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, chimiques …

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 physiques 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.

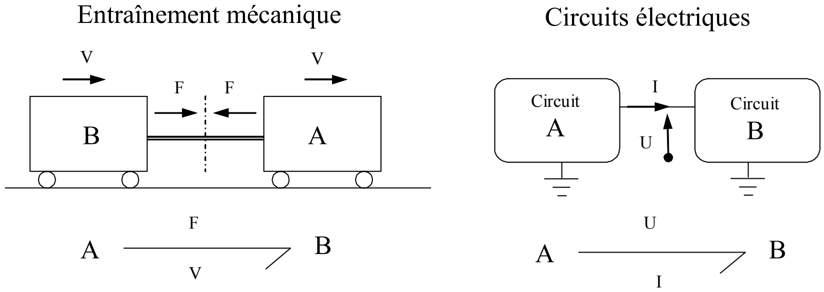
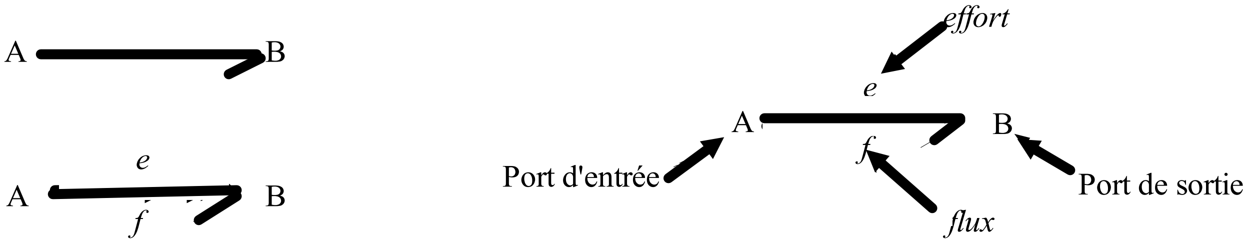


Figure 2-1 Convent ons d'un lien

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.



- Figure 2-2 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 :

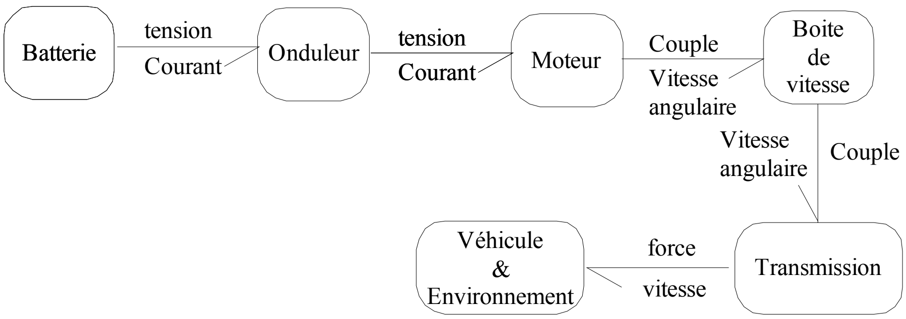


Figure 2-3 Bond graph à mots

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*. $\boxed{P = e \cdot f}$

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
$P = F \cdot V$ avec la *force* en newton et le *flux* en m/s.
$P = C \cdot \omega$ 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*. $\boxed{p(t) = \int_0^t e(\tau)\ d\tau + p(0)}$

Exemples :

Domaine électrique.

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

$$p(t) = \int_0^t V(\tau)\ d\tau + p(0).$$

Domaine mécanique.

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

Dans le cas d'une translation $p(t) = \int_0^t F(\tau)\ d\tau + p(0)$.

Ici, le *moment généralisé* p(t) représente l'impulsion en Ns.

Pour les mouvements de rotation, l'*effort* est le couple et le *flux* la vitesse de rotation angulaire.

En rotation $p(t) = \int_0^t C(\tau)\ d\tau + p(0)$ 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 : $\boxed{q(t) = \int_0^t f(\tau)\cdot d\tau + q(0)}$

Exemples :

Domaine électrique.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'*effort* et le *flux* correspondent respectivement à la tension et au courant.

$$q(t) = \int_0^t I(\tau)\ d\tau + q(0).$$

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

Domaine mécanique.

Pour un mouvement de translation $q(t) = \int_0^t V(\tau)\ d\tau + q(0)$.

L'intégrale de la vitesse est ici le déplacement exprimé en m. $x(t) = x_0 + \int_{t_0}^{t} V(\tau)\cdot d\tau$.

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

Pour un mouvement en rotation $q(t) = \int_0^t \omega(\tau)\ d\tau + q(0)$

L'intégration de la vitesse angulaire donne l'angle, dans ce domaine le *déplacement* correspond donc à la rotation angulaire exprimée en rad. $\theta(t) = \theta_0 + \int_{t_0}^{t} \omega(\tau) \cdot d\tau$

2.2.4 Variable d'énergie E(t).

L'énergie correspond à l'intégration de la puissance . $\boxed{E(t) = \int_0^t e(\tau) f(\tau) d\tau + E(0)}$

Exemples :

Domaine électrique.

Dans le domaine électrique nous aurons :

$$E(t) = \int_0^t V(\tau) \cdot I(\tau) d\tau + E(0)$$

Domaine mécanique.

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 $E(t) = \int_0^t F(\tau) \cdot V(\tau) d\tau + E(0)$.

En rotation $E(t) = \int_0^t C(\tau) \cdot \omega(\tau) d\tau + E(0)$.

2.3 Variables de flux et d'effort.

Résumé des variables d'effort et de flux

Domaine	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 dérivée du flux magnétique		Le flux magnétique
Mécanique translation	La force en N	La vitesse en m/s	Impulsion p en N.s	Déplacement en mètre
Mécanique rotation	Le couple en Nm	La vitesse en rad/s	Impulsion p en N.m.s	Angle en radian
Hydraulique	Pression en Pascal (N/m^2)	Débit		Volume en m^3
Thermique	Température °K	Dérivée de l'entropie S		Entropie S
Chimique	Potentiel chimique µ	Flux molaire		Nombre de moles

Tableau 2-1

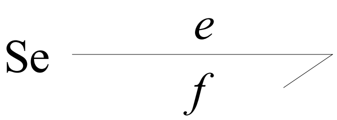
3. Eléments du langage bond graph.

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.

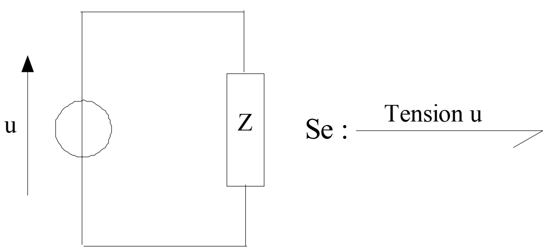
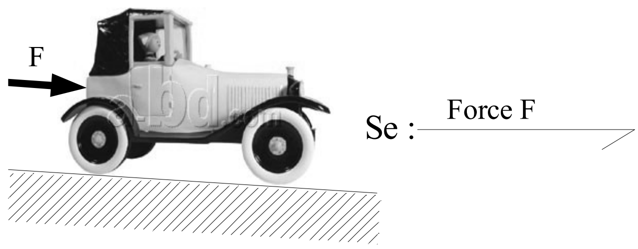
Dans un système, l'énergie peut être apportée soit par une source d'*effort* soit par une source de *flux*. Dans le domaine électrique, ce sont respectivement les sources de tension et de courant.
Ces sources sont orientées par une demi-flèche opposée à la source considérée.

3.1.1 Source d'effort.

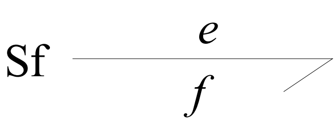


La variable *effort* est supposée indépendante du *flux* fourni par la source. Pour une source de tension, cela revient à dire que sa résistance interne est nulle.

Exemples 1.

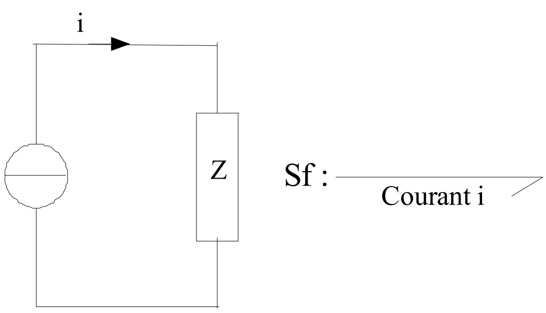
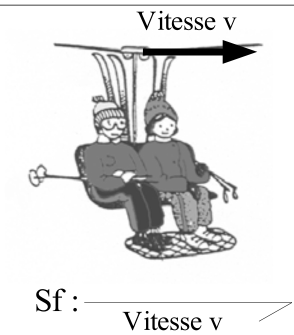
Domaine électrique.	*Domaine mécanique.*
	
Source de tension, alimentation par une source d'impédance nulle.	Moteur d'entraînement ayant des pertes nulles et fournissant une force de propulsion F.

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.

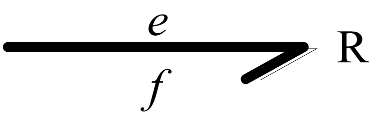
Exemples 2.

Domaine électrique.	*Domaine mécanique.*
	
Source de courant, alimentation par une source d'impédance infinie.	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…

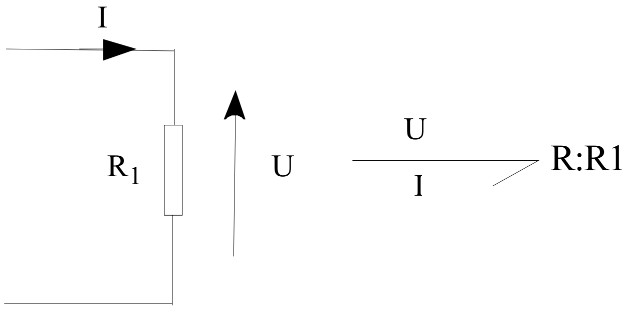
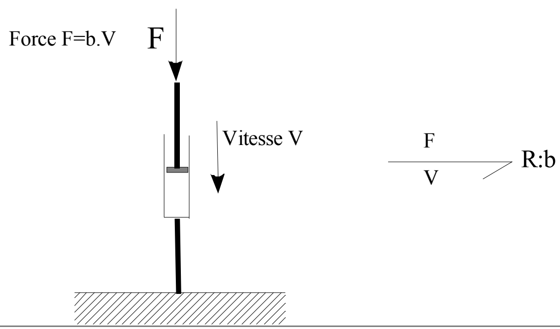
3.2.1 Elément R.



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.

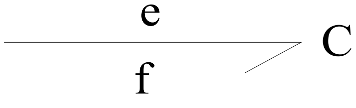
Exemples 3.

Domaine électrique.	*Domaine mécanique.*
	
La résistance : Puissance dissipée $P = U \cdot I = R_1 \cdot I^2$.	Frottement s'opposant à un déplacement. Frottement sec ; F constant, $P = V \cdot F$ Frottement fluide ; $F = b \cdot V$ $P = V \cdot F = b \cdot V^2$

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 $q = \varphi_C(C, e)$, dans le cas linéaire $q = C \cdot e$.

L'énergie stockée peut s'exprimer :

$$E(t) = \int_0^t e(\tau) f(\tau) d\tau + E(0)$$

Le déplacement s'exprimant vis-à-vis du *flux* par $q(t) = \int_0^t f(\tau) \cdot d\tau$, il vient :

$$E(q)=\int_{q_0}^{q} e(q)\,\mathrm{d}q+E(q_0).$$

<u>Exemples</u> :

Energie stockée dans un ressort.

Pour un ressort la force est proportionnelle à l'écrasement soit : $F=k\cdot x$,

$$E(x)=\int_{x_0}^{x} F(x)\,\mathrm{d}x+E(x_0)=\int_{x_0}^{x} k\cdot x\cdot \mathrm{d}x+E(x_0)=\frac{k\cdot x^2}{2}$$

Energie stockée dans un condensateur.

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

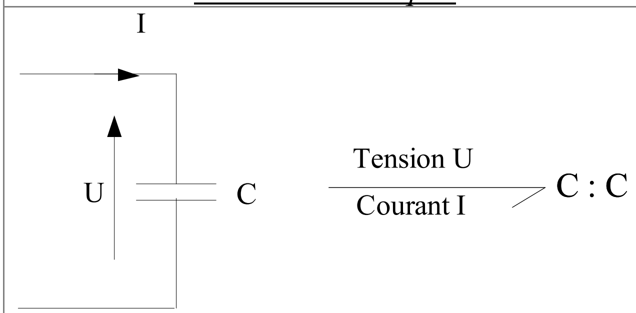
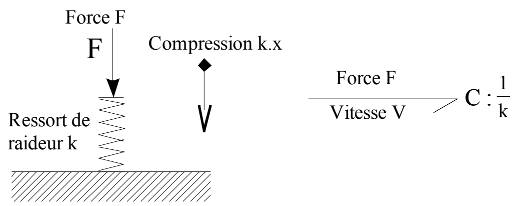
$E(x)=\int_{q_0}^{q} F(q)\,\mathrm{d}q+E(q_0)=\int_{x_0}^{x} \frac{q}{C}\cdot \mathrm{d}q+E(q_0)=\frac{q^2}{2\cdot C}$, si on exprime cette énergie stockée en fonction de la tension, nous retrouvons la relation classique $E=\frac{1}{2}C\cdot U^2$.

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

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

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

<u>Exemples 4</u>.

Domaine électrique.	*Domaine mécanique.*
	
Le condensateur permet lorsqu'il reçoit un courant (*flux*) d'emmagasiner une charge électrique exprimée en Coulomb (*déplacement*). Déplacement : $q=\int f \Rightarrow q(t)=\int_0^t i(\tau)\cdot \mathrm{d}\tau$ sachant que pour un condensateur : $u(t)=\frac{1}{C}\int_0^t i(\tau)\mathrm{d}\tau \Rightarrow q=C\cdot u$ Nous retrouvons la relation générique en régime linéaire $q=C\cdot e$ ou q représente la quantité d'électricité en Coulomb.	Le ressort permet lorsqu'il est soumis à une vitesse (*flux*) d'emmagasiner un *déplacement* exprimé en mètre. Déplacement : $q=\int f \Rightarrow q(t)=\int_0^t V(\tau)\cdot \mathrm{d}\tau$ Pour un ressort, la force due à la compression vaut : $F(t)=k\int_0^t V(\tau)\mathrm{d}\tau \quad \Rightarrow q=\frac{F}{k}$ et nous retrouvons comme pour le condensateur la relation valable dans le cas linéaire $q=C\cdot e$. Nous vérifions ici que le déplacement

Causalité. Pour avoir une causalité intégrale, un condensateur doit être alimenté par une source de courant, la tension étant la conséquence. En causalité intégrale : $u(t) = u_0 + \frac{1}{C}\int_0^t i(\tau)\cdot d\tau$. En causalité dérivée : $i(t) = C \cdot \dot{u}(t)$	correspond à la compression $x = \frac{F}{k}$ et que la valeur de la variable C de cet élément vaut $C = \frac{1}{k}$. Causalité. En causalité intégrale : $F = F_0 + k\int_0^t V(\tau)\cdot d\tau$. En causalité dérivée : $v(t) = \frac{1}{k}\cdot \dot{F}(t)$

3.2.4 Elément I (stockage de type inertiel).

$$\overset{e}{\underset{f}{\rightharpoondown}}\ \mathrm{I}$$

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

Cet élément de stockage est de type inertiel.
L'énergie stockée peut s'exprimer :

$E(t) = \int_0^t e(\tau) f(\tau) d\tau + E(0)$ Le déplacement s'exprimant vis-à-vis du *flux* par $p(t) = \int_0^t e(\tau)\cdot d\tau$,

il vient : $E(p) = \int_{p_0}^{p} f(p)\, dp + E(p_0)$.

Energie emmagasinée dans une masse.

Ici p représente la quantité de mouvement $p = M \cdot V$

$E(p) = \int_{p_0}^{p} V(p)\cdot dp + E(p_0) = \int_{p_0}^{p} \frac{p}{M}\cdot dp + E(p_0) = \frac{1}{2}\frac{p^2}{M} = \frac{1}{2} M \cdot V^2$, qui correspond à l'énergie cinétique.

Energie emmagasinée dans une inductance.

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

$E(p) = \int_{p_0}^{p} I(p)\cdot dp + E(p_0) = \int_{p_0}^{p} \frac{p}{L}\cdot dp + E(p_0) = \frac{1}{2}\frac{p^2}{I} = \frac{1}{2} L \cdot I^2$, nous retrouvons la relation usuelle donnant l'énergie magnétique emmagasinée dans une inductance.

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

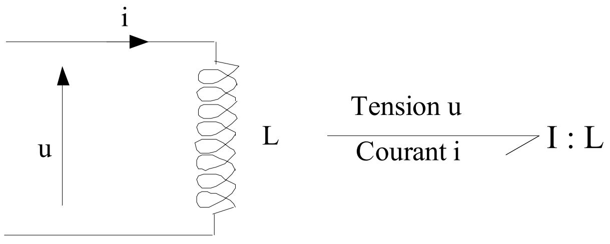
Causalité intégrale $f = \frac{1}{I}\int e$, le *flux* et l'intégrale de l'*effort*.

Causalité dérivée $e = I \cdot \dot{f}$, 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.

Exemples 5.

Domaine électrique.



L'inductance permet lorsqu'elle est soumise à une tension (*effort)* d'emmagasiner une *impulsion* en V.s.

$p = \int e \Rightarrow p(t) = \int_0^t v(\tau) \cdot d\tau$, sachant que pour une inductance : $i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t v(\tau) d\tau \Rightarrow$

Qui correspond bien au cas linéaire $p = I \cdot f$ pour lequel le paramètre I est l'inductance.

$$p(t) = \int_0^t v(\tau)\, d\tau + p(0)$$

Causalité :

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

$$i(t) = i_0 + \frac{1}{L} \int_0^t u(\tau) \cdot d\tau$$

En causalité dérivée nous retrouvons la relation classique :

$$u(t) = L.\dot{i}(t)$$

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.

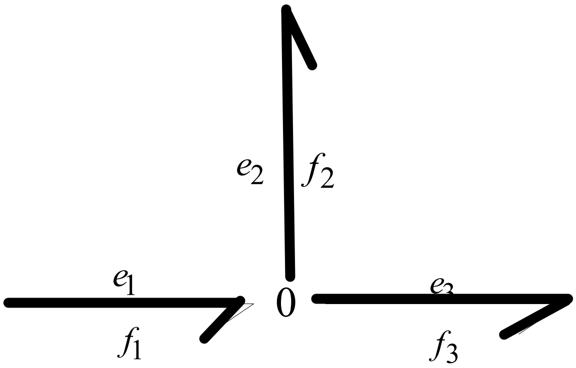
$$\xrightarrow[f=0]{e} D_e$$

3.3.2 Détecteur de flux.

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

3.4 Jonctions.

3.4.1 Jonction 0.



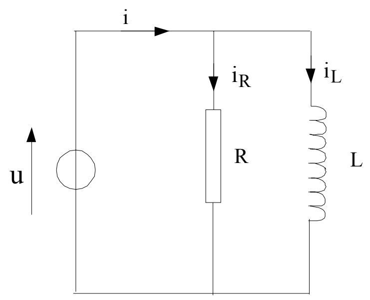
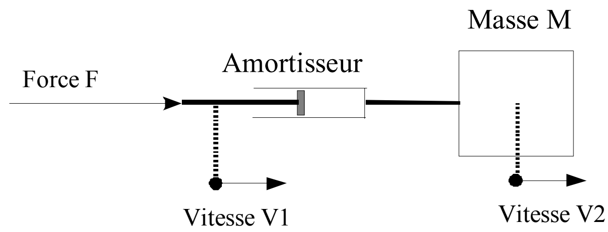
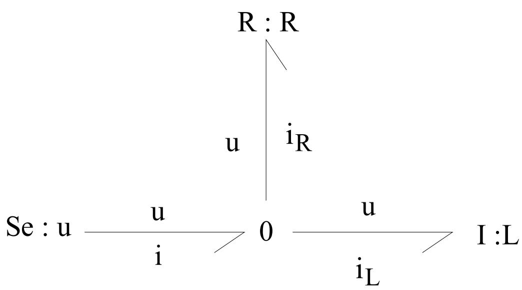
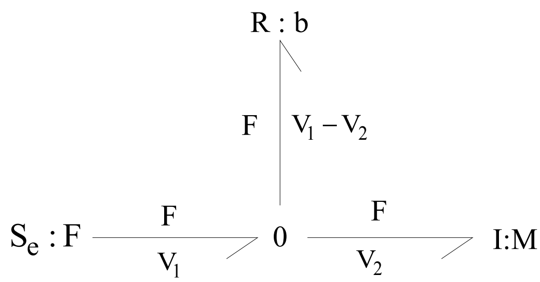
La jonction 0 permet de coupler des éléments soumis à un même *effort*.

Les *efforts* sont identiques : $e_1 = e_2 = e_3 = e$

Le *flux* entrant est égal à la somme des *flux* sortants $f_1 = f_2 + f_3$

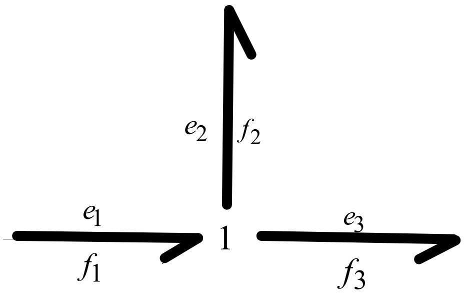
Le corollaire de ces 2 propriétés se traduit par un bilan de puissance nulle $e_1 \cdot f_1 - e_2 \cdot f_2 - e_3 \cdot f_3 = 0$.

<u>Exemples 6</u>.

<u>*Domaine électrique.*</u>	<u>*Domaine mécanique.*</u>
Alimentation par une source de tension d'une inductance et d'une résistance en parallèle.	Association série d'éléments soumis à une même force.
	
	
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 $R \cdot i_R^2$. L'inductance sera parcourue par un courrant : $i_L = \frac{1}{L}\int u$	L'amortisseur est considéré sans masse, les forces sont identiques à chaque extrémité. L'amortisseur est animé de la vitesse $V_3 = V_1 - V_2$ et dissipera une puissance $b \cdot V_3^2$. La masse sera soumise à une force tel que : $V_2 = \frac{1}{M}\int F$

Nous pouvons remarquer que la jonction 0 correspond pour les circuits électriques à une mise en parallèle, alors qu'avec un montage cela correspond à un montage en série.

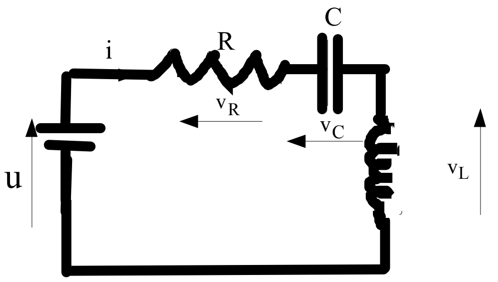
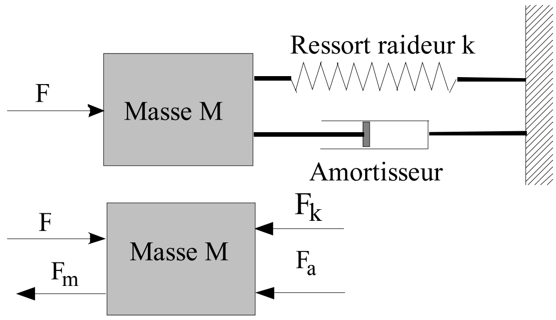
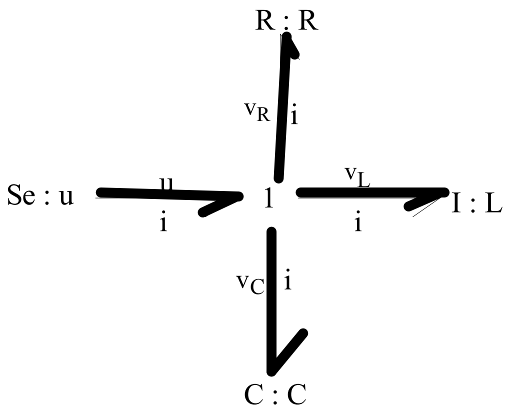
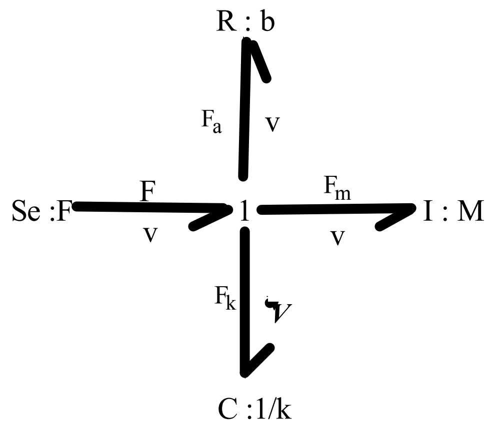
3.4.2 Jonction 1.



nul

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

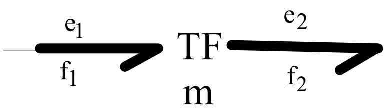
<u>Exemples 7</u>

<table>
<tr><th><u>Domaine électrique.</u></th><th><u>Domaine mécanique.</u></th></tr>
<tr><td>Une jonction 1 partageant le même flux, cela correspond en électricité à la mise en série de composants.</td><td>Considérons une masse reliée à un ressort et à un amortisseur conformément au schéma de principe suivant</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>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.</td><td>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.</td></tr>
</table>

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.



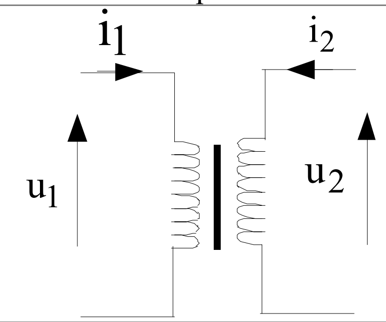
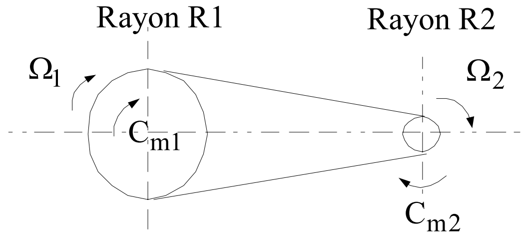
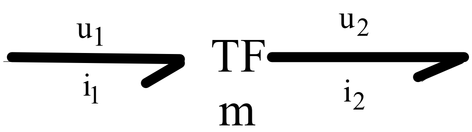
Le transformateur TF possède un coefficient de transformation *m* tel que :

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{f_2}{f_1} = m\,.$$

Nous vérifions bien au vue de la relation précédente que le transformateur TF est conservatif en puissance puisque $P = e_1 \cdot f_1 = e_2 \cdot f_2$

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>Exemples 8</u>

<u>Domaine électrique.</u>	*<u>Domaine mécanique.</u>*
Transformateur électrique.	Transmission par courroie.
	
	 $m = \frac{R_1}{R_2}$
Pour un transformateur idéal sans pertes : $P = u_1 \cdot i_1 = u_2 \cdot i_2$ et $\frac{i_2}{i_1} = \frac{u_1}{u_2} = m$ m, représentant le facteur de transformation.	Si nous n'avons pas de pertes il y a conservation de la puissance. $P = C_{m1} \cdot \Omega_1 = C_m \cdot \Omega_2$ et $\frac{R_1}{R_2} = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} = \frac{C_{m1}}{C_{m2}} = m$

3.5.2 *Gyrateur GY.*

- $\xrightarrow[f_1]{e_1} \underset{r}{GY} \xrightarrow[f_2]{e_2}$

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

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

<u>Exemple 9.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.

$C_m = k \cdot \Phi \cdot I_s$

La force contre électromotrice est quant à elle proportionnelle au flux et à la vitesse, $E = k \cdot \Phi \cdot \omega$.
Si nous identifions pour les variables électriques : *effort* $e_1 = E$, *flux* $f_1 = I_s$ et pour les grandeurs mécaniques, *effort* $e_2 = C_m$ *flux* $f_2 = \omega$ nous aurons :

$E = k \cdot \Phi \cdot \omega \equiv e_1 = k \cdot \Phi \cdot f_2$ et $C_m = k \cdot \Phi \cdot I_s \equiv e_2 = k \cdot \Phi \cdot f_1$

Domaine électrique $\xrightarrow[f_1 = I_s]{e_1 = E} \underset{r = k \cdot \Phi}{GY} \xrightarrow[f_2 = \omega]{e_2 = C_m}$ 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.

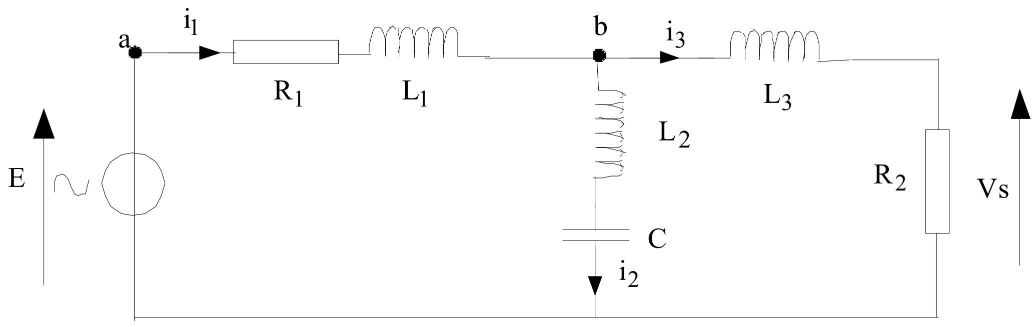
Pour les systèmes mécaniques :

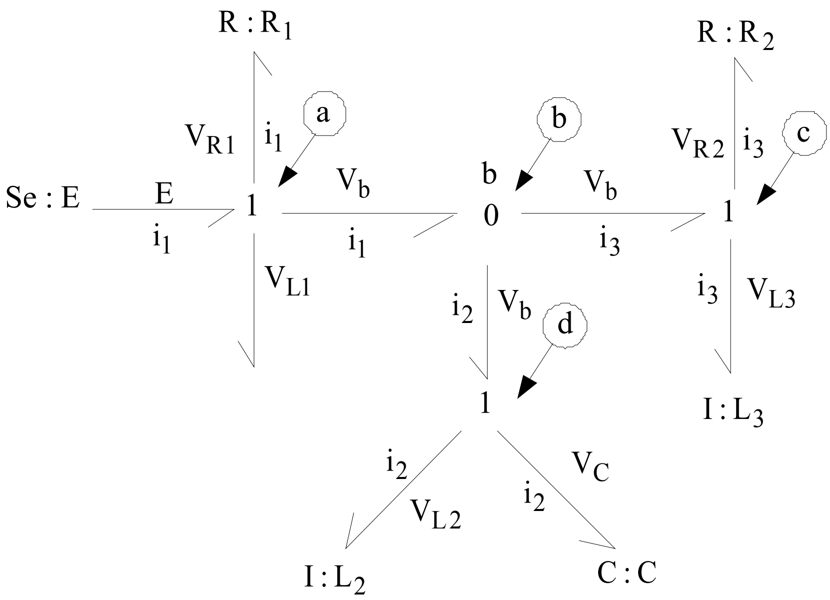
1. Identifier tous les éléments du système étudié.
2. Identifier et nommer le point du système dont les variables de *flux* différent (vitesse, courant). Pour toutes les valeurs du *flux* placer une jonction 1. Fixer un axe de référence pour le *flux* (vitesse).
3. Placer des jonctions O entre les jonctions 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.

Nota :

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

4.1 Exemple 10 : Filtre elliptique.





Les jonctions 1 sont à *flux* constant (courant), sur celles-ci sont réparti les *efforts* (tension) ici cela correspond aux deux mailles du filtre. Nous retrouvons ainsi sur les jonctions a, b, c :

a/ Jonction 1 : $E = V_{R1} + V_{L1} + V_b$.

c/ Jonction 1 : $V_b = V_{R2} + V_{L3}$.

d/ Jonction 1 : $V_b = V_{L2} + V_C$.

La jonction 0 est à *effort* constant (tension), c'est le potentiel du nœud b.

b/ Jonction 0 : $i_1 = i_2 + i_3$