

Modélisation Temporelle et Stochastique du TRS pour l'Évaluation de l'Effizienz des Systèmes de Production

Timothée Kombé^{1*}, Eric Niel^{1*}, Laurent Pietrac^{1*}, Antoine Rauzy^{2**}

¹Laboratoire Ampère UMR CNRS 5005 INSA de Lyon,

St Exupéry, 25 avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne Cedex, France

²Dassault Systèmes SA, 9, quai Marcel Dassault 92150 Suresnes, France

*prénom.nom@insa-lyon.fr

**Antoine.RAUZY@3ds.com

Résumé

Nous présentons dans cet article une méthode d'évaluation de l'effizienz basée sur la modélisation temporelle et stochastique et de la simulation de la propagation des fautes dans les systèmes industriels. Le TRS (Taux de Rendement Synthétique) est devenu au travers de la norme NF E60-182 l'un des indicateurs majeurs de l'effizienz du pilotage des systèmes de production. Il intègre essentiellement 3 notions (qualité, productivité et disponibilité). Si son expression pour un composant est assez simple, sa modélisation pour l'évaluation du comportement fonctionnel et dysfonctionnel l'est beaucoup moins (prise en compte des facteurs d'échelle, des désynchronisations et du facteur humain). Afin de permettre une prise en compte des contributions individuelles de chaque composante du TRS, nous avons utilisé les automates de mode comme haut langage de description. Les attendus débouchent en amont sur un apport formel pour l'établissement d'une méthodologie d'analyse et de conception, et en aval sur une fourniture d'indicateurs décisionnels. Les résultats sont implantés autour d'un démonstrateur basé sur AltaRica DataFlow langage à la fois formel et graphique et véritable outil de modélisation / simulation.

Mots clés : Effizienz, TRS, AltaRica Data-Flow, Automate de mode, Norme NFE 60-182, Système de production

1. Introduction

Évaluer la performance d'un système est un problème ardu qui nécessite de prendre en compte ses différentes parties constitutives (humaines, organisationnelles, techniques) qui participent de manière différenciée à sa performance globale. Avec la complexité croissante des systèmes industriels et l'importance que l'on attache à leur capacité à fonctionner correctement et d'une manière continue, le besoin de modéliser fidèlement leurs comportements fonctionnel et dysfonctionnel et, ensuite, d'évaluer leur performance globale, se fait de plus en plus pressant. Divers indicateurs et méthodes d'évaluation de performance sont déjà

communément utilisés dans le domaine de la sûreté de fonctionnement des systèmes. Au-delà des concepts classiques de fiabilité [1], de disponibilité instantanée [2], d'outils de simulation tel que les réseaux de Petri [3], d'outil de diagnostic tel que le modèle GRAI (Graphe de Résultats et Activités Interreliés) [4] et [5], des indicateurs plus généraux, car ne relevant pas exclusivement du comportement binaire (marche / panne) du système, sont apparus ces dernières années. Parmi ces indicateurs, le TRS est devenu au travers de la norme NFE 60-182, un indicateur pertinent de l'effizienz des systèmes de production.

Beaucoup de travaux présentent aujourd'hui le TRS comme principal indicateur de performance des systèmes de production, mais aucune littérature ne parle de sa modélisation afin d'évaluer les comportements fonctionnel et dysfonctionnel des systèmes. Dans leurs études, Mahadevan (2004) et Huang et al. (2003) ont présenté le TRS comme un produit de trois facteurs effizienz à savoir : la Qualité effizienz, la Performance effizienz et la Disponibilité effizienz. Leur raisonnement n'est basé que sur l'aspect productivité. Le point de vue Sûreté de fonctionnement n'est pas intégré dans cette évaluation. Or, nous savons que pour évaluer l'effizienz d'un système, le seul aspect productivité ne suffit pas, il faut tenir compte de l'état des machines. D'autres travaux, bien que basés sur les temps d'état d'un moyen de production, semblent n'orienter leurs objectifs que sur la démarche de mesure du TRS [8] et [9]. Or la mesure n'est faite qu'après occurrence des événements ayant entraîné la dégradation de l'effizienz, ce qui ne permet pas d'envisager une véritable politique d'optimisation de l'effizienz et de fourniture d'indicateurs décisionnels.

Le but de nos travaux est de modéliser et de simuler la dynamique des trois facteurs du TRS que sont : la Qualité, la Performance et la Disponibilité Opérationnelle afin d'évaluer la variation de l'effizienz des systèmes de production. Pour permettre une prise en compte de toutes les parties constitutives d'un système (humaines, organisationnelles et techniques), nous présentons chaque composant sous deux modèles : un modèle basé sur les modes (marche (*m*), marche dégradée

(m_d) et hors service (hs)) dans lesquels peut se trouver un système en fonction de la valeur du TRS, et donc de son efficacité et un modèle de calcul qui permet de compter le temps de séjour dans chaque mode, et donc de suivre la variation du TRS en fonction des temps d'arrêts (T_A) (connus d'une part pour les arrêts fonctionnels, et aléatoires d'autre part pour les pannes) et du temps requis (TR). Ces modèles automates ont ensuite été traduits en AltaRica Data-Flow, langage à la fois formel (basé sur la notion de garde des systèmes de transitions (automate de mode)), de description (conçu pour écrire et analyser les modèles) et hiérarchique. L'utilisation de ce langage nous a permis de nous affranchir du problème d'explosion combinatoire qu'aurait présenté l'usage d'un outil classique comme les Réseaux de Petri. En effet dans le cas d'un système à trois états (m, m_d, hs), avec n composants on obtient 3^n états et une explosion transitoire. De plus, AltaRica Data-Flow permet de manipuler plusieurs modèles automates permettant d'établir des liens de synchronisation entre les sous systèmes évoluant simultanément, et des liens de flux entre ceux évoluant en série ou parallèlement. Cette manipulation de plusieurs modèles d'automates sera importante dans le résultat recherché (passage du local au global, politique des interventions...). L'association des lois de probabilité aux différents événements associés aux transitions permettant le passage d'un mode de fonctionnement du système à l'autre est également un des apports indéniables du langage AltaRica Data-Flow. Il permet de gérer avec facilité les processus stochastiques évoluant dans le système sous l'influence des facteurs dégradants de son efficacité.

2. Modélisation comportementale temporelle d'un composant: approche TRS temporel

Le TRS est défini comme un produit de trois facteurs que sont : la qualité, la productivité et la disponibilité opérationnelle.

$$TRS = T_q \times T_p \times D_o \quad (1)$$

Où T_q – Taux de qualité

T_p – Taux de performance

D_o – Disponibilité Opérationnelle

Globalement, en tenant compte des temps d'arrêts, on peut encore définir le TRS de la manière suivante :

$$TRS = \frac{TU}{TU + t_{nq}} \times \frac{TN}{TN + t_{ma}} \times \frac{TF}{TF + t_{AP}} \quad (2)$$

Où TU – Temps Utile

TN – Temps Net

TF – Temps de fonctionnement

t_{nq} – Temps perdu pour non qualité

t_{Eca} – Temps perdu pour écart de cadence

t_{AP} – Temps d'arrêts de production

Les formules (1) et (2) permettent de présenter le TRS sous deux aspects :

- *l'aspect stochastique* (formule (1)) qui le présente comme une composition de trois facteurs caractérisés par des taux de variation (dégradation et amélioration) permettant de définir la dynamique de l'efficacité d'un système (composant).

- *l'aspect temporel* qui présente le TRS comme un rapport du temps utile sur le temps requis (formule (3)). Les comportements fonctionnel et dysfonctionnel du système caractérisés par la variation du TRS comme indicateur de son efficacité sont fonction de ces temps d'état.

Dans l'approche temporelle de l'efficacité d'un système, le temps sera utilisé comme principale variable pour l'évaluation du TRS.

$$TRS = \frac{TU}{TR} = \frac{TR - T_A}{TR} \quad (3)$$

Avec :

TU – Temps Utile ;

TR – Temps Requis ;

T_A – le temps d'arrêts qui regroupe : les arrêts induits (manque de pièces, saturation de pièces, manque de personnel, défaut d'énergie et manque de ressource extérieure), les arrêts propres qui eux-mêmes comprennent : les arrêts d'exploitation, les pannes et les arrêts fonctionnels (changement de fabrication, contrôle, changement d'outils programmé, réglage fréquentiel et entretien fréquentiel).

D'après la World Class Performance, tout système est dit efficace lorsqu'il est caractérisé par un TRS $\geq 0,85$. Ainsi, les exigences pour ses trois composantes sont : $T_q \geq 0,99$, $T_p \geq 0,95$ et $D_o \geq 0,90$ [10], [11] et [12]. Pour modéliser l'efficacité d'un système, nous allons considérer ces valeurs. Les différents seuils de fonctionnement dans chacun des trois modes (m, m_d, hs) sont donnés au tableau 1.

Tableau 1: Différentes valeurs des composantes du TRS définies selon la World Class Performance

Comp. \ TRS	≥ 0.85 m	$0.85 < TRS < 0.25$ m_d	≤ 0.25 hs
T_q	≥ 0.99	$0.99 < T_q < 0.29$	≤ 0.29
T_p	≥ 0.95	$0.95 < T_p < 0.28$	≤ 0.28
D_o	≥ 0.90	$0.90 < D_o < 0.26$	≤ 0.26

La détermination des seuils de fonctionnement se fait en résolvant l'équation de la formule (3).

$$TRS = \frac{TR - T_A}{TR} \Rightarrow 0.85 = \frac{TR - T_A}{TR} \Rightarrow T_A = \frac{1}{7}TR \quad (4)$$

D'après la formule (4), tout système est dit efficace lorsque la durée de ses temps d'arrêts (y compris les pannes, les arrêts fonctionnels, le temps perdu pour non qualité ainsi que le temps perdu pour ralentissement) ne dépasse pas $0,143TR$ (le

septième du temps requis). Dès que cette valeur est atteinte, le système passe du mode m au mode m_d . Mais toute forte variation de l'une des trois composantes du TRS peut également provoquer ce changement de mode. Les différents seuils des temps d'arrêts provoquant le passage d'un mode de fonctionnement à l'autre sont donnés au tableau 2.

Tableau 2: Valeurs du TRS en fonction du temps requis (TR)

T_A	0	$\frac{1}{10}TR$	$\frac{1}{7}TR$	$\frac{1}{6}TR$	$\frac{1}{2}TR$	$\frac{3}{4}TR$	TR
TRS	1	0.90	0.85	0.83	0.50	0.25	0

On obtient finalement trois modes de fonctionnement, caractéristiques de l'efficacité du système:

- *Le mode marche nominale (m):*

$$T_A \leq \frac{1}{7}TR \Rightarrow TRS \geq 85 \%$$

- *Le mode marche dégradée (m_d):*

$$T_A > \frac{1}{7}TR \Rightarrow TRS < 85 \%$$

- *Le mode hors service (hs):*

$$T_A \geq \frac{3}{4}TR \Rightarrow TRS \leq 25 \%$$

L'automate de mode correspondant à cette distribution temporelle des temps d'état d'un moyen de production et représentant la vue efficace du système est donné à la figure 1.

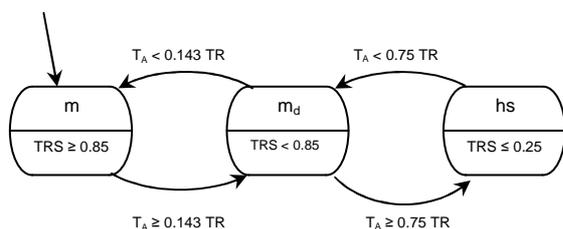


Figure 1: Automate de mode d'un système à 3 états représentant sa vue efficace

3. Le langage de modélisation AltaRica Data-Flow

Pour simuler l'efficacité d'un système à partir du TRS, nous avons opté pour un Langage de Description d'Architecture (ADL) : le langage AltaRica Data-Flow. Les raisons de notre choix sont multiples :

1. AltaRica Data-Flow est un langage à la fois formel et graphique.

2. Le langage AltaRica Data-Flow a été conçu pour modéliser la propagation de pannes au sein d'un système. Il permet donc de modéliser au premier chef des états d'erreur, les événements qui les ont causés, les modes de défaillances induits par ces états. Il se distingue des autres langages dans les moyens fournis pour structurer ces informations et dans les primitives offertes pour décrire la dynamique du système.

3. Le langage AltaRica Data-Flow est orienté vers la création de modèles qualitatifs pouvant être enrichis par des informations de nature probabiliste. L'exploitation des produits d'automates laisse penser que la composition de systèmes élémentaires par des opérations d'association permet de passer plus formellement du local au global. De plus, la description de ces interactions gagne également en clarté en profitant des notions de liens de flux et de synchronisation entre ces composants.

4. Modélisation de l'efficacité en fonction de la Disponibilité Opérationnelle

Pour modéliser un système de production en ne tenant compte que de sa Disponibilité Opérationnelle, on peut le considérer dans l'un des états suivants : marche, arrêt, panne, marche dégradée et hors service. Le passage au mode marche dégradée se produit lorsque le système a longtemps séjourné soit dans l'état panne, soit dans l'état arrêt. Cette commutation s'effectue lorsque la garde $T_A \geq 0,143TR$ de la figure 1 est tirée. Le passage du mode marche dégradée au mode hors service s'effectue lorsque la garde $T_A \geq 0,75TR$ est tirée. Deux types de transitions sont utilisés pour modéliser l'efficacité d'un système en ne tenant compte que de cette composante du TRS : les transitions probabilistes dont les événements sont caractérisés par des valeurs constantes du taux de défaillance λ , ainsi que du taux de réparation μ . Ceci concerne les événements *panne*, *réparation* et *réparation Optimale*. Ces événements sont caractérisés par des lois exponentielles. D'autres transitions sont dites déterministes. Il s'agit des transitions dont les gardes sont des valeurs constantes du temps. On citera par exemple les événements *arrêtDétecté*, *remiseEnMarche*, *arrêtProlongé*, *panneProlongée*, etc. Ces événements sont caractérisés par des fonctions de Dirac.

Afin de calculer la disponibilité Opérationnelle du système telle que illustré dans le modèle automate de la figure 2, nous avons pris pour valeurs des temps d'état, des données d'un exemple traité dans Vorne (2008). Ces valeurs sont représentées dans le tableau 3. Les différentes lois, les gardes et les paramètres associés aux différentes transitions de l'automate de mode de la figure 2 et permettant de faire la transcription en AltaRica Data-Flow afin de simuler la dynamique de l'efficacité de ce système sont donnés dans le tableau 4. Un exemple de modèle AltaRica Data-Flow traduisant un nœud feuille appelé « Unit 1 » à trois états marche, panne et marche dégradée est donné à la figure 3. Le résultat de la simulation stochastique du modèle AltaRica Data-Flow de l'automate de la figure 2 donne une Disponibilité Opérationnelle $D_O = 0.999262$.

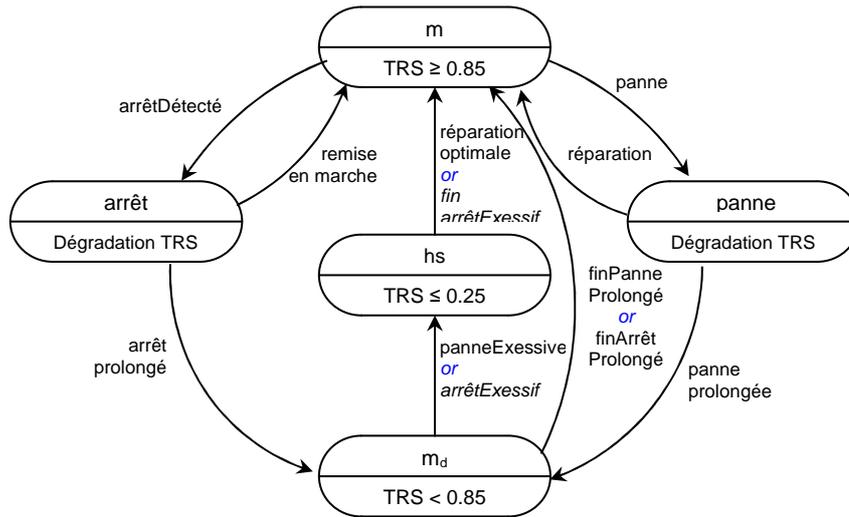


Figure 2 : Modèle automate de l'efficacité d'un système en fonction de sa Disponibilité Opérationnelle

Ce résultat est tout à fait satisfaisant car il satisfait aux exigences de la World Class Performance (tableau 1).

```

node Unit1
state s                :{working, failed, Wd};

dateOfFail            : float;
timeOfFail            : float;
timeOfProlongedFail  : float;
dateOfProlongedFail  : float;
timeOfUnitFail       : float;
PPT                  : int;
event fail, repair, prolongedFail, endOfProlongedFail, end;
init s                := working;
dateOfFail            := 0;
timeOfFail            := 0;
timeOfProlongedFail  := 0;
dateOfProlongedFail  := 0;
timeOfUnitFail       := 0;
PPT                  := 420;
trans
(s = working)        | fail                -> s := failed,
dateOfFail           := %date();
(s = failed)         | repair              -> s := working,
timeOfFail           := timeOfFail + (%date() -
dateOfFail);
(s = failed)         | prolongedFail       -> s := Wd,
dateOfProlongedFail := %date();
(s = Wd)             | endOfProlongedFail -> s := working,
timeOfProlongedFail := timeOfProlongedFail + (%date() -
dateOfProlongedFail),
timeOfUnitFail       := timeOfFail + timeOfProlongedFail;
true
extern
law <event fail>      = exponential(lambda);
law <event repair>    = exponential(mu);
law <event prolongedFail> = Dirac(sigma);
law <event endOfProlongedFail> = Dirac(kappa);
law <event end>       = Dirac(tau);
parameter lambda     = 0.0001;
parameter mu         = 0.01;
parameter sigma      = <term(timeOfUnitFail = 0.1*PPT)>;
parameter kappa      = <term(timeOfUnitFail < 0.1*PPT)>;
parameter tau        = 8760;
edon

```

Figure 3: Modèle AltaRica Data-Flow du noeud à trois états: marche, panne, marche dégradée

Tableau 3: Valeurs des temps d'état d'un moyen de production (tire de Vorne 2008b)

Temps d'état d'un moyen de production	Valeurs
Temps Requis (TR)	420 min
Temps de fonctionnement (TF)	373 min
Temps Net (TN)	321.183 min
Temps Utile (TU)	314 min

Tableau 4: Paramètres et différentes lois associés aux transitions de l'automate de mode de la figure 2

Événement	Param	Fonction	Valeur
panne	lambda	exponential	0,0001
reparation	mu	exponential	0,01
arrêtDétecté	pi	Dirac	6000
remiseEnMarche	phi	Dirac	5
panneProlongée	sigma	Dirac	timeOfUnitFail = 0.1 TR
finPanneProlongée	kappa	Dirac	timeOfUnitFail < 0.1 TR
arrêtProlongé	sigma	Dirac	timeOfUnitStop = 0.74 TR
finArrêtProlongé	kappa	Dirac	timeOfUnitStop < 0.1 TR
arrêtExcessif	xi	Dirac	timeOfUnitStop = 0.74 TR
finArrêtExcessif	tha	Dirac	timeOfUnitStop < 0.74 TR
panneExcessive	nu	Dirac	timeOfUnitStop = 0.74 TR
réparationOptimale	tho	exponential	$2,5 \cdot 10^{-3}$

5. Modélisation de l'efficacité en fonction de la Qualité

La Qualité est un des trois composants du TRS. Il est le plus important car son poids dans la valeur du TRS doit être assez élevé pour un système efficace ($T_q \geq 99\%$). Le modèle automate permettant de caractériser l'efficacité d'un système en fonction de la Qualité est donné à la figure 4. Les principaux paramètres et lois caractéristiques des transitions associées sont donnés au tableau 5.

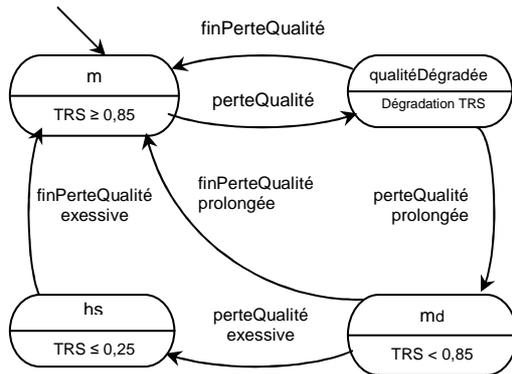


Figure 4: Modèle automate de l'efficacité d'un système en fonction de la Qualité

Tableau 5: Paramètres et différentes lois associés aux transitions de l'automate de mode de la figure 4

Événement	Param	Fonction	Valeur
perteQualité	rho	exponential	$8,91 \cdot 10^{-5}$
finPerteQualité	theta	exponential	$3,4 \cdot 10^{-5}$
perteQProlongée	alpha	Dirac	timeOfUnitNon Quality = 0.01 TN
finPerteQProlongée	zeta	Dirac	timeOfUnitNon Quality < 0.01 TN
perteQExcessive	khi	Dirac	timeOfUnitNon Quality = 0.71 TN
finPerteQExcessive	psi	Dirac	timeOfUnitNon e Quality < 0.71 TN

6. Modélisation de l'efficacité en fonction de la Performance

D'après la World Class Performance, tout système est dit efficace lorsqu'il est caractérisé par un taux de performance $T_p \geq 0,95$. Le modèle automate de l'efficacité d'un système en fonction de la Performance est similaire à celui de la figure 4. Les principaux paramètres et lois caractéristiques des transitions associées à ce modèle sont donnés au tableau 6.

Tableau 6: Paramètres et différentes lois associés aux transitions de l'automate de mode de l'efficacité en fonction de la Performance

Événement	Param	Fonction	Valeur
pertePerformance	beta	exponential	$3,11 \cdot 10^{-3}$
finPertePerformanc	delta	exponential	$3,5 \cdot 10^{-3}$
pertePProlongée	gamma	Dirac	timeOfUnitNon Performance = 0.05 TF
finPertePProlongée	epsilon	Dirac	timeOfUnitNon Performance < 0.05 TF
pertePEcessive	kha	Dirac	timeOfUnitNon e Performance = 0.72 TF
finPertePEcessive	kho	Dirac	timeOfUnitNon e Performance < 0.72 TF

7. Modélisation stochastique et temporelle de l'efficacité d'un système

Le modèle automate de l'efficacité d'un système en fonction de la valeur du TRS et de la dynamique de ses 3 composants est donné à la figure 5. Le modèle AltaRica Data-Flow permettant de simuler cette dynamique et de calculer la valeur du TRS est la combinaison des modèles AltaRica Data-Flow des modèles automates des efficacités des figures 2, 4 et de celle correspondant à la modélisation de l'efficacité en fonction de la Performance (non représenté ici). Le résultat de la simulation stochastique du modèle AltaRica Data-Flow de l'automate de la figure 5 donne $TRS = 0.950358$. Ce résultat est assez satisfaisant et répond à nos attentes, car, non seulement il satisfait aux exigences de la World Class Performance pour tout système efficace, mais encore il correspond au résultat qu'on aurait pu obtenir en calculant le TRS directement par la formule 1, c'est-à-dire en faisant le produit du taux de qualité par le taux de performance et par la disponibilité opérationnelle.

8. Conclusion

Nous avons montré dans cet article que le TRS est indicateur intégrateur qui donne une visibilité directe et optimale sur le comportement des performances des systèmes de production. Si son évaluation peut être facile pour un composant (système) simple, sa modélisation pour l'évaluation de l'efficacité l'est beaucoup moins (prise en compte des facteurs d'échelle temporelle, des désynchronisations, ...). Afin de contourner la difficulté à résoudre de pareils systèmes avec des outils classiques tels les graphes de Markov, les Réseaux de Petri ou encore les Arbres de Défaillance, nous avons opté pour l'usage du langage AltaRica Data-Flow dont la syntaxe est

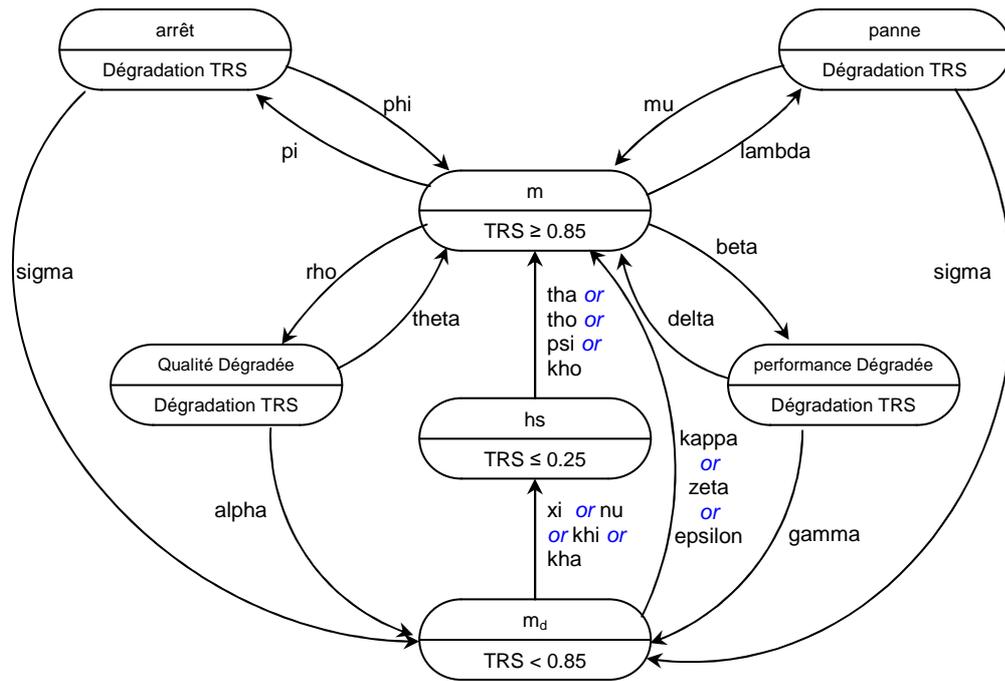


Figure 5: Modèle automate de l'efficacité d'un système simple réparable

assez simple et adaptée à ce genre d'applications. Nos travaux se poursuivent dans le sens d'une modélisation stochastique de l'efficacité des systèmes complexes (série, parallèle, assemblage, expansion).

Références

- [1] A., Villemeur, (1988). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*, éditions Eyrolles, Paris 5^e, 795 pages.
- [2] W. I., Soro, M., Nourelfath, D., Aït-Kadi, (2006). *Evaluation des indices de performance d'un système multi-états dégradé*. 6^e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, Rabat - Maroc, du 3 au 5 avril 2006.
- [3] J. L., Chabot, Y., Dutuit, A., Rauzy, (2001). *De l'usage de la simulation Monte-Carlo couplée aux réseaux de Petri en sûreté de fonctionnement*. 3^e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, Troyes-France, du 25 au 27 avril 2001.
- [4] H., Kromm, J. C., Deschamps, G., Doumeingts, (2001). *Modélisation de processus pour une évaluation par niveaux de détail successifs*. 3^e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, Troyes-France, du 25 au 27 avril 2001.
- [5] R., Lupan, A., Kobi, C., Robledo, A., Delamarre, H., Christofol, (2006). *Modélisation et évaluation de la performance en conception*. 6^e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, Rabat - Maroc, du 3 au 5 avril 2006.
- [6] S., Mahadevan, (2004). *Automated Simulation Analysis of Overall Equipment Effectiveness Metric*. Master Of Science Thesis in Industrial Engineering University of Cincinnati, USA.
- [7] S. H., Huang, J. P., Dimukes, J., Shi, Q., Su, M. A., Razzak, R., Bodhale, D. E., Robinson, (2003). *Manufacturing Productivity Improvement Using Effectiveness Metrics and Simulation Analysis*, International Journal of Production Research, Vol. 41, No. 3, pp 513-527.
- [8] A., Ayel, X., Fontenelle, (2003). *Le Taux de Rendement Synthétique: Un indicateur, deux fonctions*, 23^{ème} journée régionale de la productique, Amberieu en Bugey.
- [9] Wonderware, (2007). *DT Analyst 2.0: Visualiser, Analyser, Optimiser* [online]. Factory Systems. Available from: <http://www.factory-syst.fr/upload/docMenuDroit/DT%20Analyst%20V2.pdf> [Accessed 10 June 2008].
- [10] J. W., Clemons, (2000). *Overall Equipment Effectiveness*, EnteGreat, Inc. Birmingham, Alabama, Mountain Conference.
- [11] Q-mation, *OEE-World Class Performance Reporting* [online]. A Division of Q-mation, Inc. Available from: <http://www.qmation.com/webpages/oe.html> [Accessed 6 may 2008].
- [12] R. M., Williamson, (2006). *Using Overall Equipment Effectiveness: the Metric and the Measures* [online]. Strategic Work Systems, Inc. Columbus NC 28722. Available from: www.swwpitcrew.com/articles/OEE_0206.pdf [Accessed 10 may 2008]