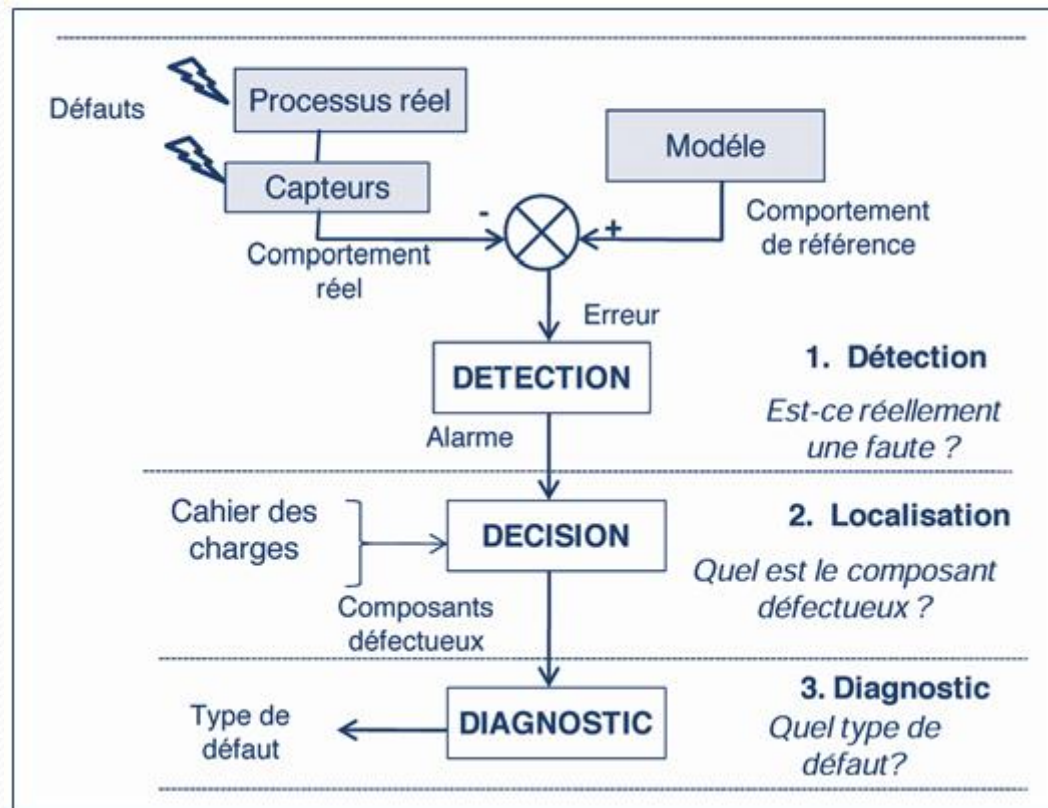


# Diagnostic à base de modèle Bond graph

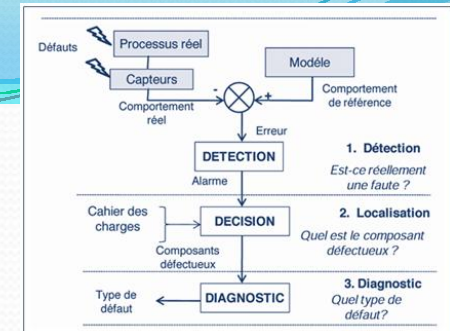
# Introduction

- Si le contrôle et la régulation industrielle sont largement maîtrisés par le monde industriel, la surveillance en ligne est peu développée. Une ambiguïté dans sa définition la réduit souvent à des tâches de suivi de paramètres (dit monitoring) ou de gestion d'alarmes par un seuillage des variables. L'amélioration de la sûreté de fonctionnement des systèmes repose essentiellement sur les algorithmes de détection et d'isolation des défauts en ligne, connus sous l'expression anglaise Fault Detection & Isolation (FDI).
- L'outil Bond graph, qui a prouvé son efficacité pour construire des modèles de connaissances de systèmes physiques pluridisciplinaires, peut aussi être un excellent support pour l'étude de la surveillance des systèmes industriels. C'est dans cet objectif que ont été développés depuis une vingtaine d'années des outils et méthodes pour la conception intégrée des systèmes de supervision allant de la modélisation à la génération d'algorithmes de diagnostic robuste en ligne et aux moyens de reconfiguration dans des modes dégradés

# Introduction



# Principe du diagnostic



- La première étape dite de **détection** consiste à décider entre dire que le système est en mode de fonctionnement normal ou que le système est en mode de fonctionnement défaillant. Elle est donc obtenue en testant la cohérence entre le fonctionnement réel (fourni par des capteurs) avec ce qu'il devrait être sous l'hypothèse de fonctionnement normal : cela implique que l'on dispose d'un modèle du fonctionnement normal obtenu par apprentissage ou d'une manière analytique, et que l'on produit une alarme lorsque l'on détecte des différences.
- La procédure de **décision** conduit à définir des seuils qui permettent d'accepter avec un risque raisonnable une non-détection ou une fausse alarme. La problématique consiste à distinguer les perturbations et les incertitudes de mesure et de paramètres des défaillances.
- La **localisation** consiste en un filtrage des alarmes pour retrouver leur origine et isoler le composant défectueux. On fait appel alors à des signatures de pannes répertoriées.
- Si le défaut est « tolérable », le système peut continuer à fonctionner. S'il est par contre conditionnellement tolérable, alors le système continuera à fonctionner, mais dans un mode dégradé en attendant qu'une maintenance soit effectuée. Cette partie est traitée par les méthodes de la **commande tolérante aux fautes** (ou Fault Tolerant Control FTC en anglais).
- Une fois la faute localisée, il faut **identifier** les causes précises de cette anomalie. On fait alors appel à des signatures définies par des experts et validées après réparation des dysfonctionnements.

# Principe du diagnostic

- Dans l'industrie, les premières méthodes de diagnostic furent basées sur la redondance des matériels jugés critiques pour le fonctionnement du système. Cette approche entraîne un coût important en instrumentation, s'avère simple et facile à implanter, mais se limite à la surveillance des capteurs : les défaillances physiques ne peuvent pas être détectées. Les progrès réalisés dans le domaine des calculateurs permettent aujourd'hui la mise en œuvre des méthodes modernes de l'automatique et de l'intelligence artificielle. Ces nouvelles approches permettent d'éliminer en partie, voire même en totalité, la redondance matérielle pour le diagnostic.
- En fonction du type de modèle utilisé, on distingue les méthodes dites à base de modèle analytique et les méthodes sans modèles (dites à base de signal ou sans modèle a priori). Les méthodes sans modèles, ne disposant pas de modèles opératoires, font alors appel à des procédures d'apprentissage d'intelligence artificielle ou de reconnaissance de formes, qui consistent à classer automatiquement des formes dans des modes (classes) connus a priori. Par conséquent, ces techniques doivent connaître par anticipation tous les états de fonctionnement (normal et défaillant), ce qui est souvent inacceptable dans les systèmes réels.

# Principe du diagnostic

Les performances des méthodes à base de modèles dépendent fortement du modèle utilisé. Une fois ce dernier généré, les indicateurs de défaillances peuvent être déduits à partir du modèle mathématique en mode défaillant et normal. Ces indicateurs de fautes sont représentés par les Relations de Redondance Analytique (RRA).

# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

- L'outil Bond graph a été initialement utilisé pour la modélisation des systèmes physiques. L'idée d'utiliser une seule représentation (le Bond graph) pour la modélisation, l'analyse et la synthèse des lois de commande en exploitant la causalité est récente. Plusieurs travaux ont été développés dans ce domaine .
- La surveillance, avec ses aspects détection et localisation des défaillances, mais aussi le choix et le placement des capteurs, trouve aussi un intérêt à l'existence d'un tel modèle

# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

Au regard des travaux existant sur ce thème, la contribution de la présente démarche se situe à plusieurs niveaux :

- démarche est une approche complète pour la conception d'un système de supervision : elle consiste à générer des modèles dynamiques (en mode normal et défaillant), des algorithmes formels de surveillance à partir non pas des équations mathématiques, mais du procédé physique à surveiller. La démarche est générique et flexible, et n'utilise qu'une seule représentation : le Bond graph.
- L'algorithme de génération des RRAs à partir du modèle Bond graph n'est pas seulement limité à des formes particulières du modèle (polynomiale pour la théorie de l'élimination ou linéaire pour la méthode par projection dans le cas de l'espace de parité), mais aussi à des modèles donnés sous forme empirique.



# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

- Etapes du diagnostic par Bond graph
- *Cahier des charges et modélisation*
- Afin d'illustrer la méthodologie, on considère le diagnostic d'un moteur électrique.
- Le courant d'inducteur  $i$  supposé constant. Soit le vecteur paramètres. Les performances du système à surveiller dépendent principalement de l'architecture d'instrumentation. Elle est constituée dans le cas étudié des **capteurs de courant dans le stator** (mesuré par le capteur de flux noté  $Df:i$ ) et celui **de vitesse angulaire** représenté par  $Df:\omega m$ . On se propose en qualité de cahier des charges de déterminer les conditions de surveillabilité des composants suivants : les capteurs de courant et vitesse, la partie électrique et la partie mécanique du moteur, la charge et les défauts pouvant affecter les phénomènes de transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique

# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

- *Surveillabilité structurelle*
- Une relation de redondance analytique (RRA) est une contrainte calculée à partir d'un sous-système surdéterminé et observable, et exprimée en termes de variables connues du processus. Elle a la forme symbolique suivante :

$$F(K) = 0$$

- L'évaluation numérique d'une RRA conduit à un résidu  $r$ :  $r - f(K) \approx 0$  dont la valeur numérique en l'absence de défaillances doit être nulle.
- Dans une représentation par Bond graph, la relation d'une RRA devient:

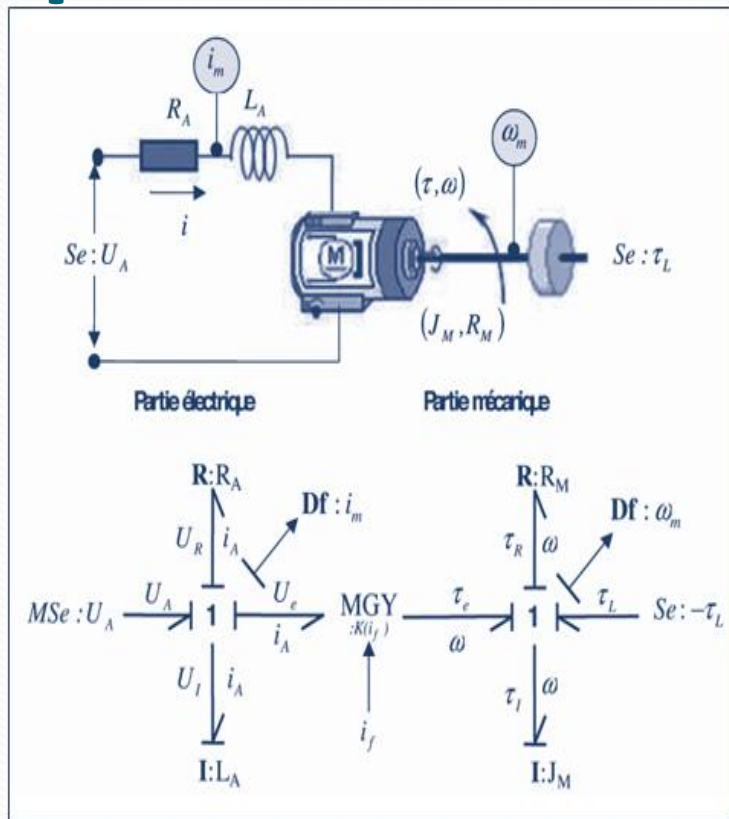
$$F(D_e, D_f, S_e, S_f, MSe, MSf, \theta) = r \approx 0$$



# Surveillabilité structurelle

- Ce résidu ou indicateur de faute exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle (supposées décrire correctement le processus).

# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

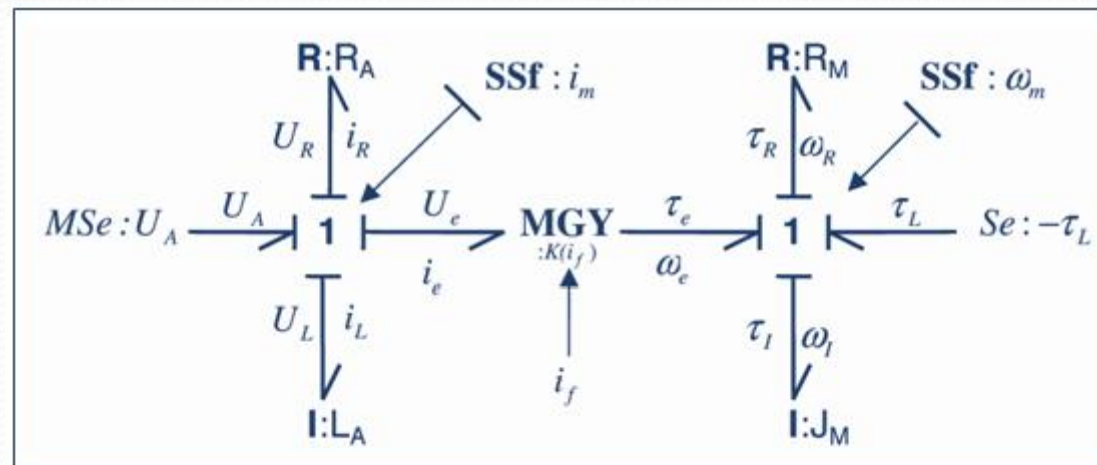


Modèle Bond-Graph en causalité intégrale du Moteur C-C

Les conditions initiales dans les processus industriels **ne sont pas connues** en général, c'est pourquoi le modèle Bond graph initial utilisé pour le **diagnostic** est mis en **causalité dérivée**.

# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

Les conditions initiales dans les processus industriels ne sont pas connues en général, c'est pourquoi le modèle Bond graph initial utilisé pour le diagnostic est mis en causalité dérivée.



Modèle Bond-Graph en causalité dérivée du Moteur C-C

# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

En plus de ses propriétés causales, le modèle Bond graph possède des propriétés structurelles permettant de représenter un système par un graphe bipartite

$G(C,A,Z)$  avec deux partitions :

1. l'ensemble des contraintes  $C$  (modèles)
2. et l'ensemble des variables  $Z$ .

$A$  est l'ensemble des arcs défini comme suit:  $(c_i, z_j) \in A$  si la variable  $z_j$  apparaît dans la contrainte  $c_i$

# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

L'ensemble des contraintes  $C$  est représenté par l'union des

- **contraintes structurelles** : équation de conservation d'énergie issues des jonctions,
- **contraintes de comportement** : comment l'énergie est transformée, issues des équations constitutives des éléments Bond graph,
- **Contraintes des équations de mesure**: issues des équations des détecteurs.

# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

Les variables sont constituées des variables connues  $K$  et inconnues  $X$ .

- Les variables connues  $K$  sont celles des détecteurs et des sources,
- et les variables inconnues  $X$  sont celles des liens de puissances dans les éléments  $C$ ,  $I$  et  $R$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{J1A} : U_A - U_R - U_L - U_e = 0, i_R = i_l = i_e = i \\ C_{RA} : U_R - R_A i_R = 0 \\ C_{LA} : U_l - L_A \frac{d}{dt} i_L = 0 \\ C_{GY2} : \tau_e - K(i_f) i_e = 0 \\ C_{J1M} : -\tau_L - \tau_R - \tau_l + \tau_e = 0, \omega_R = \omega_L = \omega_e = \omega \\ C_{GY1} : U_e - K(i_f) \omega_e = 0 \\ C_{RM} : F_{RM}(\tau_R, \omega_R) = 0 \\ C_{JM} : \tau_l - J_M \frac{d}{dt} \omega_l = 0 \\ C_{m1} : i = i_m \\ C_{m2} : \omega = \omega_m \end{array} \right.$$

$$C_{d1} : z_1 = \frac{di}{dt}$$

$$C_{d2} : z_2 = \frac{d\omega}{dt}$$



# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

- Les variables inconnues et connues déduites du modèle Bond graph du moteur sont :

$$\begin{cases} X = \{U_R, i_R\} \cup \{U_L, i_L\} \cup \{U_c, i_c\} \cup \{\tau_c, \omega_c\} \cup \{\tau_l, \omega_l\} \cup \{\tau_R, \omega_R\} \\ K = \{i_m, \omega_m\} \cup \{U_A, \tau_L\} \end{cases}$$

- Aux variables inconnues sont ajoutées les variables  $z_1$  et  $z_2$

# Méthodologie Bond graph

## pour la surveillance

### *Génération des indicateurs de fautes*

L'algorithme de génération des RRAs à partir du modèle BG est réalisé selon les étapes suivantes :

1. Mettre le modèle Bond graph en causalité dérivée en inversant les causalités des capteurs. Ainsi les capteurs deviennent des sources d'information notées SSf ou SSe (source de signal).
2. Écrire l'équation de structure de jonction 0 et 1 (représentant la conservation de puissance) contenant au moins un détecteur :  $\sum_{i=1}^n e_i = 0$ , ou  $\sum_{i=1}^n f_i = 0$ .

- Éliminer les variables inconnues ( $e$  ou  $f$ ) en parcourant les chemins causaux sur le Bond graph de la variable inconnue vers une variable connue (capteur ou source),
- pour tout détecteur dont la causalité est inversée, une RRA est déduite,
- Pour tout détecteur dont la causalité ne peut être inversée, une RRA est déduite en mettant à égalité sa sortie avec la sortie d'un autre détecteur de même nature situé dans la même jonction

# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

$$C_{J1A} : U_A - U_R - U_L - U_e = 0$$

Les variables  $U_A$ ,  $U_R$ ,  $U_L$  et  $U_e$  sont inconnues. Elles seront éliminées sur le graphe par parcours de chemins causaux des variables inconnues aux variables connues (capteurs ou sources d'énergie) comme suit:

$$\begin{cases} U_A \rightarrow MSe \\ U_R \rightarrow C_{RA} \rightarrow i_R \rightarrow C_{m1} \rightarrow SSf : i_m \\ U_L \rightarrow C_{LA} \rightarrow z_1 \rightarrow C_{d1} \rightarrow i_L \rightarrow C_{m1} \rightarrow SSf : i_m \\ U_e \rightarrow C_{GY1} \rightarrow \omega_e \rightarrow C_{m2} \rightarrow SSf : \omega_m \end{cases}$$

3. On génère alors la première RRA en remplaçant dans l'équation de jonction les variables inconnues par leurs expressions :

$$RRA1 = MS_e - R_A i_m - L_A \frac{di_m}{dt} - K \omega_m$$

# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

4. On passe à la jonction suivante.  $C_{J1M} : -\tau_R - \tau_I + \tau_e + \tau_L = 0$

5. La même procédure conduit à la RRA Suivante:

$$RRA2 = -Se - F_{RM}(\omega_m, R_M)^{-1} - J_M \frac{d\omega_m}{dt} + Ki_m$$

Si la seconde RRA est indépendante (signature différente) de la première, alors elle est gardée, sinon elle est rejetée. Le lecteur pourra par exemple vérifier que les RRAs déduites des équations de conservation du gyrateur dépendent de celles obtenues à partir des jonctions 1. Finalement répéter les points 4 jusqu'à obtention de l'ensemble des RRAS indépendantes. Ce processus d'élimination des variables inconnues se ramène à un graphe orienté montrant l'ordre de calcul de la RRA

# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

## Décision

- *Matrice de signature de fautes*

La structure des RRAs forme une matrice de signature de fautes (MSF) binaire  $S_{ij}$  qui nous renseigne sur la sensibilité des résidus aux défaillances de composants du processus physique (capteurs, actionneurs, régulateurs, éléments physiques). Les éléments de la matrice sont définis comme suit:

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le } R_i \text{ est sensible au } j^{\text{ème}} \text{ défaut} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La MSF fournit la logique pour la localisation des défaillances détectées durant le fonctionnement du système.

# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

## Décision

- *Matrice de signature de fautes*

L'objectif de la procédure de localisation est de fournir à l'opérateur la liste des composants défaillants (choisie en fonction du cahier de charges)  $M_b$  (Monitorability) et  $I_b$  (isolability) représentent respectivement les indices booléens de détectabilité et d'isolabilité.

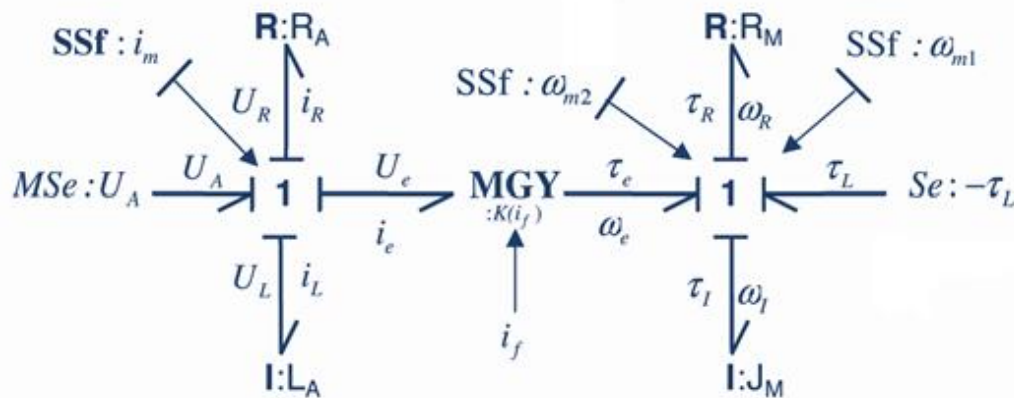
On voit que tous les défauts pouvant affecter les composants sont détectables mais aucun n'est isolable.

Ri/fautes	R1	R2	$M_b$	$I_b$
<i>Mse</i>	1	0	1	0
$i_m$	1	1	1	0
$\omega_m$	1	1	1	0
<i>GY</i>	1	1	1	0
<i>Elec.</i>	1	0	1	0
<i>Méca.</i>	0	1	1	0
<i>Charge</i>	0	1	1	0

# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

- *Placement de capteurs*
- La surveillabilité d'un système industriel dépend du nombre et de placement de capteurs.
- Grâce à son architecture graphique le modèle Bond graph permet un placement explicite de capteurs. On peut soit proposer un placement combinatoire de capteur ou d'une façon graphique « manuelle » directement sur le Bond
- Exemple:
- ajout de capteur  $\omega_{m_2}$  redondant à celui placé dans la partie mécanique  $\omega_{m_1}$ , permet d'améliorer la surveillabilité du système global comme l'indique la MSF.
- Le capteur redondant ne peut pas être dualisé sans introduire un conflit de causalité sur la jonction 1. Une RRA matérielle  $R_3$  est alors déduite

# Méthodologie Bond graph pour la surveillance



Ri/fautes	R1	R2	R3	M <sub>b</sub>	I <sub>b</sub>
Mse	1	0	0	1	0
i <sub>m</sub>	1	1	0	1	0
ω <sub>m</sub>	1	1	1	1	1
GY	1	1	0	1	0
Elec.	1	0	0	1	0
Méca.	0	1	0	1	0
Charge	0	1	0	1	0
ω <sub>m1</sub>	0	0	1	1	1



# Méthodologie Bond graph pour la surveillance

- ***Conclusion***

La réalisation d'un système de surveillance à base de modèle est une opération coûteuse nécessitant plusieurs étapes complexes. L'outil Bond graph, par ses propriétés causales et structurelles grâce à son aspect graphique, et comportemental par son architecture fonctionnelle est

bien adapté pour la conception de tels systèmes. Enfin cet outil, par ses aspects génériques, a permis la mise en place d'un outil logiciel pour l'automatisation des procédures diminuant le coût de la conception des systèmes de surveillance.