Outil et méthodologie pour l'évaluation des risques de procédé en temps réel

Matthieu Desinde, Jean-Marie Flaus, Stéphane Ploix

OUTIL ET METHODOLOGIE POUR L'EVALUATION DES RISQUES DE PROCEDE EN TEMPS REEL

TOOL AND METHODOLOGY FOR ONLINE RISK ASSESSMENT OF PROCESS

Matthieu DESINDE, Jean-Marie FLAUS, Stéphane PLOIX
Laboratoire d'Automatique de Grenoble
ENSIEG
BP 46
38402 Saint Martin d'Hères Cedex
FRANCE

Résumé

Les systèmes de sécurité actuels sont conçus de manière à alerter l'opérateur en cas de défaillance du système voire en cas de danger. Malheureusement, ces informations peuvent arriver trop tard et l'opérateur risque alors de n'avoir ni le temps, ni les moyens de faire face à des situations parfois dangereuses. Dans cet article, à partir d'un arbre de défaillance issu d'une analyse des risques de type AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leur Effets et Criticité), nous développons la notion de FPE (Fonction de Probabilité par Episode) pour temporiser et probabiliser chacun des événements de l'arbre de manière à ce que cet arbre de défaillance évolue dans le temps. Ainsi, en fonction du temps et de données issues du diagnostic, les probabilités de chaque événement évoluent. Enfin, une méthodologie est proposée pour évaluer en temps réel les risques de procédés à partir de l'arbre et pour déterminer les mesures nécessaires à prendre en fonction des risques à diminuer.

Summary

Current safety systems are designed to warn operators in case or failure or danger. Unfortunately, this information may come too late. As a result, operators may have neither enough time nor means faced with situation sometimes dangerous. In this paper, using a fault tree coming from a FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) analysis of the system, the notion of IPF (Interval Probability Function) is described in order to temporize and to probabilize every event of the tree so that the tree progresses with the time. In the sequel, according to the passed time and the results of diagnosis procedures, the probabilities of each event progress. Finally, a methodology is proposed to assess online the risks of process using the fault tree and to determine the safety measures which have to be taken according to the risks.

Introduction

Les systèmes de sécurité actuels sont conçus de manière à alerter l'opérateur en cas de défaillance du système voire en cas de danger. Malheureusement, ces informations peuvent arriver trop tard et l'opérateur risque alors de n'avoir ni le temps, ni les moyens de faire face à des situations parfois dangereuses.
Pour pouvoir pronostiquer les défaillances et les défauts éventuellement futurs, deux types de processus sont nécessaires :

- le diagnostic des défauts actuels du système en temps réel, rendus possible par l'approche diagnostic FDI [1] [2] (Fault Detection and Isolation) ou l'approche logique, dite DX [3] [4]
- l'analyse des conséquences de ces défauts à partir d'une analyse préalable des risques du système, suivant différentes méthodes possibles, comme par exemple la méthode AMDEC [5] ou la méthode de l'arbre des défaillances [6]

Dans ce papier, nous proposons une méthode permettant de prédire les défaillances et les défauts du système en se basant sur un arbre de défaillance dynamique. Les éléments de cet arbre proviennent d'une analyse AMDEC, basé sur une modélisation et une formalisation fonctionnelle adaptée (partie 1). Les éléments de cet arbre sont ensuite temporisés et probabilisés de manière à ce qu'à chaque instant, il soit possible de déterminer les probabilité de chaque événement (partie 2),
Ainsi, à partir d'une analyse diagnostique logique adaptée [7], les informations issues du diagnostic sont utilisées pour analyser cet arbre de défaillance et pour déterminer quelles sont les conséquences les plus probables des éléments en défauts (révélés par le diagnostic) et dans quelle période ces conséquences sont susceptibles d'apparaître (partie 3). Ensuite, dans une autre mesure, toujours en analysant l'arbre de défaillance, il est possible de déterminer les points névralgiques du système à surveiller pour que ces conséquences ne se produisent pas (partie 3). Ce papier se terminera par une étude de cas (partie 4).

Modélisation fonctionnelle

On considère un arbre de défaillance obtenu par une analyse de des risques de type AMDEC, formalisé de la façon suivante :

Causes d'un mode défaillance

On considère que les causes d'un mode de défaillance sont d'ordre :

- **structurelles**, c'est-à-dire un (des) mode(s) de défaut(s) de ressources supports à f
- **fonctionnelles,** c'est-à-dire un (des) mode(s) de défaillance(s) de fonctions supports à f

Le point à noter est que le mode de défaut d'une ressource ou le mode de défaillance d'une fonction support n'entraine pas forcément un mode de défaillance. En effet un mode de défaillance peut être causé par une combinaison de modes de défauts et de modes de défaillances. Par exemple, considérons le mode de défaillance « Etre éclaté » d'une roue de voiture : le fait que la roue soit dans un mode de défaillance « Sous gonflé » ne suffit pas à engendrer la crevaison, il faut également que la voiture soit dans le mode de défaillance « Rouler à grande vitesse ».

Effets d'un mode de défaillance

On considère qu'un mode de défaillance d'une fonction f peut avoir pour effet:

- un mode de défaillance des services dont f sert de support (**effet structurel**)
- un mode de défaut de ressources supports à des services (**effet fonctionnel**)

Tout comme la notion de cause, l'implication de mode de défaillance ou de mode de défaut n'est pas systématique, il peut être nécessaire d'avoir une combinaison de modes de défaillance pour que les modes de défaillances ou modes de défaut résultants soient effectifs.

Pour aller plus loin dans l'analyse fonctionnelle, [11] propose une modélisation fonctionnelle très détaillée des liens entre fonctions et constituants.

Structure des résultats de l'AMDEC

Les données issues de l'analyse AMDEC peuvent donc se mettre sous la forme d'arbre de défaillance (Fig 2).
Graphiquement, un mode de défaut sera représenté par un cercle avec son intitulé à l'intérieur et un mode de défaillance sera représenté par un rectangle avec son intitulé à l'intérieur.

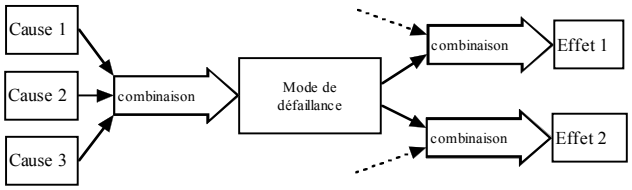

Fig 2 : Résultats de l'AMDEC sous forme d'arbre de défaillance

De manière plus formelle, un arbre de défaillance est en réalité un graphe biparti [10] $G = (S, A)$ avec :

- S, l'ensemble des sommets répartis en deux partitions :
  - P, le sous-ensemble contenant les portes
  - M, le sous-ensemble contenant les modes de défaillance et les modes de défauts
- A, l'ensemble des arêtes orientées

Ainsi, le résultat de l'AMDEC est donc un graphe biparti $G = (S, A)$ (Fig 3) tel que :

$$\begin{cases} P \subset S \\ M = \left(\bigcup_{c \in \Pi} FM_j(c)\right) \cup \left(\bigcup_{f \in \Phi} fm_k(f)\right) \subset S \end{cases}, P \oplus M = S$$

où :

- $FM_j(c)$ est le mode de défaut j du constituant c
- $fm_k(f)$ est le mode de défaillance k de la fonction f

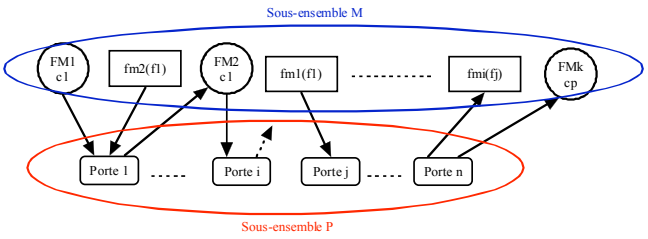

Fig 3 : Graphe biparti

Arbre de défaillance : Structuration, Temporisation et Probabilisation

Dans cette partie, à partir de l'arbre de défaillance établi précédemment, nous allons temporiser et probabiliser chacun des événements (à savoir les modes de défauts et le modes de défaillance) de manière à ce l'arbre de défaillance évolue dans le temps. Ainsi, en fonction du temps et des données issues du diagnostic, les probabilités de chaque événement évoluent.
En fait, le principe est qu'à chaque instant t, on retrouve un arbre de défaillance statique, pourvu de probabilités : l'utilisation des outils habituels d'analyse des arbres de défaillances (par exemple la recherche de coupes) sont donc possibles.

Position par rapport aux chaînes de Markov

Les graphes de Markov permettent de représenter les différents états du système ainsi que les transitions permettant de passer d'un état à un autre. Grâce à ces chaînes, il est possible de déterminer la probabilité que le système se retrouve dans un état particulier à une date t particulière. En considérant uniquement les modes de défaillances et les modes de défaut ainsi que leur probabilités associées, un réseau markovien peut se substituer à un arbre de défaillance. Dans ce cas, il est donc possible, connaissant le mode initial, de déterminer la probabilité d'autres modes (de défaillance et de défaut) conséquents à différents instants. Cependant, en utilisant les chaînes de Markov, les notions apportées par les portes logiques sont perdues, à savoir la conjonction, la disjonction, la négation, le retard d'événement, etc.

Notre but ici est non pas de déterminer dans quel mode se trouve le système à une date t, mais de pouvoir évaluer, à chaque instant, les probabilités de chaque événement (sans pour autant qu'il ait un événement initial). Par ailleurs, nous souhaitons ici représenter la probabilité de chaque événement de l'arbre par une fonction de probabilité variant dans le temps et non comme une probabilité constante, comme c'est le cas pour les transitions dans les chaînes de Markov.
En résumé, la structure de l'arbre de défaillance que nous proposons est comparable à celle d'un automate à état (composés de mode de défaillances, de mode de défauts et de diverses portes logiques) dont les données (ici les probabilités) changent à chaque instant t.

Notion de Fonction de Probabilité par Episode (FPE)

Nous proposons ici d'ajouter de l'information sur les arêtes du graphe biparti en définissant la ***probabilité*** d'occurrence des modes par ***périodes (intervalles de temps)***.

On appelle **Fonction de Probabilité par Episode** du mode *m*, et on note $FPE(m)$, la fonction constante par morceaux qui définit la probabilité d'occurrence du mode *m* en fonction d'intervalles de temps :

$$FPE(m) = ((p_1, \Delta t_1), \ldots, (p_n, \Delta t_n))$$

tels que $\forall t \in \Delta t_i, P(m) = p_i$, avec $\Delta t_i = \left[t_i^-, t_i^+\right[$

Graphiquement, une FPE correspond à la figure ci-dessous (Fig 4)

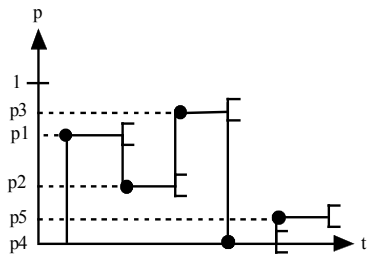

Fig 4 : Représentation graphique d'une FPE

On notera par ailleurs $T(m) = \{t_1, t_2, \ldots, t_i, t_j, \ldots\}$ l'ensemble ordonné des dates des périodes de $FPE(m)$, tel que $\forall i < j, t_i \leq t_j$

Remarque :
$t_{app} = \min_{\Delta t_i}(t_i^-) / p_i \neq 0$ est appelé *« date d'apparition »*

On distingue deux types de FPE :

- Les FPE dont la probabilité du mode m est à 1 après écoulement de la dernière période (Fig 5)

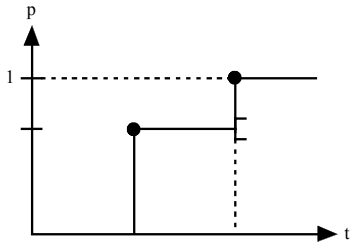

Fig 5 : date de danger

$t_{danger} = \max_{\Delta t_i}\left(t_i^-\right)$ est alors appelé *« date de danger »*

- Les FPE dont la probabilité du mode m est à 0 après écoulement de la dernière période (Fig 6).

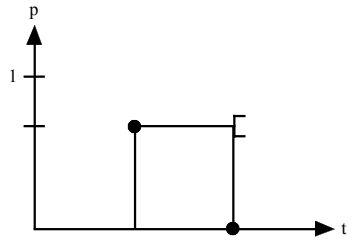

Fig 6 : date de sécurité

$t_{safety} = \max_{\Delta t_i}\left(t_i^-\right)$ est alors appelé *« date de sécurité »*

Portes utilisées

Dans cette section, nous allons détailler les différentes portes qui vont être utilisées dans l'arbre de défaillance et les lois qui en découlent sur les FPE.
Dans l'arbre de défaillance, nous allons utiliser les portes suivantes :

- les portes OU
- les portes ET
- les portes NON
- les portes RETARD
- les portes à MEMOIRE TYPE 0
- les portes à MEMOIRE TYPE 1

La porte OU

Le sens de la porte OU est semblable à celui connu habituellement, à savoir celui de disjonction d'événements. On considère *n* modes (de défaut ou de défaillance) en amont d'une porte « OU » et leur FPE associées (Fig 7).

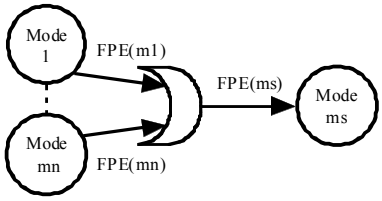

Fig 7 : Porte OU

La FPE du mode en aval (m_s) de la porte est définie par :

- Son ensemble ordonné des dates donné par :
  $T(m_s) = \bigcup_{k\in[1,n]} T(m_k)$
  Les périodes sont donc au nombre de $\mathrm{E}(card(T(m_s))) + 1$ et sont définies par : $\begin{cases} t_1^- = \min(T(m_s)) \\ t_2^- = t_1^+ = \min(T(m_s)) - \{t_1^-\} \\ \vdots \end{cases}$
- Ses probabilités d'occurrences sont définies par :
  $\forall t \in \Delta t_i, P(m_s) = P\left(\bigcup_j m_j\right)$

Graphiquement, ces résultats sont résumés par la figure 8 où deux modes seulement sont considérés en amont de la porte.

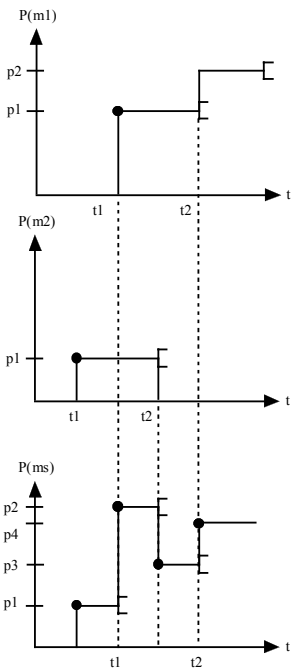

Fig 8 : FPE en sortie d'un OU

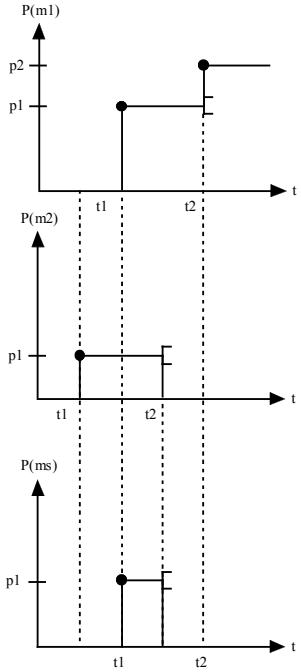

Fig 10 : FPE en sortie d'un ET

La porte ET

Le sens de la porte ET est semblable à celui connu habituellement, à savoir celui de conjonction d'événements. On considère *n* modes (de défaut ou de défaillance) en amont d'une porte « ET » et leur FPE associées (fig 9).

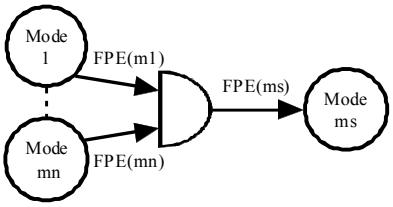

Fig 9 : Porte ET

La FPE du mode en aval (m_s) de la porte est définie par :

- Son ensemble ordonné des dates donné par :
  $T(m_s) = \bigcup_{k\in[1,n]} T(m_k)$

Les périodes sont donc au nombre de $\mathrm{E}(card(T(m_s)))+1$ et sont définies par : $\begin{cases} t_1^- = \min(T(m_s)) \\ t_2^- = t_1^+ = \min(T(m_s)) - \{t_1^-\} \\ \vdots \end{cases}$

- Ses probabilités d'occurrences sont définies par : $\forall t \in \Delta t_i, P(m_s) = P\left(\bigcap_j m_j\right)$

Graphiquement, ces résultats sont résumés par la figure 10 où deux modes seulement sont considérés en amont de la porte.

Porte NON

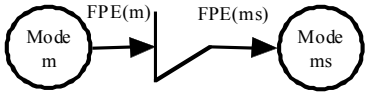

Fig 11 : Porte NON

Le sens de la porte NON (Fig 11) est semblable à celui connu habituellement, à savoir celui de négation d'événements. En sortie d'une porte « NON », la FPE du mode m_s est définie par :

- $T(m_s) = T(m)$: les périodes restent donc inchangées
- $\forall t \in \Delta t_i, P(m_s) = 1 - P(m)$

Porte RETARD

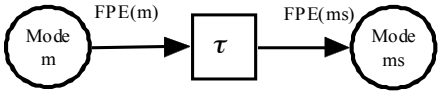

Fig 12 : Porte RETARD

Comme son nom l'indique, une porte retard ajoute un retard τ (Fig 12). Cette notion a déjà été introduite dans [8]. En sortie d'une porte « RETARD », la FPE d'un mode m_s en sortie d'une porte retard est définie par :

- $T(m_s) = \{t_i + \tau, \forall t_i \in T(m)\}$: les périodes sont donc décalées de τ
- $\forall t \in \Delta t_i, P(m_s) = P(m)$: les probabilités restent inchangées

Porte à MEMOIRE TYPE 0

Etant donné que la notion de temps est disponible, il est intéressant de définir une porte prenant en compte les probabilités passées des événements en amont des portes, car les relations de cause à effet ne sont pas forcément immédiates. C'est pourquoi, nous introduisons ici la notion d'événement dans la durée (effet mémoire de la porte) et non pas uniquement dans l'instantanée.

Nous définissons ici la notion de porte à MEMOIRE TYPE 0 (Fig 13). Cette porte joue le rôle d'un effet mémoire dans le temps. En fonction de l'évolution de la probabilité dans le temps du mode en amont de la porte, cette porte conditionne l'apparition du mode en aval de la porte : elle définit la FPE du mode aval.
On considère un mode (de défaut ou de défaillance) en amont d'une porte à MEMOIRE TYPE 0 et sa FPE associée.

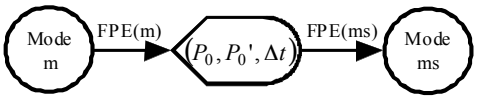

Fig 13 : Porte à MEMOIRE TYPE 0

La porte à MEMOIRE TYPE 0 possède trois paramètres :

- une probabilité P_0
- une probabilité P_0'
- un intervalle de temps $\Delta t = [t_i, t_f]$

La FPE du mode en aval (m_s) est définie par :

$$FPE(m_s) = \left(\begin{pmatrix} P(m_s) = P_0' \; si \; P(m) \geq P_0 \; pendant \; \Delta t \\ P(m_s) = 0 \; sinon \end{pmatrix}, [t_f, +\infty[\right)$$

Autrement dit, si la probabilité du mode m était supérieur ou égal à P_0 durant l'intervalle de temps $\Delta t = [t_i, t_f]$, alors, pour tout t supérieur ou égal à t_f, la probabilité de m_s vaut P_0' (nulle sinon).
Graphiquement, les lois de la porte sont représentées en figure 14.

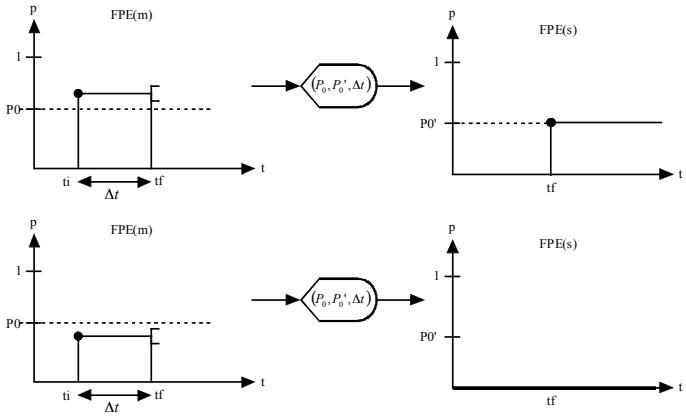

Fig 14 : Loi de la porte à MEMOIRE TYPE 0

Porte à MEMOIRE TYPE 1

Cette porte est une extension de la porte MEMOIRE TYPE 0 définie précédemment : elle joue également le rôle d'un effet mémoire dans le temps.

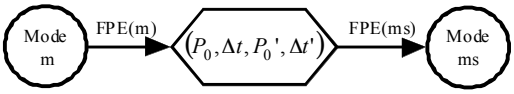

Fig 15 : Porte à MEMOIRE TYPE 1

On considère un mode (de défaut ou de défaillance) en amont d'une porte MEMOIRE TYPE 1 (Fig 15) et sa FPE associée.

Une porte à MEMOIRE TYPE 1 est caractérisée par 4 paramètres :

- Une probabilité P_0 et une période $\Delta t = [t_i, t_f]$ associée
- Une probabilité P_0' et une période $\Delta t' = [t_i', t_f']$ associée avec $t_i' \geq t_f$

La FPE du mode en aval (m_s) est définie par :

$$FPE(m_s) = \left(\begin{pmatrix} P(m_s) = P_0' \; si \; P(m) \geq P_0 \; pendant \; \Delta t \\ P(m_s) = 0 \; sinon \end{pmatrix}, \Delta t' \right)$$

Autrement dit, si la probabilité du mode m était supérieur ou égal à P_0 durant l'intervalle de temps $\Delta t = \lfloor t_i, t_f \_$, alors, durant la période $\Delta t' = \lfloor t_i', t_f' \_$ telle que $t_i' \geq t_f$, la probabilité de m_s vaut P_0' (nulle sinon).
Graphiquement, les lois de la porte sont représentées en figure 16.

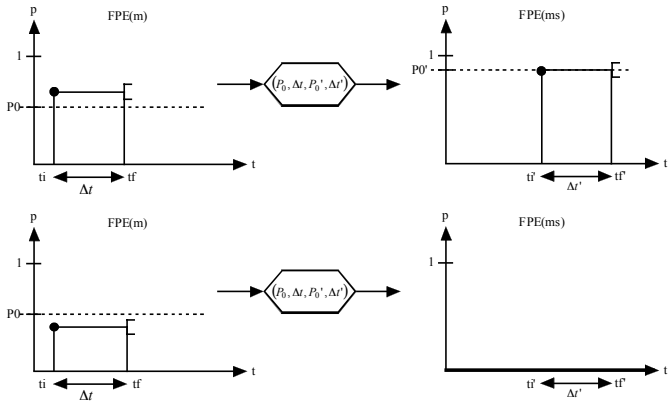

Fig 16 : Loi de la porte à MEMOIRE TYPE 1

Grâce à toutes ces portes, il est donc possible de déterminer à chaque instant de vie du procédé les probabilités d'occurrence de chacun des modes.

Pronostic de défaillances/défauts et mise en sûreté du système

Pronostic

L'analyse diagnostique du système donne en temps réel les modes de défauts possibles des différents constituants du système [7]. Les modes de défauts détectés voient leurs probabilités d'occurrence passer à 1 à une certaine date t. Leurs FPE se voient donc modifiées également.
En intégrant ces données dans l'arbre des défaillances, d'autres FPE risquent alors d'être modifiées, et peut-être que certaines probabilités vont grandement augmenter voire passer à 1.
Ainsi, en analysant l'arbre de défaillance, on est en mesure de déterminer quels événements critiques sont susceptibles de se produite et à quelle date, grâce aux FPE [12].

Ainsi, grâce à la modélisation de l'arbre de défaillance à l'aide des portes précédemment détaillées et grâce aux FPE, il est possible de suivre en temps réel l'évolution de la criticité des événements (en utilisant par exemple la formule $c = p \times g$, la criticité étant le produite de la probabilité par la gravité) tout en intégrant les résultats de l'analyse diagnostique.

Mise en sûreté

Une fois les événements critiques décelés, il est alors possible de déterminer les points du système à surveiller pour limiter les dangers, voire les éliminer [12].
Pour cela, un nouvel arbre de défaillance est généré : il s'agit d'une copie de l'arbre initial privé des branches qui ont conduit à l'événement critique. Ce nouvel arbre de défaillance est alors analysé en partant de l'événement critique pour remonter vers les événements à surveiller.

Etude de cas

Considérons un rétroprojecteur représenté par son circuit électrique simplifié (Fig 17).

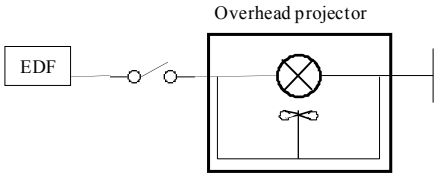

Fig 17 : Rétroprojecteur

L'analyse AMDEC (non détaillée ici) conduit à l'arbre de défaillance représenté en figure 18.

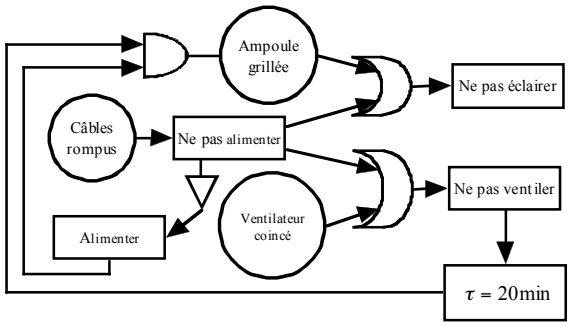

Fig 18 : Arbre de défaillance du rétroprojecteur

On définit les FPE suivantes, représentées respectivement par les figures 19 et 20 :

- $FPE(ventilateurcoincé) = \begin{pmatrix} (0,[0,1000h[) \\ (0.3,[1000h,3000h[) \\ (0.7,[3000h,5000h[) \\ (1,[5000,+\infty[) \end{pmatrix}$

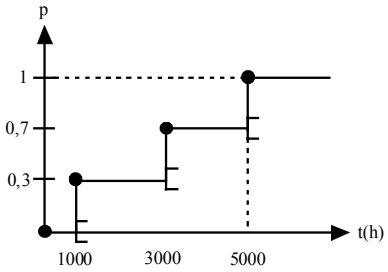

Fig 19 : FPE du ventilateur coincé

- $FPE(cablesrompus) = \begin{pmatrix} (0,[0,10000h[) \\ (0.3,[10000,50000[) \\ (0.4,[50000,+\infty[) \end{pmatrix}$

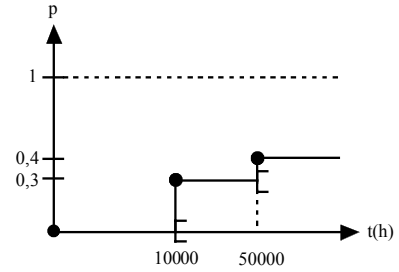

Fig 20 : FPE des câbles rompus

On suppose que l'analyse diagnostique effectuée sur le système après 2000 heures, conduit au résultat suivant : le ***ventilateur*** est a priori défaillant.

Comme le ventilateur est supposé défaillant, on a $P(ventilcoincé)=1$ donc sa FPE associée devient : $FPE(ventilateurcoincé)=(1,[2000h,+\infty[)$.
Ainsi, $FPE(NePasVentiler)=(1,[2000h,+\infty[)$ (effet direct du mode de défaut dans l'arbre de défaillance).
On peut ensuite directement tenir compte du retard de 20 min dans cette même FPE, ce qui donne $FPE(NePasVentiler)=(1,[2000h+20\min,+\infty[)$

Par ailleurs, la FPE du mode de défaillance « Ne pas alimenter » est la même que celui du mode « Câbles rompus ».
Ensuite, la FPE en sortie de la porte NON est définie par (Fig 21) :

$$FPE(alimenter)=\begin{pmatrix}(1,[0,10000h[)\\(0.7,[10000h,50000h[)\\(0.6,[50000h,+\infty[)\end{pmatrix}$$

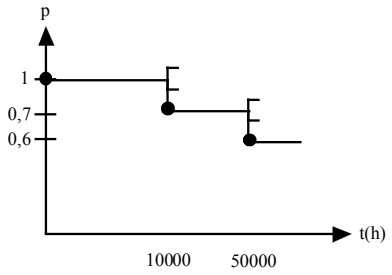

Fig 21 : FPE(Alimenter)

Ainsi, la FPE associée au mode « ampoule grillé », en sortie de la porte ET, est obtenue par calcul (Fig 22) et est définie par :

$$FPE(ampgrillée)=\begin{pmatrix}(1,[2000h+20\min,10000h[)\\(0.7,[10000h,50000h[)\\(0.6,[50000h,+\infty[)\end{pmatrix}$$

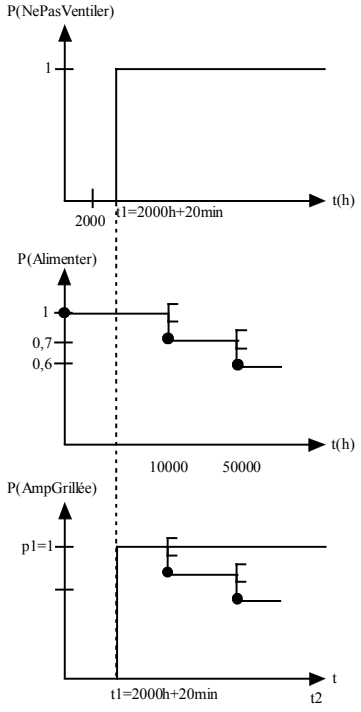

Fig 22 : Calcul de la *FPE(AmpGrillée)*

En choisissant comme nouvelle origine des temps, la date du diagnostic, à savoir $t=2000h$, on obtient :

$$FPE(ampgrillée)=\begin{pmatrix}(1,[20\min,10000h[)\\(0.7,[8000h,48000h[)\\(0.6,[48000h,+\infty[)\end{pmatrix}$$

Donc la lampe est sûre de griller dans une telle configuration car $P(AmpGrillée)=1$ à l'instant présent. Mais dans combien de temps ? Les temporisations nous indiquent que la lampe va griller au minimum dans $t=20\min$.

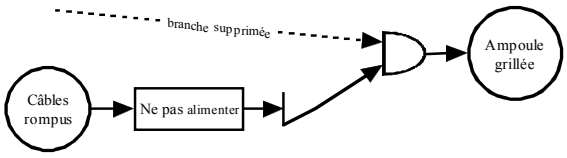

Fig 23 : Arbre de défaillance pour mise en sûreté

Pour éviter que la lampe grille, l'analyse de l'arbre de défaillance privé de la branche à l'origine de l'événement critique (Fig 23), il faut donc faire en sorte de « ne pas alimenter », autrement dit il suffit de débrancher le rétroprojecteur avant 20 min. Dans ce cas, la lampe ne grillera pas.

Conclusion

La notion de Fonction de Probabilité par Episode permet donc d'ajouter de l'information aux arbres de défaillance : il est alors possible de déterminer à chaque instant de vie du système la probabilité de chaque événement. Par ailleurs, suivant les résultats d'éventuelles analyses diagnostiques, cet arbre permet d'identifier des informations précieuses, à savoir les risques les plus critiques, leurs probabilités d'occurrence et leur délai d'apparition. Ensuite, toujours grâce à l'arbre, il est possible de déterminer les mesurés préventives et/ou correctrices à prendre pour limiter, voire éliminer, les risques.
Une perspective intéressante serait d'intégrer dans les FPE des lois de probabilités de manière à pouvoir simuler l'arbre de défaillance, à l'instar de [9].

Références

[1] Frank, P.
"Analytical and qualitative modelbased fault diagnosis - a survey and some new results". *European Journal of Control 2*, 6–28, 1996

[2] Iserman, R.
"Supervision, fault detection and fault diagnosis method - an introduction". *Control Engineering Practice 5*, 639–652, 1997

[3] W. Hamscher, L. Console, J. D. K.
"Readings in Model-Based Diagnosis". Morgan Kaufmann, San Mateo, 1992.

[4] Reiter, R.
"A theory of diagnosis from first principles". *Artificial Intelligence 32*, 57–95, 1987.

[5] MIL-STD1629-A, S.
"Procedures for performing a failure modes and effects analysis - notice 1",1983.

[6] P.C. Teoh, Keith Case.
"Failure Modes And Effects Analysis Through Knowloedge Modelling". *Journal of Materials Processing Technology,* vol 153-154, p.253-260, 2004.

[7] M. Désinde, J.M. Flaus, S. Ploix
“Risk Analysis and Diagnosis Modelling for online control of process”. *Abstract accepté à ESREL 2006*.

[8] A. Villemeur.
“Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels - Fiabilité - Facteurs humains – Informatisation”. Eyrolles Editions, 1988.

[9] Cabarbaye A., Ngom L.
“Simulation des arbres d’événements”. QUALITA 2001.

[10] Droesbeke F., Hallin M., LeFebvre Ci.
“Les Graphes par l’exemple”. Ellipses Paris, 2001.

[11] J.M. Flaus, O. Adrot, M. D.
“A mixed structural/functional graph based model for fault diagnosis and systemic risk analysis”. *Abstract accepté à ESREL 2006*.

[12] M. Desinde, J.M. Flaus, S. P.
“Risks analysis a help to real-time risks control”. ISSA *Nice, 2006*