

CHAPITRE IV

Outils de modélisation

(Application aux circuits électriques)

IV. Modélisation en Bond graph (BG)

IV.1 Définition

Le bond graph (BG) est une technique graphique utilisée pour modéliser les systèmes avec un langage unifié pour tous les domaines des sciences physiques. On peut associer des sous-modèles de différents types de systèmes tels que les systèmes électriques, mécaniques, hydrauliques, thermiques en un seul bond graph, ce qui permet une visualisation graphique des relations de cause à effet, et assure la conservation de la puissance.

La construction du modèle se fait en 3 étapes:

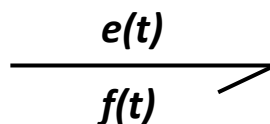
- Analyse fonctionnelle.
- Analyse phénoménologique.
- Analyse comportementale.

IV.2 Construction d'un modèle en Bond graph

IV.2.1 Analyse fonctionnelle

Le système est décomposé en sous-systèmes qui échangent de la puissance. Les variables de couplage entre les sous-systèmes (variables de puissance "**effort**" et "**flux**") sont caractérisées.

Dans un lien ("**bond**") la direction de la demi-flèche indique le sens du transfert de puissance, et les deux variables sont l'effort $e(t)$ et le flux $f(t)$, appelées "variables de puissance" et dont le produit $e(t)*f(t)$ représente la puissance instantanée échangée par le lien.



IV.2.2 Analyse phénoménologique

Les jonctions θ (même effort) et jonctions I (même flux) permettent d'étendre les lois de Kirchhoff à tous les domaines de la physique.

Trois éléments R , C , I permettent de représenter la transformation de la puissance qui leur est fournie en énergie dissipée ou stockée. Ces éléments utilisent la convention des récepteurs du point de vue de la direction de la demi-flèche. Des sources Se et Sf représentent d'une manière idéalisée les générateurs de tension et de courant, lesquels ont une convention de générateurs.

IV.2.2.1 Procédure pour la modélisation des systèmes électriques

Pour la construction d'un Bond graph on peut suivre une procédure propre au domaine concerné.

Procédure pour les systèmes électriques:

1. Fixer un sens de circulation pour le courant. Il sera pris comme sens de transfert de la puissance.
2. Rechercher tous les nœuds de potentiels. Placer une jonction θ par nœud.
3. Placer une jonction I entre deux jonctions θ et y attacher les éléments soumis à la différence de potentiels correspondants.
4. Relier les jonctions par des liens, en respectant le sens de transfert de la puissance.
5. Choisir un nœud de référence (ou plusieurs suivant les cas) et supprimer la (ou les) jonction(s) θ qui y est (sont) associée(s), ainsi que tous les liens qui sont attachés. Simplifier si possible:



Pour montrer chaque étape de la procédure pour les systèmes électriques on présente l'exemple basique d'un circuit RL (Figure 4.1).

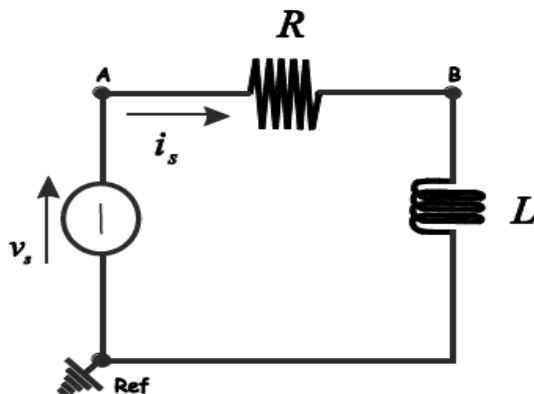


Fig 4.1 Schéma électrique d'un circuit RL

Pour obtenir le Bond graph on applique la procédure présentée à la Figure 4.2.

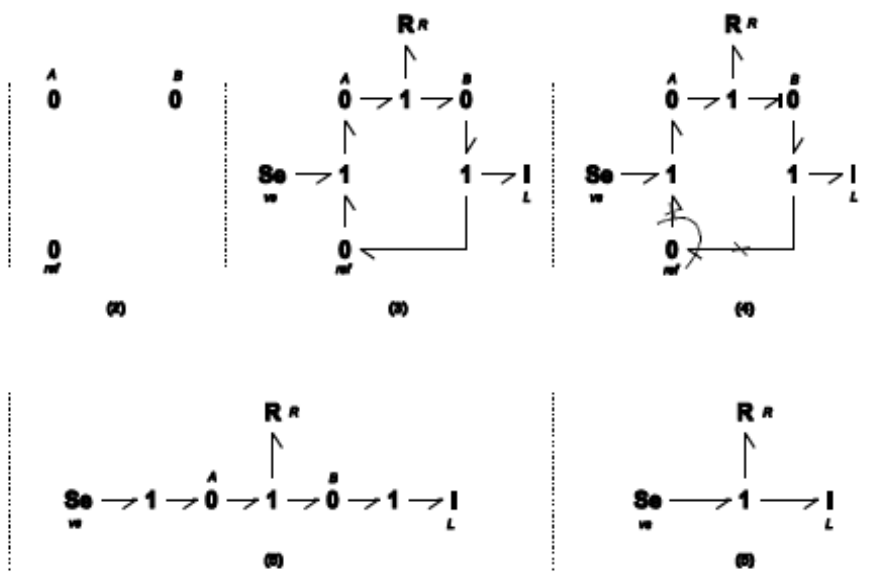


Fig 4.2 Procédure pour la modélisation du circuit RL .

Une comparaison graphique du schéma et du Bond graph est montrée Figure 4.3.

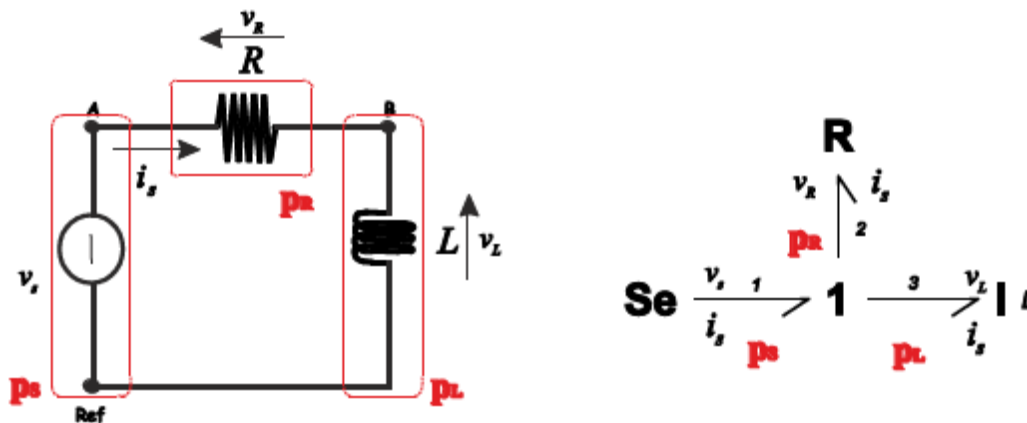


Fig 4.3 Comparaison graphique du circuit RL.

On voit sur la Figure 4.3 que dans le schéma électrique on a les trois éléments qui correspondent aux trois éléments *Se*, *R*, *I* du Bond graph. On associe à chaque lien une puissance instantanée dans une partie bien précise du système. La jonction *I* permet de faire le bilan de puissance $p_S - p_R - p_L = 0$.

IV.2.3 Analyse comportementale

De façon complètement indépendante du sens de transfert de la puissance, cette étape concerne la construction de manière systématique des équations qui seront programmées pour la simulation.

Ceci commence par l'affectation de la causalité, ce qui veut dire qu'on va représenter les relations de cause à effet au sens algorithmique ou schéma-bloc.

Convention : le trait causal est placé *près (loin)* de l'élément pour lequel l'effort (le flux) est une donnée, ce qui correspond aux schémas donnés Figure 4.4. En d'autres termes, sur la Figure 4.4a, l'effort est une sortie du système A et une entrée pour le système B et réciproquement pour le flux.

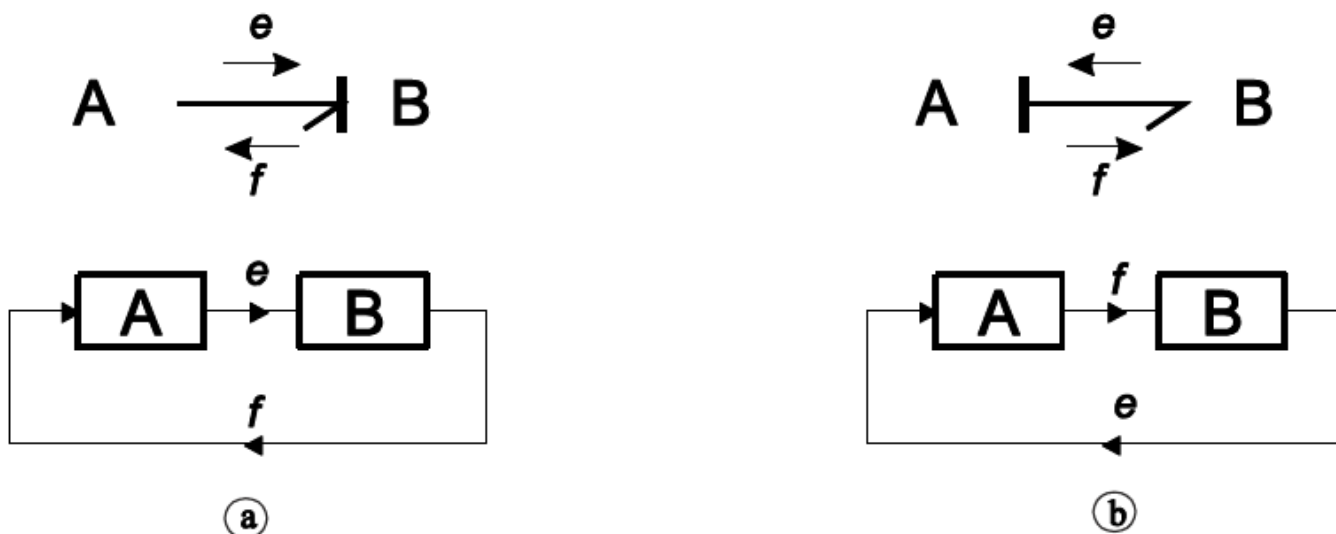


Fig 4.4 Causalité dans un lien et schéma bloc associé.

La causalité suit des règles pour les éléments et les jonctions:

- Causalité obligatoire pour les sources.
- Causalité obligatoire pour les éléments **R** avec des lois non inversibles.
- Causalité intégrale préférentielle pour les **I** et **C**, éléments de stockage d'énergie.
- Restrictions de causalité pour les jonctions:
 - Jonction **0** : un seul trait causal près du **0**, ce qui veut dire qu'un seul lien (donc élément) impose son effort aux autres liens (donc éléments attachés à la jonction **0**).
 - Jonction **1** : un seul trait causal loin du **1**, ce qui veut dire qu'un seul lien (donc élément) impose son flux aux autres liens (donc éléments attachés à la jonction **1**).
- Causalité arbitraire pour les éléments **R** linéaires pour respecter les restrictions de causalité aux jonctions.

Le Tableau 4.1 présente les règles d'affectation de la causalité.

Causalité	Symbole	Loi	Causalité	Symbole	Loi	
Restrictions de Causalité		$e_1 = e_1$ $e_2 = e_1$ \vdots $e_n = e_1$	Obligatoire	Se	e imposé par Se	
		$f_1 = f_1$ $f_2 = f_1$ \vdots $f_n = f_1$		Sf	f imposé par Sf	
				I	e = $\Psi_c \left(\int f(\tau) d\tau \right)$	
					f = $\Psi_l \left(\int e(\tau) d\tau \right)$	
		$e_1 = m \cdot e_2$ $f_2 = m \cdot f_1$		Dérivée		f = $\Psi_c^{-1}(de/dt)$
		$e_2 = 1/m \cdot e_1$ $f_1 = 1/m \cdot f_2$		Arbitraire (linéaire)		e = $\Psi_l^{-1}(df/dt)$
		$e_1 = r \cdot f_2$ $e_2 = r \cdot f_1$		Non arbitraire (non linéaire)		e = $R \cdot f$
		$f_1 = 1/r \cdot e_2$ $f_2 = 1/r \cdot e_1$				f = $1/R \cdot e$
						e = $\Psi_2(f)$
						f = $\Psi_1^{-1}(e)$

Tab 4.1 Règles d'affectation de la causalité.

IV.2.3.1 Procédure d'affectation de la causalité

1. Affecter la causalité (obligatoire) aux sources et aux **R** non linéaires et répercuter sur l'environnement.
2. Mettre les **I** et **C** en causalité intégrale préférentielle et répercuter sur l'environnement.
3. Affecter les causalités aux éléments **R** linéaires en respectant les restrictions de causalité aux jonctions.
4. En cas de conflit à une jonction, rechercher l'élément **I** ou **C** cause du conflit et le mettre en causalité dérivée.

En accord avec la procédure et les règles d'affectation de la causalité, le bond graph acausal de la Figure 4.3, devient un bond graph causal (Figure 4.5).

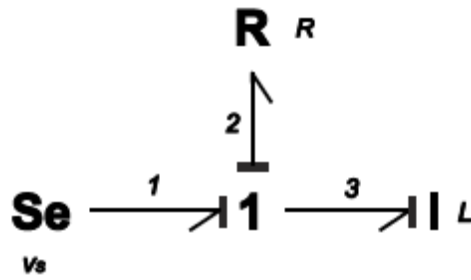


Fig 4.5 Bond graph causal du circuit RL.

La causalité dans un Bond graph permet d'obtenir les équations d'état et la fonction de transfert de façon systématique, et de faire différents types d'analyse structurelle.