

---

# Vers l'intégration diagnostic/pronostic pour la maintenance des systèmes complexes

---

Pauline Ribot

Sous la direction de Yannick Pencolé et Michel Combacau

LAAS-CNRS – Groupe Diagnostic Supervision et Conduite (DISCO)

The logo for LAAS-CNRS, featuring the text "LAAS-CNRS" in a bold, blue, sans-serif font. Above the text is a horizontal bar with a red top half and a yellow bottom half. Below the text is a solid yellow horizontal bar.



UNIVERSITÉ  
de Toulouse

## ► Problématique de la maintenance

- Système : ensemble d'éléments assurant une fonction
- Améliorer la fiabilité, sécurité, qualité du système
- Décision d'actions de maintenance corrective
  - Remplacer les composants en faute (incapables de réaliser leur fonction)
    - ⇒ DIAGNOSTIC
- Réduire l'indisponibilité du système
  - Minimiser la durée des interventions, minimiser le nombre d'actions de maintenance
- Améliorer la maintenance préventive
  - Programmation des phases de maintenance
    - ⇒ PRONOSTIC

# Sommaire

- I. Contexte et problématique
- II. Du diagnostic au pronostic
- III. Retour sur conception pour la diagnosticabilité d'un SED
- IV. Conclusion et perspectives

# Contexte et problématique

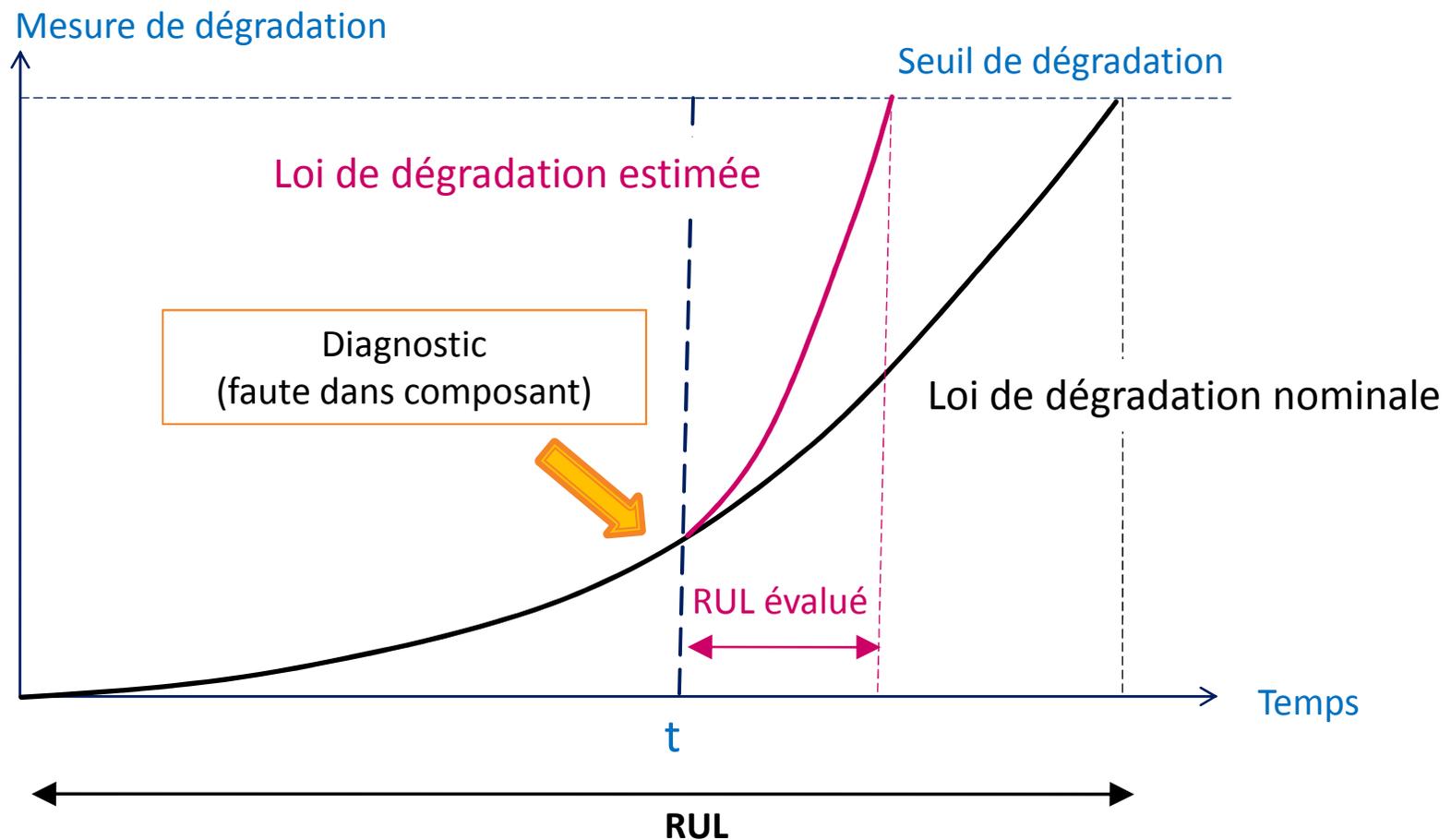
# Diagnostic et pronostic

5

- ▶ Réparer le système : nécessité d'un **diagnostic** en ligne
    - Identifier les composants en faute responsables des défaillances du système
    - Connaissance sur le comportement des composants du système (nominal ou en présence de faute)
    - Surveiller les composants : observations en ligne
  
  - ▶ Prévoir les défaillances du système : nécessité d'un **pronostic**
    - Prédire la durée de vie résiduelle (RUL) d'un composant/système en service
    - Connaissance sur le vieillissement, la dégradation des composants
    - Mise en jour du pronostic en fonction des facteurs de stress (solicitations anormales)
- ⇒ Considérer l'impact d'occurrences de fautes sur le vieillissement des composants

# Impact du diagnostic pour le pronostic

6



# Application aux systèmes complexes

7

- ▶ **Système à composants multiples**
  - Composants hétérogènes
  - Composants communicants
  - Composants redondants
- ▶ **Assurant un ensemble de fonctions objectif**
  - Fonctions élémentaires de base
  - Fonctions hiérarchisées
- ▶ **Conception décentralisée : sous-traitance**
  - Différents niveaux de connaissance pour chaque composant

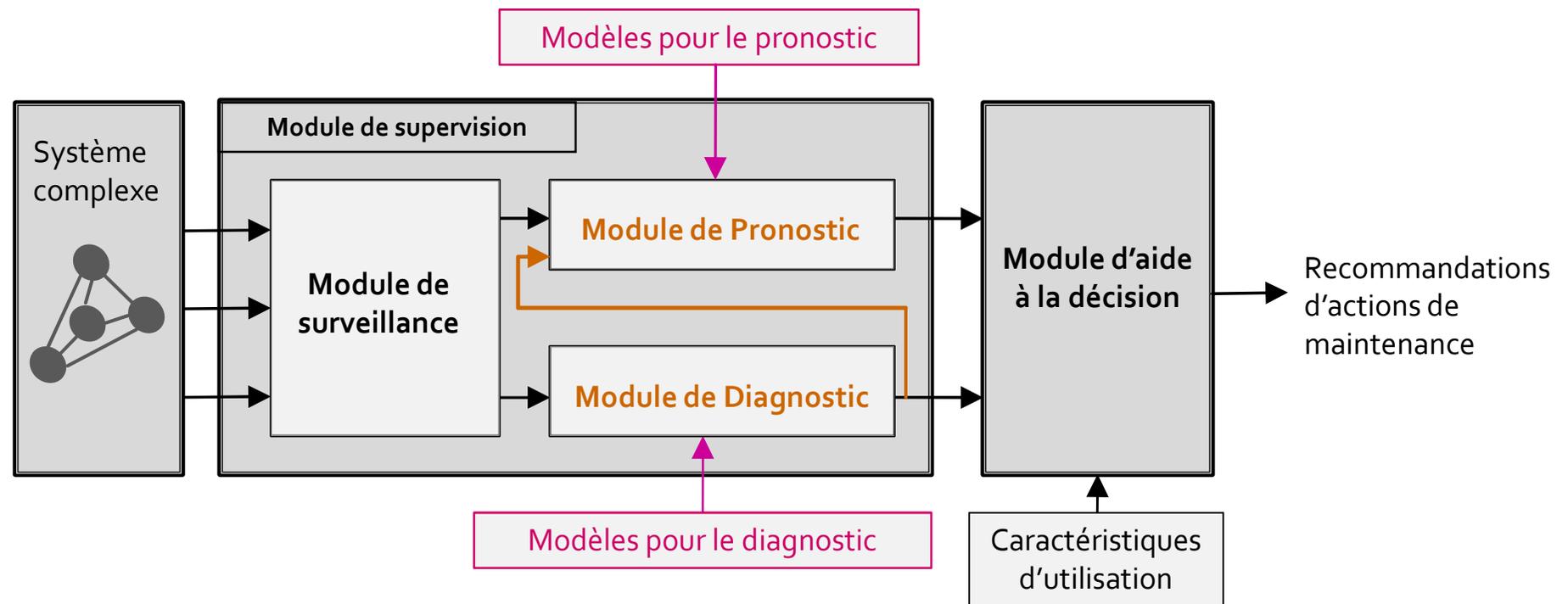
⇒ **Domaine aéronautique : Projet ARCHISTIC**

(avec Airbus et l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes)

# Objectif général

8

- ▶ Proposer une architecture embarquée de diagnostic/pronostic pour améliorer l'efficacité de la maintenance préventive des systèmes complexes



# Du diagnostic au pronostic

- Cadre de modélisation générique
- Caractérisation du diagnostic
- Couplage diagnostic/pronostic
- Caractérisation du pronostic

# Système et composants

10

## ► Système complexe $\Sigma$

– Modèle  $\Sigma = \langle P, R, A \rangle$

- Ensemble de paramètres :  $\{ p^k \}$
- Relations :  $\{ ar^k \mid \exists p^j = ar^k (p^i, \dots, p^m) \}$
- Rangs des paramètres :  $\{ r(p^k) \}$

$$\begin{aligned} & \{ U, R, I \} \\ & ar^1: U = RI \\ & r(R) = \{6\}\Omega, r(U) = [0, 30]V, r(I) = [0, 5]A \end{aligned}$$

– Mise en œuvre d'un ensemble de fonctions objectif  $Fu_s$

⇒ Système multi-composants  $\{ C^1, C^2, \dots, C^N \}$

$Fu_s \equiv$  Fournir une tension

## ► Composant $C^i$

– Modèle  $C^i = \langle P^i, R^i, A^i \rangle$

– Mise en œuvre d'un ensemble de fonctions élémentaires  $Fu^i$

# Modélisation structurelle

## ► Modèle structurel d'un composant $C^i$

– Description des interactions entre composants par les **paramètres partagés**

- **Paramètre d'entrée**  $ip^{i,k}$ : ne dépend pas des autres paramètres de  $C^i$

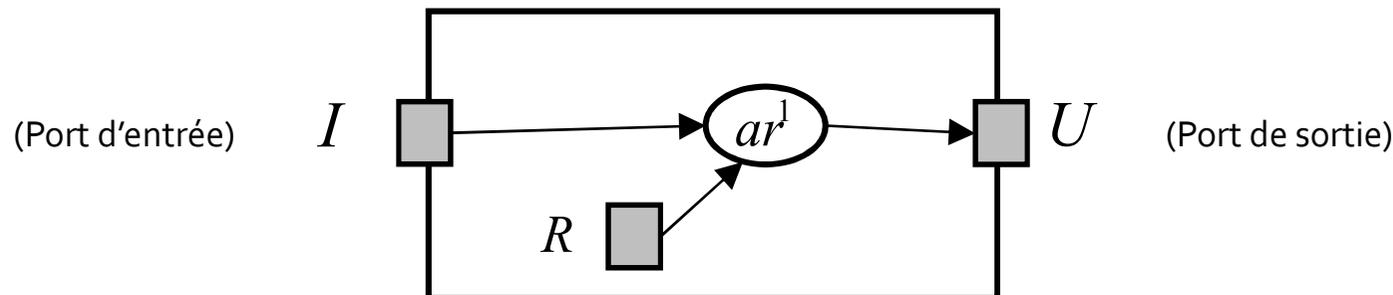
$$ip^{i,k} \in IP^i \Leftrightarrow \exists C^j, j \neq i \mid ip^{i,k} \in P^j \wedge \nexists ar^{i,k} \mid ip^{i,k} = ar^{i,k}(p^{i,1}, \dots, p^{i,m})$$

- **Paramètre de sortie**  $op^{i,k}$ : déterminé par les relations du modèle de  $C^i$

$$op^{i,k} \in OP^i \Leftrightarrow \exists C^j, j \neq i \mid op^{i,k} \in P^j \wedge \exists ar^{i,k} \mid op^{i,k} = ar^{i,k}(p^{i,1}, \dots, p^{i,m})$$

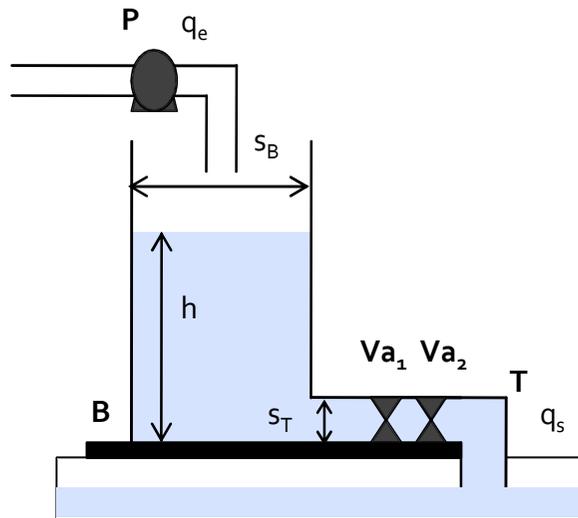
- **Paramètre privé**  $pp^{i,k}$ : appartient uniquement à  $C^i$

$$pp^{i,k} \in PP^i \Leftrightarrow \nexists C^j, j \neq i \mid pp^{i,k} \in PP^j$$

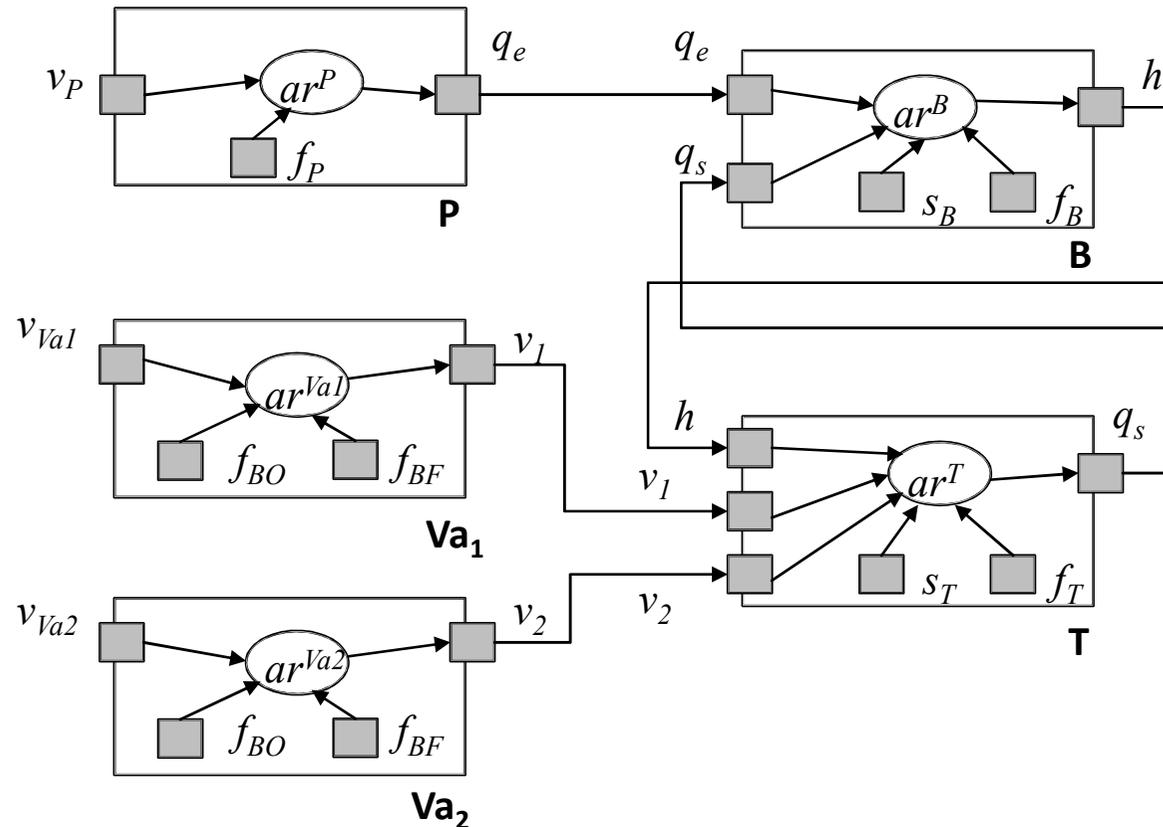


# Modélisation structurelle

- ▶ Modèle structurel d'un système  $\Sigma$  (Exemple d'un système de réservoir)



$$ar^B : \dot{h} = (q_e - q_s - f_B) / s_B$$



# Modélisation fonctionnelle

13

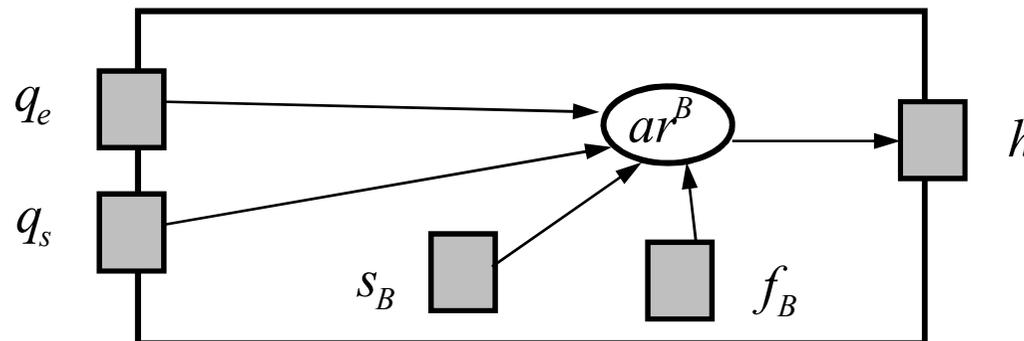
## ► Vue fonctionnelle d'un composant $C^i$

- **Condition fonctionnelle** : contrainte entre un paramètre de sortie et des paramètres d'entrée/privés

$$Fu^{i,j} \equiv (op^{i,j} = ar^{i,j} ( ip^{i,1}, \dots, ip^{i,l_i}, pp^{i,1}, \dots, pp^{i,r_i} ))$$

- Repose sur le comportement nominal du composant
- Une fonction élémentaire est **disponible** si la contrainte sur les paramètres est vérifiée

(Exemple du système de réservoir)



$$Fu^B \equiv (h = ar^B(q_e, q_s, s_B, f_B))$$
$$Fu^B \equiv (\dot{h} = (q_e - q_s - f_B) / s_B)$$

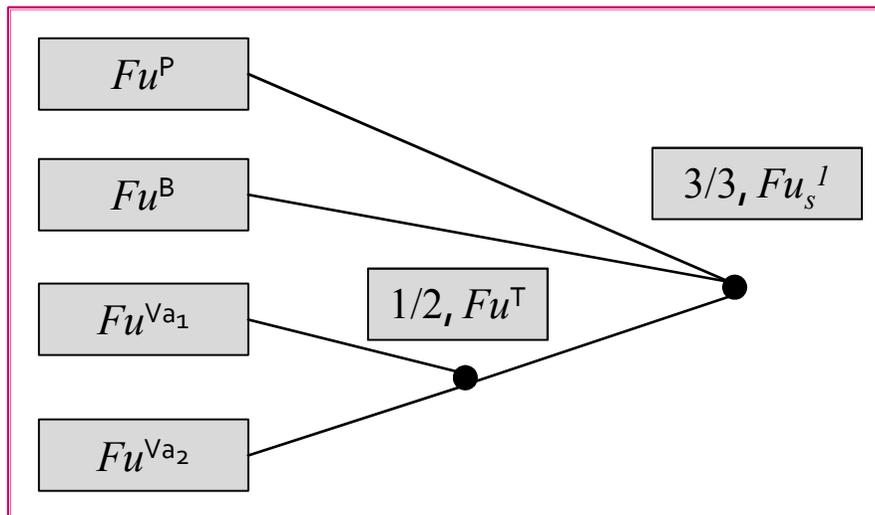
# Modélisation fonctionnelle

14

## ► Modèle fonctionnel du système

- Décrit les **dépendances fonctionnelles** :  $Pred(Fu_i) = \{Fu_j, \dots, Fu_k\}$ 
  - Prédécesseurs de fonctions
- Exprime les **redondances** :  $n/m[Pred(Fu_i)] = \{X \subseteq Pred(Fu_i) \text{ s.t. } ||X||=n\}$ 
  - Relations entre les prédécesseurs de fonctions
- Représentation graphique : arbre de fonctions

(Exemple du système de réservoir)



Redondances des composants (vannes) :

$$1/2 [Pred(Fu^T)] = \{\{Fu^{Va1}\} \{Fu^{Va2}\}\}$$

Fonction objectif du système :

$Fu_s^I$  : « Maintenir  $h$  entre 0.4m et 0.6m »

# Modes opérationnels pour le diagnostic

15

- ▶ Mode nominal  $m_n^i$ 
  - Connaissance du comportement nominal du système
  - Modèle du mode nominal :  $C_n^i = \langle P^i, R_n^i, A_n^i \rangle$
  - Toutes les fonctions élémentaires du composant sont disponibles
    - tous les paramètres sont dans leur rang nominal :  $\forall j, p^{i,j} \in r_n(p^{i,j})$
- ▶ Mode de faute  $m_f^i$ 
  - Connaissance d'un comportement en présence de faute  $f$
  - Modèle de faute :  $C_f^i = \langle P^i, R_f^i, A_f^i \rangle$
  - Cause d'une ou plusieurs défaillances (perte de fonctions)
    - un paramètre privé n'est pas dans son rang nominal :  $\exists j, pp^{i,j} \notin r_n(pp^{i,j})$
- ▶ Mode anormal  $m_a^i$ 
  - Repose sur la connaissance du comportement nominal (ou plus)
  - Au moins une fonction élémentaire du composant n'est plus disponible
    - un paramètre d'entrée n'est pas dans son rang nominal :  $\exists j, ip^{i,j} \notin r_n(ip^{i,j})$

## Diagnostic local – niveau composant

16

### ▶ Diagnostic et mode

- Modes pour un composant  $C^i$  :  $Mode(C^i) = \{m_n^i, m_a^i, m_{f1}^i, \dots, m_{fk}^i\}$
- Déterminer le mode courant  $m_x^i$  de chaque composant  $C^i$  qui est cohérent avec les modèles et les observations locales disponibles  $OBS^i$ .

### ▶ Diagnostic de séquence de modes

- Déterminer la séquence de modes passés  $(m_0^i m_1^i \dots m_j^i)$  de chaque composant  $C^i$  qui est cohérente avec les modèles et l'ensemble complet des observations  $OBS_j^i$

### ▶ Candidat local de diagnostic

$$(m_0^i \dots m_j^i) \mid \forall m_j^i \in Mode(C^i), \forall p^{i,k} \in OBS^i, p^{i,k} \in r_x^i(p^{i,k})$$

- ### ▶ Diagnostic local $\Delta^i$ à l'instant $t_j$ : ensemble des candidats locaux de diagnostic à l'instant $t_j$

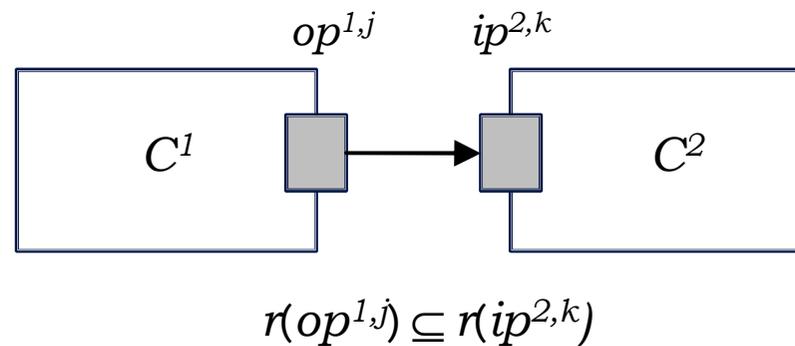
## Diagnostic global - niveau système

17

- ▶ Déterminer le mode courant  $m_j^\Sigma$  du système :

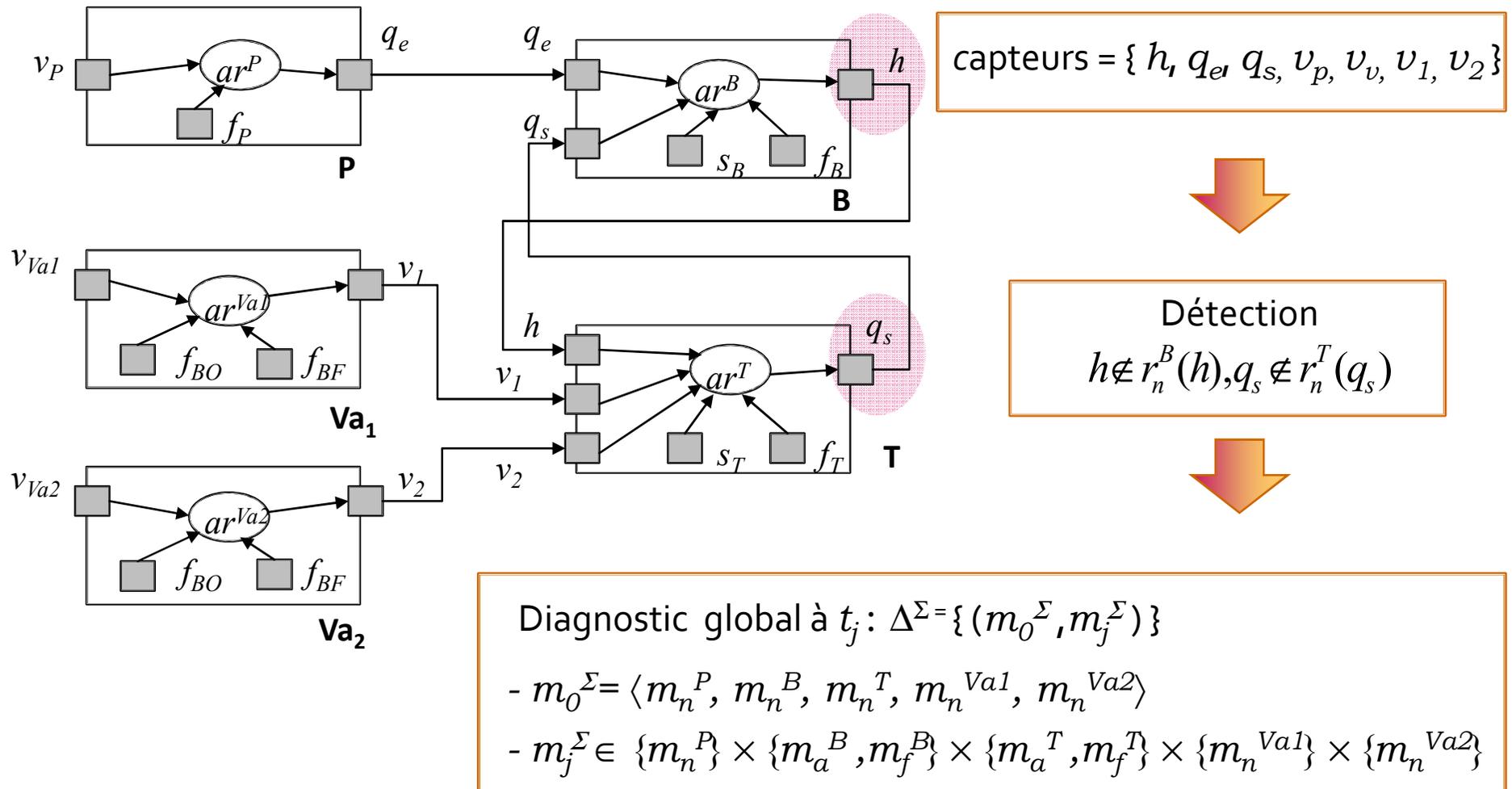
$$m_j^\Sigma = \langle m_j^1, \dots, m_j^i, \dots, m_j^N \rangle$$

- Fusion des candidats locaux de diagnostic :  $m_j^\Sigma \in \langle \Delta_j^1 \times \dots \times \Delta_j^N \rangle$
- Confirmer/éliminer les candidats locaux de diagnostic pour conserver la cohérence globale
- Cohérence globale = compatibilité des modes des composants



- ▶ Candidat de diagnostic pour  $\Sigma$  à un instant  $t_j$  : N-uplet  $\langle m_j^1, \dots, m_j^i, \dots, m_j^N \rangle$
- ▶ Diagnostic global  $\Delta^\Sigma$  à l'instant  $t_j$  : ensemble des candidats de diagnostic à  $t_j$

# Diagnostic – Exemple du système de réservoir



# Couplage du diagnostic et du pronostic

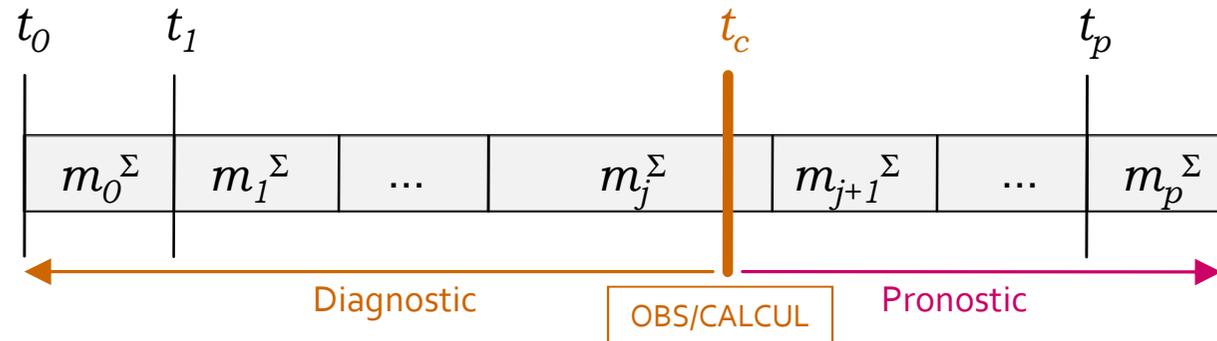
19

## ▶ Séquence de modes du système

- Comportement du système  $\equiv$  succession de modes de  $t_0$  à  $t_p$

## ▶ Changement de mode

- Causes : occurrence d'une faute physique sur un composant, condition anormale
- Effets : défaillances – perte de fonctions élémentaires



- ▶ **Diagnostic  $\Delta^\Sigma$** : à l'instant  $t_c \in [t_j, t_{j+1}]$ , déterminer la séquence de modes  $\mathbf{m}_0^\Sigma \dots \mathbf{m}_j^\Sigma$  de  $t_0$  à  $t_c$  à partir des observations acquises de  $t_0$  à  $t_c$

- ▶ **Pronostic  $\Pi^\Sigma$** : à l'instant  $t_c \in [t_j, t_{j+1}]$ , calculer la séquence de modes  $\mathbf{m}_{j+1}^\Sigma, \dots, \mathbf{m}_p^\Sigma$  jusqu'à  $t_p$ .

# Caractérisation du problème de pronostic

20

- ▶ Littérature : pronostic  $\equiv$  prédiction du RUL d'un composant/système
- ▶ Dans notre cadre : pronostic  $\equiv$  prédiction de la séquence future de modes
  - $t_{j+1}$  date du prochain changement de mode
  - $RUL(C^i) = t_{j+1} - t_c$  où  $C^i$  est le prochain composant en faute
- ▶ Comment calculer la probabilité d'une séquence future de modes pour le système ?
  - Ensemble des dates  $t_{j+1}, \dots$  : prédictions reposant sur des lois de probabilité
  - Loi de vieillissement  $ag^{i,k}$  d'un paramètre privé  $\rightarrow$  loi de probabilité de faute d'un paramètre privé
- ▶ Difficultés :
  - Systèmes complexes constitués de composants hétérogènes
    - Différents types de lois de vieillissement
  - Systèmes complexes constitués de composants redondés
    - Pronostic fonctionnel

$\Rightarrow$  Représenter de manière générique le pronostic pour encapsuler tous les cas possibles

$\Rightarrow$  Obtenir un pronostic pour chaque fonction objectif du système

# Définition d'une fonction générique de pronostic

21

## ► Probabilité de faute d'un paramètre privé

- A une loi de vieillissement  $ag^{i,k}(m_x^i)$  correspond une affectation de valeurs pour ensemble de caractéristiques

- Exemple du modèle de Weibull  $\{\eta_{pp^{i,k}}(m_x^i), \beta_{pp^{i,k}}(m_x^i), \theta_{pp^{i,k}}(m_x^i)\}$

- Calcul du temps restant avant qu'un paramètre privé  $pp^{i,k}$  soit en faute

- Exemple du modèle de Weibull

$$RTF(pp^{i,k}) = t \text{ tel que } \int_0^t W(t; \beta_{pp^{i,k}}, \eta_{pp^{i,k}}, \theta_{pp^{i,k}}) dt = P(pp^{i,k})$$

- $P(pp^{i,k})$  : seuil de probabilité à partir duquel le composant est déclaré non opérationnel

## Définition d'une fonction générique de pronostic

22

### ► Evaluation de la disponibilité d'une **fonction élémentaire** d'un composant

- Déterminer le temps restant avant la perte d'une fonction élémentaire  $Fu^i$

$$ettf(Fu^i) = \min(RTF(pp^{i,k}), pp^{i,k} \in PP(Fu^i))$$

- $PP(Fu^i)$  : ensemble de paramètres privés sur lesquels repose la disponibilité de  $Fu^i$
- Un composant fonctionne correctement si ses fonctions élémentaires sont disponibles

$$RUL(C^i) = \min(ettf(Fu^i), Fu^i \in FU^i)$$

### ► Evaluation de la disponibilité d'une **fonction objectif** du système

- Découle des  $ettf$  des fonctions élémentaires des composants
- Tient compte des dépendances fonctionnelles (redondances dans le système)

$$ettf(Fu_i) = \max_{X \in n/m[Pred(Fu_i)]} [\min_{Fu_j \in X} (ettf(Fu_j))]$$

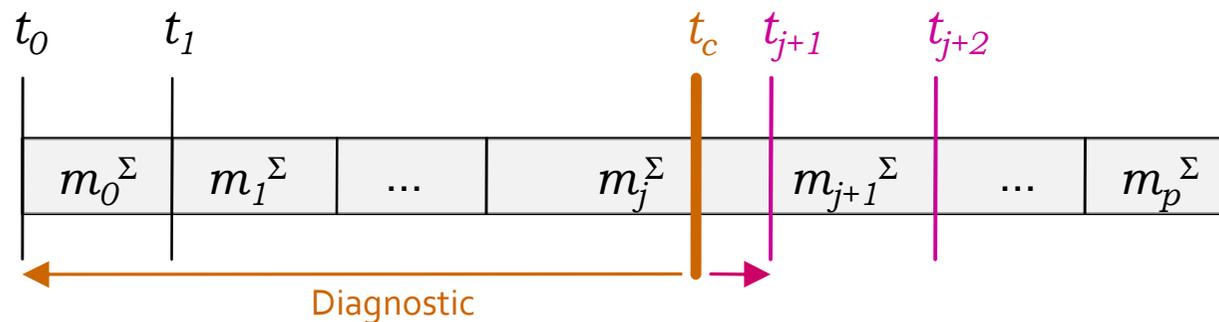
- Déterminer le temps restant avant la défaillance du système

$$RUL(\Sigma) = \min(ettf(Fu_s^k), Fu_s^k \in FU_s)$$

# Méthode récursive couple diagnostic et pronostic

23

1. Déterminer  $m_j^\Sigma$  à partir d'un candidat de diagnostic courant
2. Sélectionner les lois de vieillissement  $\{ag_j^{i,k}\}$  des paramètres du système et calculer  $t_{j+1}$
3. Initialiser le pronostic  $\Pi_j^\Sigma = \langle m_{j+1}^\Sigma \rangle$
4. A partir du dernier mode de  $\Pi_j^\Sigma$ , sélectionner  $\{ag_{j+1}^{i,k}\}$  et calculer  $t_{j+2}$
5. Compléter le pronostic :  $\Pi_{j+1}^\Sigma = \langle \Pi_j^\Sigma \cdot m_{j+2}^\Sigma \rangle$ .
6.  $j \leftarrow j+1$  et revenir à l'étape 4.



$$\text{Pronostic : } \Pi^\Sigma = \langle m_{j+1}^\Sigma \cdot m_{j+2}^\Sigma \rangle$$

## Critères de performance : définitions

24

1. Déterminer  $m_j^\Sigma$  à partir d'un candidat de diagnostic courant
2. Sélectionner les lois de vieillissement  $\{ag_j^{i,k}\}$  des paramètres du système et calculer  $t_{j+1}$
3. Initialiser le pronostic  $\Pi_j^\Sigma = \langle m_{j+1}^\Sigma \rangle$
4. A partir du dernier mode de  $\Pi_j^\Sigma$ , sélectionner  $\{ag_{j+1}^{i,k}\}$  et calculer  $t_{j+2}$
5. Compléter le pronostic :  $\Pi_{j+1}^\Sigma = \langle \Pi_j^\Sigma \cdot m_{j+2}^\Sigma \rangle$ .
6.  $j \leftarrow j+1$  et revenir à l'étape 4.

### ► Propriétés sur le système

#### – Diagnosticabilité

- Modes de faute diagnostiqués sans ambiguïté à partir des observations en ligne
- Diagnosticabilité d'un mode de faute → diagnosticabilité d'une séquence de modes

Diagnosticable :  
un seul candidat de diagnostic

## Critères de performance : définitions

25

1. Déterminer  $m_j^\Sigma$  à partir d'un candidat de diagnostic courant
2. Sélectionner les lois de vieillissement  $\{ag_j^{i,k}\}$  des paramètres du système et calculer  $t_{j+1}$
3. Initialiser le pronostic  $\Pi_j^\Sigma = \langle m_{j+1}^\Sigma \rangle$
4. A partir du dernier mode de  $\Pi_j^\Sigma$ , sélectionner  $\{ag_{j+1}^{i,k}\}$  et calculer  $t_{j+2}$
5. Compléter le pronostic :  $\Pi_{j+1}^\Sigma = \langle \Pi_j^\Sigma \cdot m_{j+2}^\Sigma \rangle$ .
6.  $j \leftarrow j+1$  et revenir à l'étape 4.

### ► Propriétés sur le système

#### – Diagnosticabilité

- Modes de faute diagnostiqués sans ambiguïté à partir des observations en ligne
- Diagnosticabilité d'un mode de faute → diagnosticabilité d'une séquence de modes

#### – Pronosticabilité

- Date des défaillances du système calculées à partir des modèles de vieillissement des paramètres

Pronosticable : modèles de vieillissement disponibles pour calculer la date de la prochaine défaillance

## Critères de performance : pré-requis de conception

26

- ▶ Besoin d'un retour sur conception pour améliorer la performance de l'architecture de supervision
  - Diagnosticabilité : rajouter des capteurs sur les composants
  - Pronosticabilité : rajouter des modèles de vieillissement pour les paramètres
  
- ▶ Caractérisation de pré-requis dans la conception du système complexe
  - Modifications dans les spécifications des composants
    - Améliorer l'observabilité des composants
  - Optimisation du coût de la conception

Déterminer les caractéristiques et les modifications pour les concepteurs afin de garantir la diagnosticabilité d'un système multi-composants

# Retour sur conception pour la diagnosticabilité d'un SED

# Du formalisme générique au formalisme des SED

Paramètre interne  $\equiv$  vecteur d'état

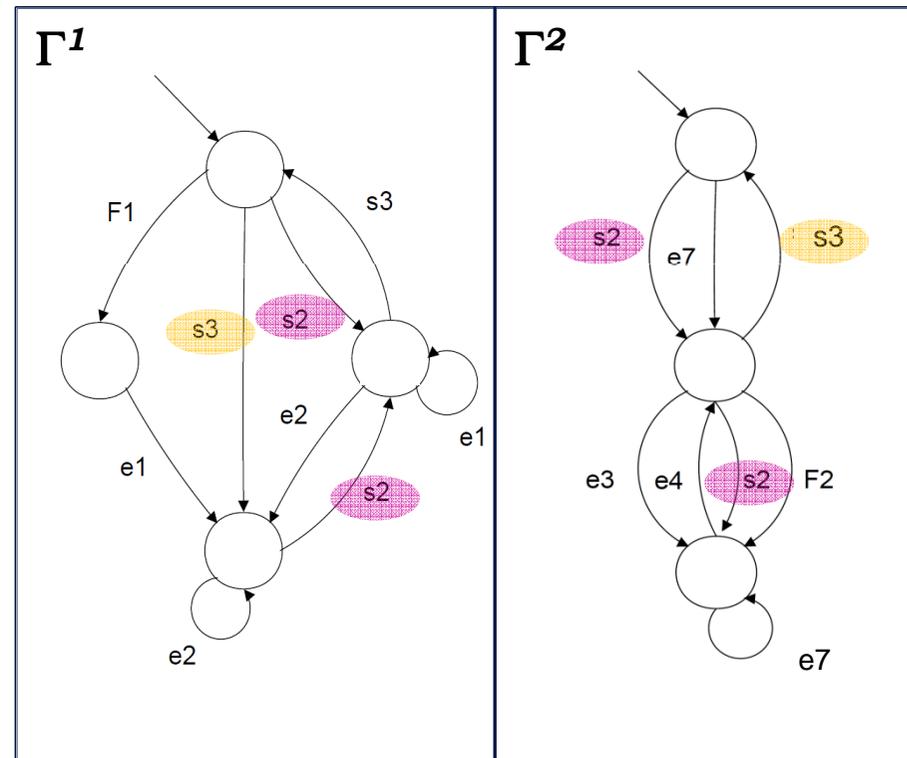
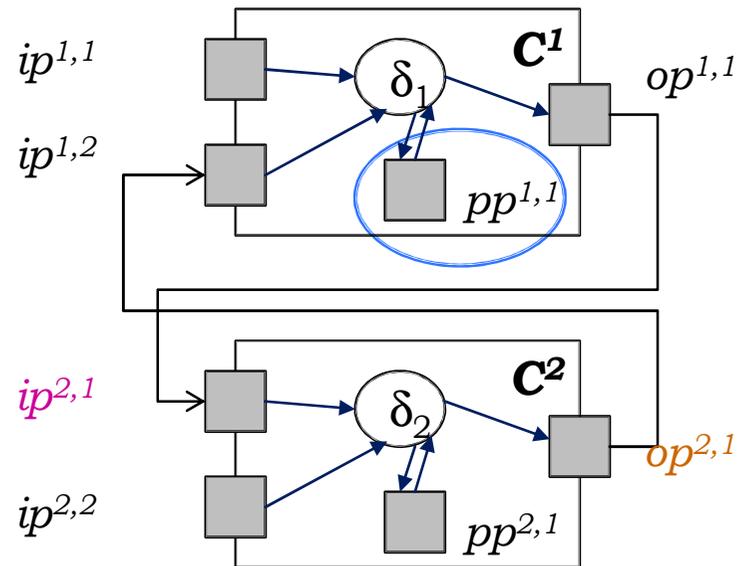


Diagramme d'état  $\equiv$  représentation de  $\delta_1$

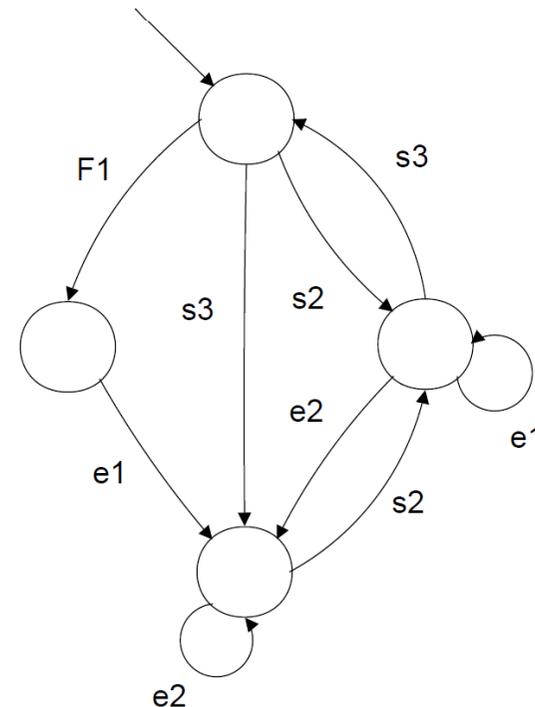
# Formalisme des SED

29

- ▶ **Système** : ensemble de  $N$  composants communicants
- ▶ **Modèle du système**  $\Gamma = \{\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n\}$ , où  $\Gamma_i$  est le modèle d'un composant
- ▶ **Modèle d'un sous-système**  $\gamma = \{\Gamma_{i_1}, \Gamma_{i_2}, \dots, \Gamma_{i_m}\}$ , où  $m \leq n$

**Modèle d'un composant:**  $\Gamma_i = (Q_i, \Sigma_i, T_i, q_{oi})$

- $Q_i$ , ensemble fini d'états
- $\Sigma_i$ , ensemble des événements survenant sur  $\Gamma_i$  :  
$$\Sigma_i = \Sigma_{li} \cup \Sigma_{ci}$$
  - $\Sigma_{li} \subseteq \Sigma_{oi} \cup \Sigma_{uoi}$  (événements locaux)
  - $\Sigma_{fi} \subseteq \Sigma_{li}$  (événements de faute)
  - $\Sigma_{ci} \subseteq \Sigma_{oi} \cup \Sigma_{uoi}$  (événements d'interaction)
- $T_i \subseteq Q_i \times \Sigma_i \times Q_i$ , ensemble des transitions
- $q_{oi}$ , état initial



# Diagnostic et diagnosticabilité sur les SED

30

## ▶ Diagnostic d'une faute

- Mode de faute : un ou plusieurs d'événements de faute
- Diagnostiqueur  $\Delta_\Gamma$ 
  - Détermine l'occurrence d'événement de faute  $F$  à partir des observations et des modèles
  - Fournit une information de diagnostic après avoir observé une séquence d'observations  $\sigma$  :

$$\Delta_\Gamma(F, \sigma) = \begin{cases} F - \textit{certain} \\ F - \textit{sain} \\ F - \textit{ambigu} \end{cases}$$

## ▶ Diagnosticabilité d'une faute

$F$  est diagnosticable dans le système  $\Gamma$  si son occurrence est toujours suivie par une séquence finie d'observations telle que le diagnostic de  $\Delta_\Gamma$  est  $F$ -certain.

# Modifications pour la conception d'un système

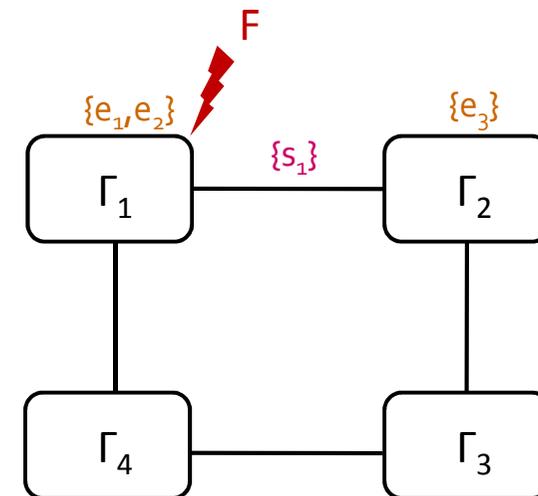
31

## ► Modifications pour garantir la diagnosticabilité du système $\Gamma$

- Améliorer l'observabilité de  $\Gamma$  : sélection de capteurs
  - Observer un événement survenant sur un composant
  - Observer un événement d'interaction entre deux composants

⇒ Chaque modification a un coût

## ► $C_D$ , coût des modifications sur le système



# Problème d'optimisation de coût

32

▶  $C_S$ , coût pour implémenter/déployer l'algorithme de surveillance

- Induit par le choix de l'architecture
  - Ressources mémoire
  - Protocole de communication, bande-passante
  - Processeur
- Dépend du sous-système surveillé

▶ Rendre le système diagnosticable en minimisant le coût global  $C_G$  :

$$C_G = \min \sum_{i=1}^p (C_{D_i} + C_{S_i})$$

$p$ , nombre de fautes

⇒ Compromis entre  $C_D$  et  $C_S$  : besoin d'une méthodologie

# Méthodologie - Diagnosticabilité locale et précision

33

## ► Proposition d'une méthodologie fondée sur la **diagnosticabilité locale** des fautes

–  $F$  un événement de faute survenant sur  $\gamma$

–  $F$  est localement diagnosticable dans  $\gamma$  si son occurrence sur  $\gamma$  est toujours diagnostiquée avec certitude à partir d'une séquence finie d'observations émises par  $\gamma$

*En faisant l'hypothèse d'observabilité équitable des composants :*

$F$  diagnosticable dans le sous-système  $\gamma \Rightarrow F$  diagnosticable dans le système  $\Gamma$

## ► Proposition d'une méthodologie guidée par la **précision** d'un diagnostic

– Le diagnostiqueur  $\Delta_\gamma$  d'un sous-système  $\gamma$  est précis s'il est suffisant pour fournir un diagnostic local qui est globalement cohérent :

pour  $\sigma \in \Sigma_o^*$ ,  $\Delta_\Gamma(F, \sigma) = \Delta_\gamma(F, \sigma_\gamma)$  où  $\sigma_\gamma = \text{Proj}_\gamma(\sigma)$

– Certitude d'avoir à tout instant un diagnostic local égal au diagnostic global

– Moyen de borner le coût de l'algorithme de surveillance  $C_s$

–  $C_p$ , coût pour rendre précis le diagnostiqueur d'un sous-système

# Méthodologie - Objectifs

34

## ▶ Méthodologie proposée

- Sélectionner un sous-système  $\gamma$  ayant des coûts minimaux ( $C_P, C_D, C_S$ ) pour une faute  $F$
- Fournir des recommandations pour ce sous-système  $\gamma$ 
  - Modifications pour rendre  $\gamma$  diagnosticable
  - Modifications pour rendre le diagnostiqueur de  $\gamma$  précis

⇒ Garantir simultanément deux propriétés : diagnosticabilité et précision

⇒ Monotonie des propriétés

# Méthodologie - Exemple

$$\Gamma = \{\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4\}$$

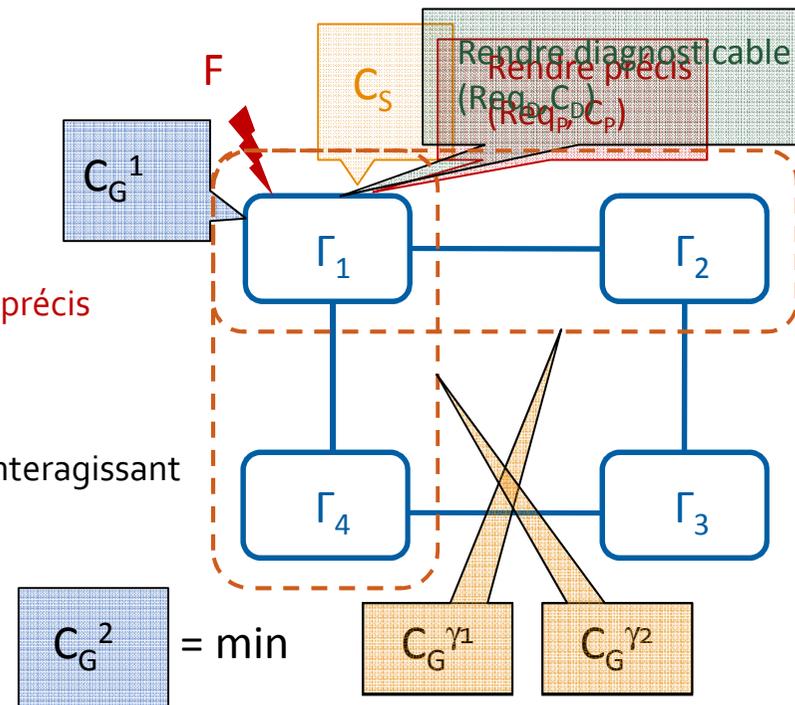
$$F \in \Sigma_{f_1}$$

1- Considérer le composant sur lequel F survient :  $\gamma = \Gamma_1$

- $C_S$ , coût de la surveillance de  $\gamma$
- $(Req_D, C_D)$ , pré-requis et coûts pour rendre  $\gamma$  diagnosticable
- $(Req_P, C_P)$ , pré-requis et coûts pour rendre le diagnostic de  $\gamma$  précis
- $C_G^1 = C_S + C_P + C_D$

2- Considérer tous les sous-systèmes composés de 2 composants interagissant et contenant  $\Gamma_1$  :  $\gamma_1 = \{\Gamma_1, \Gamma_2\}$  et  $\gamma_2 = \{\Gamma_1, \Gamma_4\}$

$$C_G^2 = \min \{C_G^{\gamma_1}, C_G^{\gamma_2}\}$$



3- Considérer tous les sous-systèmes composés de 3 composants interagissant et contenant  $\Gamma_1$  :  $\gamma_1 = \{\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3\}$  et  $\gamma_2 = \{\Gamma_1, \Gamma_3, \Gamma_4\}$ ,  $\gamma_3 = \{\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_4\}$

...

**A chaque étape k, condition d'arrêt :  $C_G^k > C_G^{k-1}$**

→ Sorties :

- Sous-système  $\gamma$
- $C_G^\gamma$
- Pré-requis :  $Req_p \cup Req_D$

# Conclusion et perspectives

# Conclusion

37

## Intégration du diagnostic et du pronostic dans le but d'aider à la prise de décision d'actions de maintenance pour un système complexe

- ▶ Proposition d'un cadre de modélisation générique formel pour le diagnostic et le pronostic d'un système complexe
- ▶ Couplage du diagnostic et du pronostic
- ▶ Caractérisation du pronostic
  - Définition d'une fonction générique de pronostic
- ▶ Retour sur conception pour la performance de l'architecture de supervision
  - Conception pour la diagnosticabilité et la pronosticabilité
  - Application aux systèmes à événements discrets

# Perspectives

38

- ▶ Probabiliser le diagnostic
  - Plusieurs candidats de diagnostic : plusieurs modèles de vieillissement sélectionnés
  - Probabilité associée à chaque candidat de diagnostic
  
- ▶ Généraliser le pronostic par la prédiction d'un intervalle temporel
  
- ▶ Approfondir l'étude de pronosticabilité d'un système
  
- ▶ Extension de la méthode de retour sur conception pour le pronostic
  - Rendre le système diagnosticable et pronosticable
  - Considérer des capteurs d'usure

Merci de votre attention