d'un nouveau bloc Simulink. Par la suite, on a présenté les différents éléments de la bibliothèque développée pour la simulation des systèmes dynamiques par l'outil Bond Graphs. Pour illustrer l'utilisation de la bibliothèque Simulink, un exemple d'un circuit électrique a été présenté.

La bibliothèque développée peut être enrichie en intégrant d'autres éléments de l'outil Bond Graphs. L'utilisation de ces blocs permet de faciliter la simulation des systèmes dynamiques complexes.

CONCLUSION GENERALE:

Le travail réalisé dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la simulation des systèmes dynamiques en utilisant le logiciel Matlab/Simulink. L'objectif consiste à développer une bibliothèque Simulink pour la simulation des systèmes avec l'outil Bond Graphs.

Ainsi après avoir introduit des généralités sur la modélisation des systèmes dynamiques et les différents types de modèles, nous avons présenté de manière détaillée l'outil de modélisation Bond Graphs. La dernière partie du travail a été consacré au développement des différents blocs de la bibliothèque Simulink de simulation par l'outil Bond Graphs, et pour illustrer l'utilisation de la bibliothèque, nous avons présenté un exemple d'application.

L'utilisation de Bond Graphs pour la modélisation des systèmes dynamiques permet de simplifier davantage leur simulation, par conséquent leur validation. La boite Simulink développée permet de simuler directement le modèle Bond Graphs sans écrire les équations mathématiques du modèle. L'utilisation de la bibliothèque est très simple, puisque il suffit de placer les différents éléments du Bond Graphs du modèle et de les relier en respectant les causalités.

Cette bibliothèque peut être amplement améliorée en ajoutant d'autres éléments de Bond graphs en particulier les éléments non linéaires.

BIBLIOGRAPHIE:

[1] P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis. *Modélisation et identification des processus.* Tomes 1 et 2, Editions Technip, Paris, 1993.

[2] G. Dauphin-Tanguy. *Les Bond Graphs*. Editions Hermès Science Publication, Paris, 2000.

[3] M. Vergé, D. Jaume. *Modélisation Structurée des Systèmes avec les Bond Graphs.* Editions Technip, Paris, 2005.

[4] J.-M Flaus. *Régulation Industrielle : Régulateurs PI, Flous et Prédictive.* Editions Hermès, Paris, 1994.