

Modelica et simulation de Monte Carlo pour l'étude de fiabilité et disponibilité d'un Data Center

Use of Modelica and Monte Carlo simulation for reliability and availability analysis of a Data Center

CARER Philippe

EDF Lab Paris-Saclay (EDF R&D)
7 Boulevard G. Monge
91120 Palaiseau, France

DE BOSSOREILLE Xavier

APSYS, Airbus Group
78990 Elancourt, France

OTTER Martin

DLR Institute of System
Dynamics and Control,
D-82234 Wessling, Germany

Résumé

Depuis les années 2000 EDF R&D développe des outils basés sur la méthode des graphes de Markov pour estimer la fiabilité et disponibilité des réseaux électriques industriels. Certains de ces systèmes électriques sont très fiables avec de nombreux éléments redondants. Néanmoins l'identification des modes communs constitue une difficulté pour les études de fiabilité de ces systèmes. L'objectif de cet article est de présenter une nouvelle méthode d'analyse de la fiabilité des réseaux électriques industriels basée sur MODELICA et la méthode de simulation de Monte Carlo. Les systèmes étudiés sont les réseaux électriques et de climatisation de Data Center. Ces études ont été réalisées dans le cadre du projet Européen MODRIO.

Summary

Since the 2000's EDF R&D developed new tools to compute reliability and availability of electrical networks with the Markov graph method. Some of the electrical networks have a high level of reliability with standby redundancies. Nevertheless some common modes are difficult to take into account in the reliability analysis. The goal of this paper is to present a new methodology based upon MODELICA and Monte Carlo simulation to analyze the reliability and availability of industrial electrical networks. The example treated in this paper is about the electrical network and the air conditioning system of a Data Center. Advantages and limits of this methodology is discussed. This study was a part of the European project MODRIO.

1. Introduction

EDF R&D réalise de nombreux outils pour la modélisation des systèmes de production de l'énergie électrique [1] ou pour les études des réseaux électriques de transport ou de Distribution. EDF R&D contribue également à des études de fiabilité et de disponibilité de réseaux électriques pour ses clients industriels [2], [3]. Ainsi à partir des années 2000, des outils spécifiques dédiés à ce type d'études ont été élaborés à EDF R&D [4], [5]. Le développement de ces outils pour les réseaux électriques a pu bénéficier des activités d'EDF R&D en sûreté de fonctionnement des systèmes en général depuis les années 1980. Les outils dédiés pour les réseaux électriques reposent sur les graphes de Markov et les BDMP [1], [2] (Boolean logic Driven Markov Process) avec des interfaces graphiques adaptées aux schémas électriques. Des applications concrètes de ces outils pour des clients industriels d'EDF sont par exemple des études de fiabilité pour des alimentations de sites sidérurgiques [3] ou de Data Center [2].

Comme on l'a indiqué précédemment hors du domaine propre à la fiabilité, de nombreux outils sont développés à EDF R&D pour toutes les applications intéressant les domaines techniques d'EDF, comme la thermo-hydraulique pour les échanges thermiques et hydrauliques dans les systèmes de production, la gestion de l'énergie dans les bâtiments, et les réseaux électriques. De nombreux codes de calcul ont en commun des résolutions d'équations différentielles et algébriques associées aux domaines étudiés. Des questions importantes par rapport à ces nombreux outils concernent la maintenance de leurs codes et leur pérennité en termes de support ou de langage, et la capitalisation des savoirs faire associés. Ainsi depuis quelques années EDF R&D s'est engagé dans la migration sous MODELICA de certains outils de modélisation existants et/ou des développements de nouveaux codes. Cette tendance n'est pas systématique, les standard FMU – FMI [6] permettront ensuite de pouvoir faire dialoguer si besoin des codes rédigés ou non en MODELICA. Cela a donc constitué une motivation pour EDF R&D de contribuer à des projets européens pour le développement du langage MODELICA. Ainsi en 2013 a été engagé pour 3 ans le projet Européen MODRIO « Model Driven Physical System Operation » (<https://itea3.org/project/modrio.html> financé par ITEA 2) regroupant une trentaine d'industriels européens, d'universités ou de centres de recherche européens dont EDF R&D. L'un des objectifs de ce projet était d'étudier l'intégration des études de fiabilité et de disponibilité dans des modélisations de systèmes effectuées à partir de MODELICA.

EDF R&D qui pilotait ce projet européen MODRIO a donc proposé deux exemples industriels de cas d'étude de fiabilité qui pouvait bénéficier de la modélisation à la fois du système sous MODELICA et de la prise en compte simultanément des modes de pannes de ces composants. Cette problématique de modélisation hybride (fonctionnement du système décrit par des processus continus, et fiabilité des composants décrit par des processus discrets) n'est pas nouvelle. Elle est difficile à mettre en oeuvre [14], [19] puisqu'il faut réaliser simultanément une modélisation continue du fonctionnement du système (via des équations différentielles ou algébriques représentant le fonctionnement du système) et une modélisation discrète représentant des événements de pannes de composants du système.

En écho au thème présenté dans cet article on peut mentionner d'autres exemples d'approches intégrant de la modélisation hybride pour les études de fiabilité. Par exemple DLR (organisme de recherche allemand en aéronautique) utilise MODELICA et la méthode de coupes minimales pour identifier les pannes sur les réseaux électriques d'avion [18]. On peut citer également une autre approche développée à EDF R&D pour la modélisation hybride avec l'outil « PyCATSHOO [7] » reposant sur le langage Python.

2. Objectif de l'article

L'objectif de l'article est de présenter les résultats des études effectuées dans le cadre du projet Européen MODRIO pour : la modélisation d'un système sous MODELICA, l'intégration dans cette modélisation des modes de défaillance des composants, et la réalisation d'une étude de fiabilité du système par simulation de Monte Carlo. Ces résultats seront illustrés à partir de l'exemple de réseaux électriques et de climatisation d'un Data Center, qui était un des cas d'études proposés par EDF R&D pour le projet MODRIO (<https://itea3.org/project/modrio.html>).

On va tout d'abord présenter dans cet article, quelques éléments sur la structure des Data Center qui ont des réseaux électriques très redondants [8]. On illustrera ensuite les difficultés potentielles pour les études de fiabilité menées à partir des outils classiques de fiabilité utilisant les graphes de Markov et une modélisation discrète des pannes des composants du système. On montrera ensuite les méthodes adoptées pour intégrer dans MODELICA les modes de pannes des composants et la façon de réaliser des simulations de Monte Carlo. Le bilan de cette approche, ses avantages et limites potentielles seront décrits en fin de cet article.

NOTA : Pour faciliter la lecture de cet article, on précise que les niveaux de tension pour les réseaux électriques sont définis comme Haute Tension (HT) ou HTB, pour les tensions électriques supérieures à 50 kV ; et les tensions Moyenne Tension (MT) ou HTA pour les tensions électriques comprises entre 1 kV et 50 kV. Pour les réseaux de distribution français gérés par ERDF, le niveau HTA a été standardisé à 20 kV. Le niveau « basse tension (BT) » correspond aux tensions inférieures à 1 kV.

3. Présentation des Data Center et de la classification TIER [8] pour leur réseau électrique

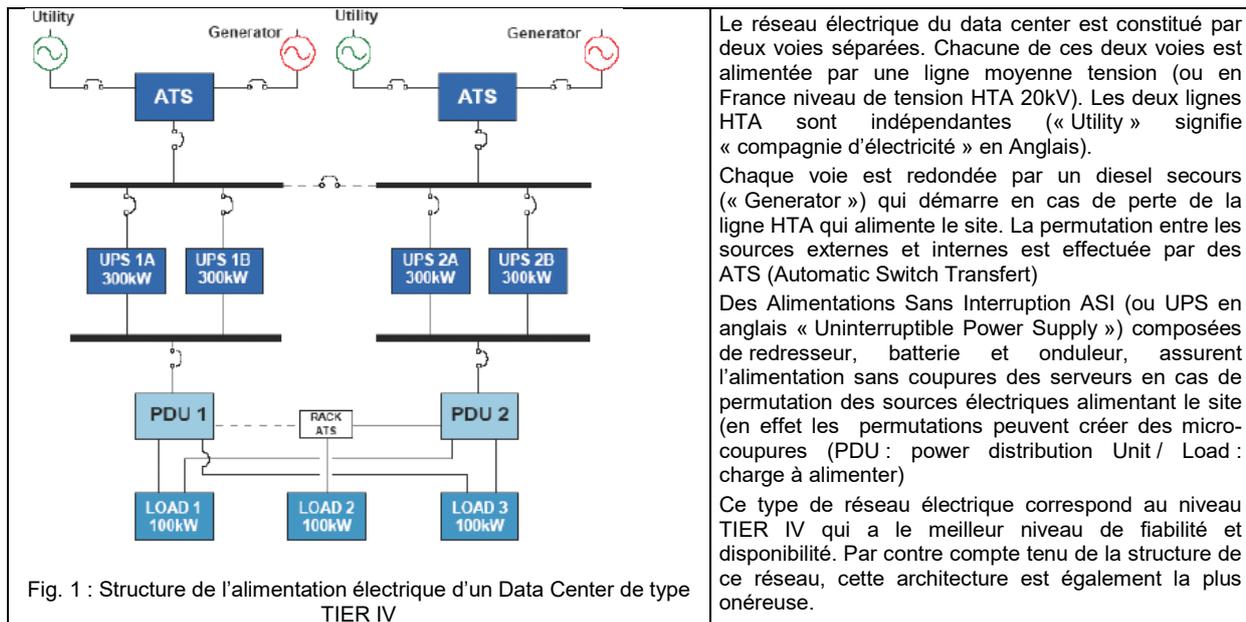
Dans ce document on va utiliser une description simplifiée des data center avec l'architecture suivante :

- Le réseau électrique externe au « data center » correspondant à une ou deux lignes HTA alimentant le site
- Le réseau électrique interne du « data center » avec les différents équipements électriques, disjoncteur, jeu de barre, ASI alimentation sans interruption (ou UPS en anglais : « Uninterruptible Power Supply ») et Diesel de secours
- Le système de climatisation assurant une température régulée dans la salle des serveurs
- Les serveurs proprement dits, situés dans la salle climatisée du « data center »

On ne considérera pas les lignes de télécommunication reliant le Data Center à d'autres centres de données ou aux utilisateurs. Le référentiel « TIER » de l'Uptime Institute [8] définit quatre niveaux pour les Data Center en fonction de leur architecture et de leur niveau de fiabilité et disponibilité. On indique sur le tableau suivant les caractéristiques associées au Data Center suivant leur niveau TIER et à la figure 1 on indique le schéma de l'alimentation électrique d'un Data Center de type TIER IV.

	TIER I	TIER II	TIER III	TIER IV
Nombre de sources d'alimentations électriques externes	1 seule	1 seule	1 active 1 passive	2 active
Niveau de redondance des équipements	N	N+1	N+1	2 (N+1) or S+S
Tension d'alimentation des lignes externes	208 , 480	208, 480	12 kV – 20 kV	12k V – 20 kV
Année de première construction	1965	1970	1985	1995
Temps annuel d'indisponibilité des serveurs due aux pannes des alimentations électriques de climatisation du site	28.8hrs per yr	22.0 hrs	1.6 hrs	0.4 hrs
Disponibilité du site	99.971 %	99.749 %	99.982%	99.995%

Tableau 1 : Caractéristique de l'alimentation électrique d'un data center suivant le niveau « TIER »

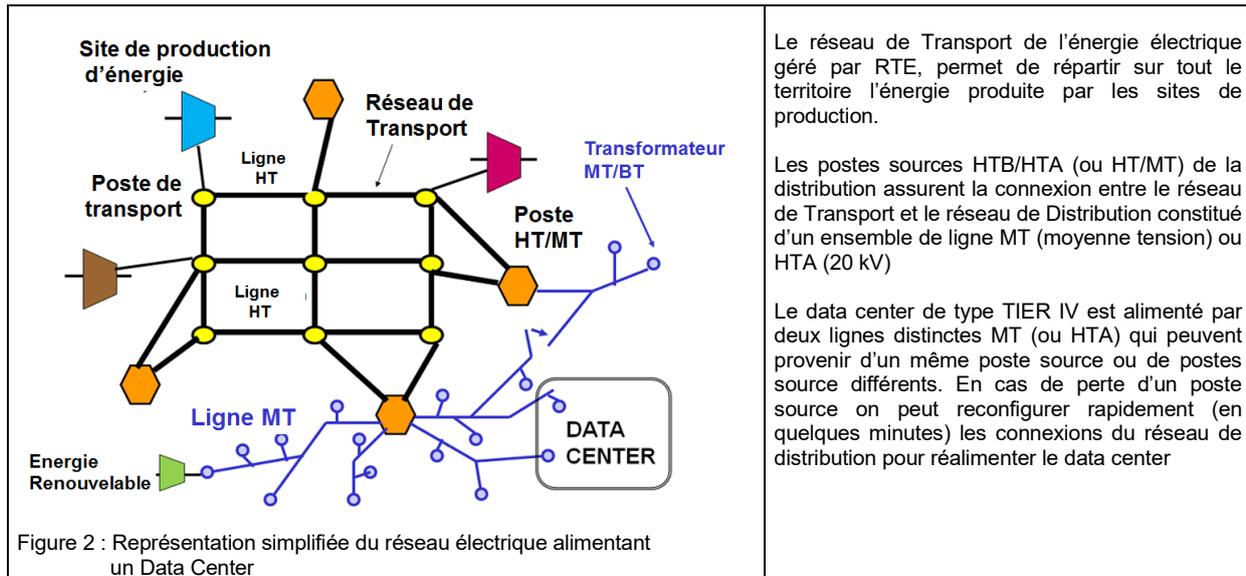


4. Difficultés potentielles pour la modélisation de la fiabilité et disponibilité des systèmes électriques

On liste dans ce paragraphe des exemples qui peuvent motiver l'étude de fiabilité et disponibilité de système avec MODELICA.

1 La prise en compte des modes communs potentiels, éléments sur la structure du réseau électrique externe du data center

Pour des structures très redondantes comme les réseaux électriques externes et internes des « data centers », les études de fiabilité reposent sur des hypothèses d'indépendances de pannes des différents composants du système. En effet en cas de modes communs qui pourraient provoquer simultanément des pannes sur des éléments redondants, la fiabilité et disponibilité du data center seront réduites. Il faut noter qu'intrinsèquement les structures des réseaux électriques de distribution et de transport peuvent comporter des modes communs pour l'alimentation électrique d'un data center. Si les deux lignes MT qui alimentent le data center partent du même poste HT/MT, un incident dans ce poste peut conduire à la perte simultanée de deux lignes alimentant un Data Center. Des « black-out » régionaux du réseau de transport peuvent aussi constituer des modes communs.



2 Exemples de dysfonctionnements observés

Certains dysfonctionnement observés permettent de mieux se rendre compte des risques potentiels de modes communs

➤ Le 13 Août 2015, un data center de Google a perdu des données suite à de la foudre qui provoqué la perte des alimentations électriques du site ("Google loses data as lightning strikes" 13 august 2015)

Le 13 Août 2015, un incident a eu lieu en Belgique sur un data center de Google à cause d'une coupure d'électricité provoquée par de la foudre. Cet incident a conduit à l'endommagement d'un disque permanent et à la perte de données. Google a indiqué que les clients des serveurs doivent effectuer par précaution des sauvegardes locales en parallèle au stockage sur des serveurs de Google.



Figure 3 : Contrainte foudre

From <http://www.bbc.com/news/technology-33989384>

"Google says data has been wiped from discs at one of its data centers in Belgium - after the local power grid was struck by lightning four times.

Some people have permanently lost access to the files on the affected disks as a result.

A number of disks damaged following the lightning strikes did, however, later become accessible".

(NOTA : On peut noter qu'EDF effectue des corrélations entre les coupures électriques et les contraintes dues à la foudre [9])

➤ "Black-out" régional dans l'ouest de la France en Juin 2015

A la fin du mois de juin 2015 durant une période avec des températures élevées en France, plusieurs pannes sont apparues sur des combinés de mesure (ou capteur de courant ou de tension) dans les postes électriques haute tension. Ces pannes ont provoqué, en moins de 8 heures, des coupures d'électricité pour environ un million de clients dans l'ouest de la France.

Environ 40 combinés de mesure sont tombés en panne répartis dans 17 postes électriques dans l'ouest de la France, à cause de température moyenne ambiante élevées, et d'un cycle thermique diurne important le 30 juin 2015. Cet exemple illustre que des conditions météorologiques rares peuvent provoquer des pannes simultanées sur des composants du réseau électriques et aboutir à un risque de mode commun pour l'alimentation externe de sites industriels comme les data center.



Figure 4 : répartition des nombres de clients coupés le 30 Juin 2015
Breizh-info.com // ouest.France.com // www.letelegramme.fr



Figure 5 : Exemple de Combiné de mesure haute tension (ces équipements intègrent un transformateur HTB/BT)

3 Exemple de la modélisation de la fiabilité de la « salle chauffée » [10] avec consignes de température

Un exemple académique simple de la « salle chauffée » (ou « heated room ») [10] illustre une difficulté pour la réalisation d'études de fiabilité de système à partir des outils classiques de calculs de fiabilité système. Cet exemple consiste en une « salle chauffée » qui doit rester dans une plage déterminée de température [Temp_min ; Temp_max]. Cette salle est en échange thermique avec l'extérieur, qui est à une température inférieure à la température moyenne de la salle. Un chauffage assure le maintien de la température dans la « salle chauffée » avec un système de régulation. Le chauffage peut tomber en panne et être réparé. La question, est d'estimer la probabilité que la température de la salle sorte des plages définies. Il faut donc estimer la fiabilité et disponibilité du système de chauffage tout en modélisant l'inertie thermique de la salle que l'on peut représenter de façon simplifiée par une équation différentielle de dissipation de thermique [10]. Ce type de modélisation doit ainsi pouvoir prendre en compte simultanément des processus continus (variation de la température avec prise en compte des inerties thermiques) et discrets (panne aléatoire et réparation du chauffage). Cela n'est pas possible avec les outils de calcul de fiabilité ne prenant en compte que des événements discrets

4 Prise en compte des variations des taux de défaillance des composants en fonction des facteurs d'influence interne ou externe au système étudié

Le recueil de données de fiabilité FIDES [11] pour les composants électroniques illustre l'impact des facteurs d'influence externes sur la fiabilité de ces composants. Plusieurs paramètres physiques comme la température moyenne, le cyclage thermique, l'humidité, la tension électrique appliquée ... peuvent faire varier les taux de défaillance des composants électroniques d'un système au cours de sa mission. La prise en compte de ces variations des taux de défaillance en fonction des paramètres physiques peut dans certains cas, nécessiter la modélisation simultanée des phénomènes physiques (processus continus) et de calculs de fiabilité et disponibilité du système (processus discrets de panne et de réparation des composants).

Ces différents exemples précédents ont permis de montrer les limites dans certains cas de la modélisation de fiabilité et disponibilité des systèmes avec des outils basés uniquement sur une modélisation discrète des pannes et réparations. Cela a donc constitué une motivation pour tester les possibilités d'une nouvelle approche reposant sur MODELICA et la simulation de Monte Carlo pour les études de fiabilité et disponibilité des systèmes.

5. Démarche d'intégration de modes de pannes dans des composants sous MODELICA

On va présenter les bibliothèques de composants utilisés pour la modélisation d'un data center avec MODELICA et la méthode de simulation Monte Carlo pour effectuer les études de fiabilité et disponibilité. On indique que deux principaux outils existent pour utiliser le langage MODELICA à savoir, « Open MODELICA » qui est un logiciel libre, et « Dymola © » de la société Dassault System. Bien que chaque outil soit apte à utiliser des bases de composants décrits en MODELICA il s'est avéré que certaines bibliothèques de composants, notamment pour les automates sont actuellement propres à chaque outil.

1 Présentation des bibliothèques MODELICA de composants utilisés pour le data center

Les composants étudiés pour le data center sont les composants électriques (disjoncteur, transformateur lignes électriques jeux de barre ...) et les composants thermohydrauliques pour assurer la climatisation (conduite de fluide ou tube ; pompe ; vanne ...). Pour les composants thermohydrauliques EDF R&D a développé la base de composants Thermosyspro (<https://build.openmodelica.org/Documentation/ThermoSysPro.html>). Pour les composants électriques on utilisera la base de composants électriques disponibles dans la bibliothèque standard MODELICA.

Méthode utilisée pour intégrer des modes de pannes dans des composants MODELICA

La première étape des études de fiabilité consiste en l'analyse AMDE des composants pour préciser leurs modes de pannes.

Exemples de modes de pannes pour des composants Thermohydrauliques		Exemples de modes de pannes pour des composants électriques concernant le disjoncteur	
Tube	Obstruction Fuite	Disjoncteur (parties mécanique ou chambre de coupure)	Bloqué ouvert → Refus de fermeture Bloqué fermé → Refus d'ouverture Court-circuit
Vanne	Bloquée ouverte → refus de fermeture Bloquée fermée → refus ouverture Fuite	Protection du Dj pour tester la présence de courts circuits	Non-Fonctionnement à la sollicitation Fonctionnement intempestif (envoi d'ordre d'ouverture non justifié au disjoncteur)
Pompe	Non fonctionnement Cavitation	Capteur de courant	Non fonctionnement Envoi de mesure erronée

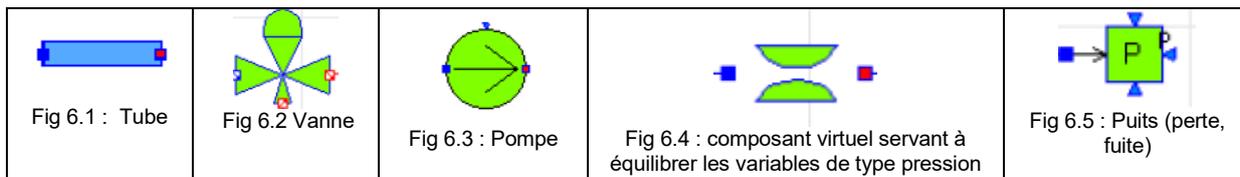
Tableau 2 : Mode de défaillance pour les composants électriques et de climatisation d'un Data Center

Ensuite l'intégration des modes de pannes repose sur les étapes suivantes :

- Prendre un composant existant dans une bibliothèque MODELICA

- Ajouter d'autres composants pour représenter physiquement le mode de défaillance du composant étudié
- Ajouter un automate qui activera les modes de pannes en fonction de transition aléatoire correspondant au taux de pannes des composants

La base « thermosyspro » est composée de nombreux composants thermohydrauliques dont les composants suivants (fig 6) :



Pour illustrer la méthode on va considérer le composant « tube » (« pipe » en anglais) de la base Thermosyspro. Bien que l'icône de ce composant sous « Dymola » soit très simple, il faut bien considérer que MODELICA au travers de ce tube dans lequel circule un fluide va prendre en compte les différentes équations de la thermohydraulique avec les paramètres : température, enthalpie, et pression du fluide circulant dans le tube.

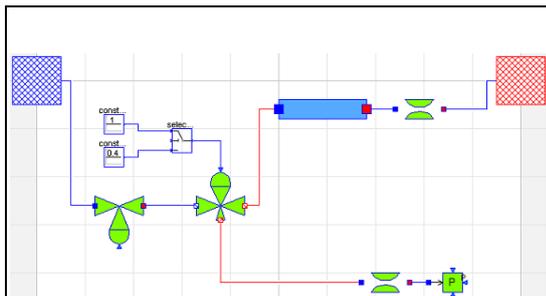


Fig 7 : Intégration de nouveaux composants (vanne, puits ...) pour représenter les modes de pannes du composant « tube » dans MODELICA

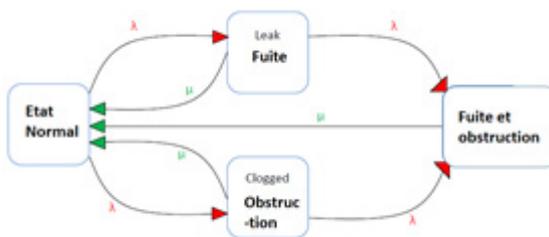


Fig 8.1 : Graphe des modes de pannes pour le tube

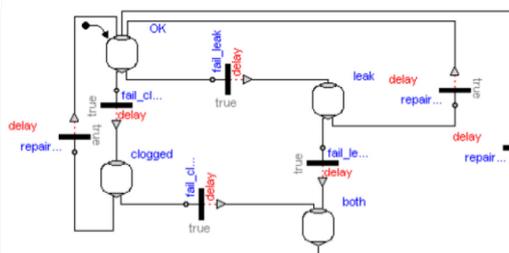


Fig 8.2 : Diagramme d'activation des modes de pannes avec la bibliothèque « StateGraph2 » de MODELICA

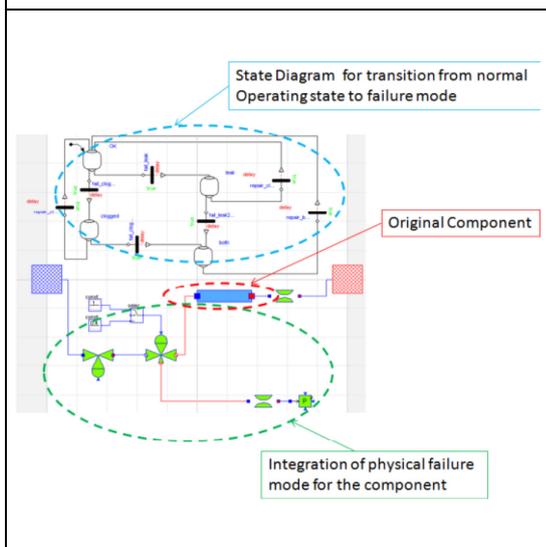


Fig 9 : Diagramme complet sous Modelica du composant « Tube » avec ses modes de pannes

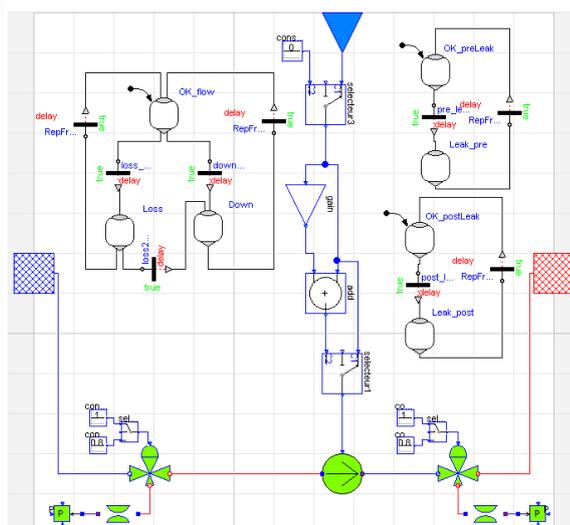
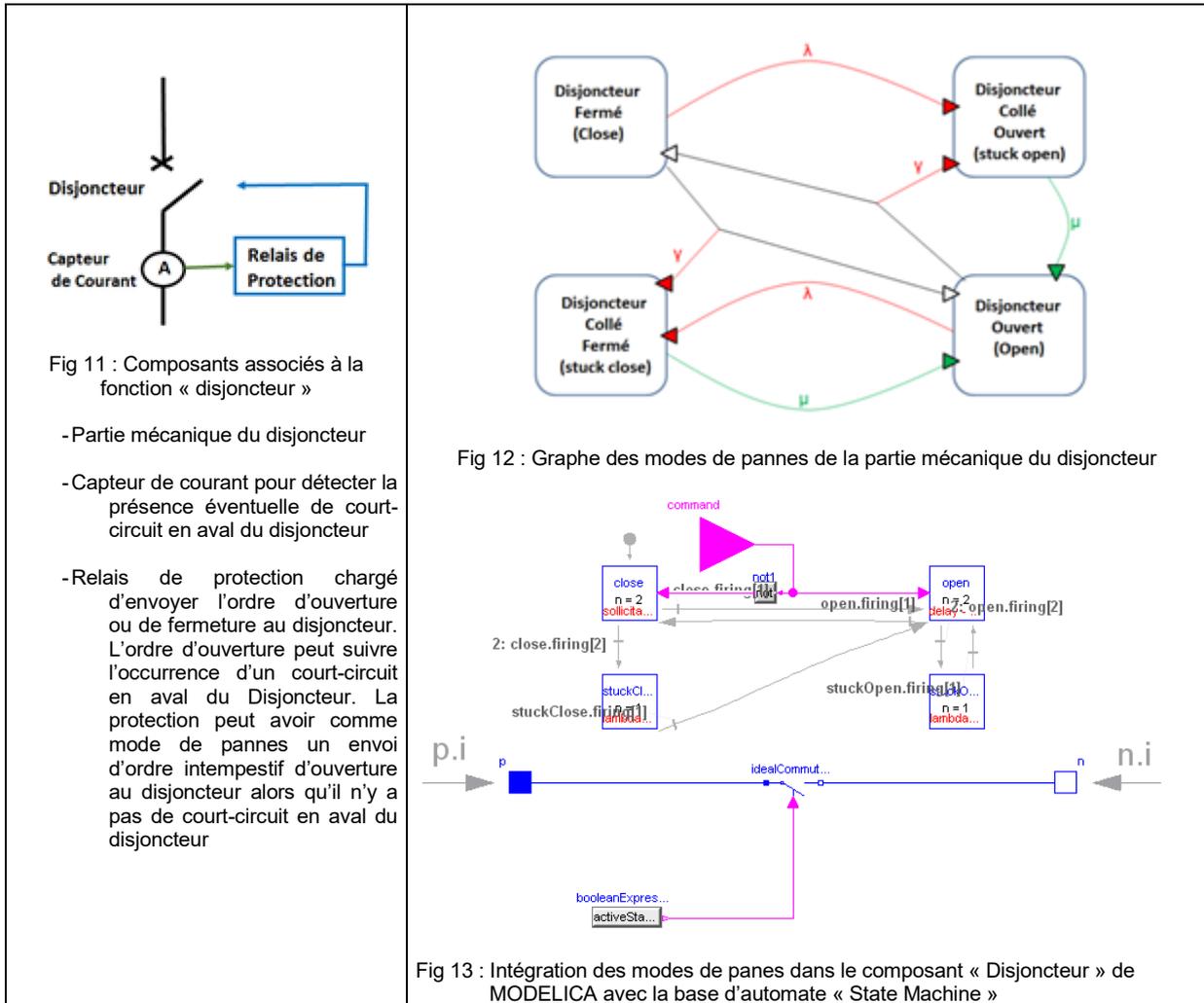


Fig 10 : Diagramme complet sous MODELICA pour le composant « pompe » avec ses modes de pannes

Exemple d'intégration de mode de pannes dans le disjoncteur



2 Intégration de la simulation de Monte Carlo dans MODELICA

La version MODELICA 3.3 permet l'utilisation de bibliothèque de machine à états synchrones (synchronous state machines) [10]. Pour pouvoir effectuer des simulations il est nécessaire d'utiliser une horloge. Cependant dans notre cas nous souhaitons avoir des équations différentielles continues et donc utiliser des machines d'état en temps continu (« continuous-time state machine ») bibliothèque de l'outil « Dymola ». Cela correspond à une extension des possibilités de MODELICA 3.3. Cela a été possible dans l'outil Dymola © en activant des variables cachées (« Hidden Flags », voir les publications de H Elmquist [12],[13]).

Le principe de la modélisation de Monte Carlo a été présenté dans les articles [10], [14] (Bouissou et al.). On indique ci-après quelques éléments sur le sujet.

Un temps de panne aléatoire T suivant une fonction de distribution cumulée F est défini par : $F(t) = \Pr(T < t)$

Le taux de défaillance ou "hazard rate" est défini par : $\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Pr(T < t + \Delta t \mid T > t)}{\Delta t}$

Ainsi le taux de défaillance peut être exprimé sous la forme suivante : $\lambda(t) = \frac{F'(t)}{1 - F(t)}$ ou $\frac{dF(t)}{dt} = [1 - F(t)] \cdot \lambda(t)$

Le prochain événement T s'obtient en résolvant $F(T) = r$ où " r " est un nombre aléatoire tiré selon une loi uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$. Dans le cas simple où $\lambda(t)$ est constant avec le temps, on a $T = -1/\lambda \cdot \ln(1-r)$

On montre dans le tableau suivant deux implémentations dans MODELICA de l'algorithme de Monte Carlo pour un taux de panne constant avec le temps et un taux de panne non constant avec le temps. Pour ce dernier cas, on peut remarquer que l'on intègre dans MODELICA directement la formulation de l'équation différentielle reliant les paramètres $F(t)$ et $\lambda(t)$. C'est la résolution dans MODELICA de cette équation différentielle qui va définir les temps d'activation des pannes du chauffage dans l'exemple de la « salle chauffée »(ou « heated room ») [10].

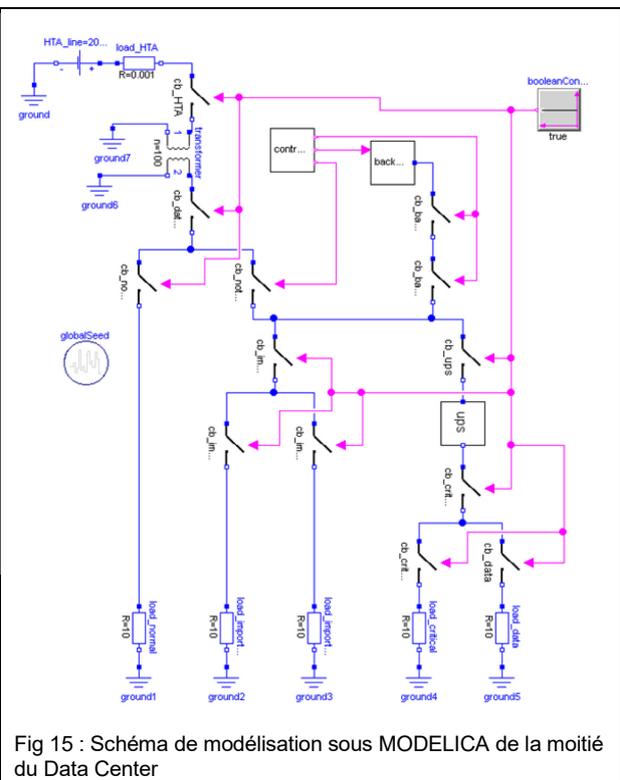
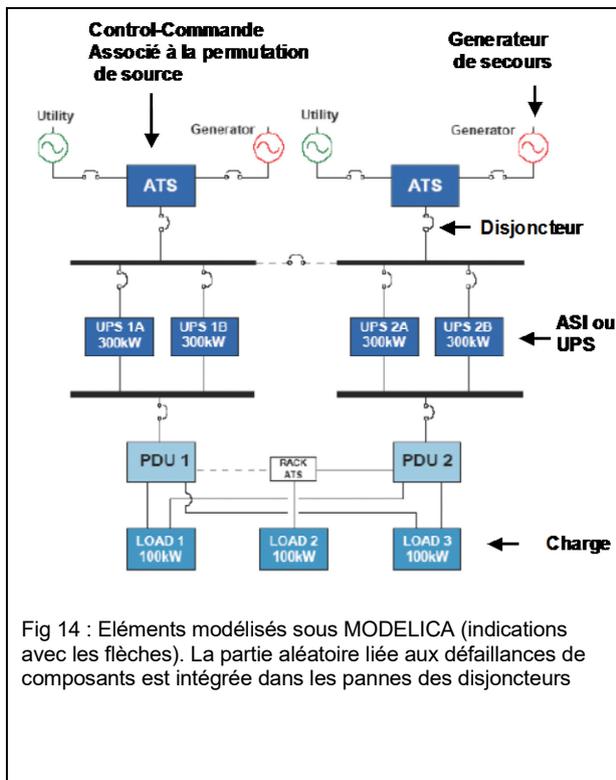
$T = -\frac{\ln(1-r)}{\lambda} \rightarrow$ $t_next = time - \log(1-r) / hazardRate$	$\frac{dF(t)}{dt} = (1 - F(t))\lambda(t) \rightarrow$ $der(F) = (1-F)*hazardRate$
<pre> outer GlobalSeed globalSeed; Real r, t_next; parameter Real hazardRate; equation when enableFire then r = globalSeed.random(); t_next = time - log(1-r)/hazardRate; end when; if enableFire then fire = time >= t_next; else fire = false; end if; </pre>	<pre> outer GlobalSeed globalSeed; Real r; input Real hazardRate(min=0); equation when enableFire then r = globalSeed.random(); reinit(F,0); // start at F=0 end when; der(F) = (1-F)*hazardRate; if enableFire then fire = F >= r; else fire = false; end if </pre>

Tableau 3 : Exemple de deux méthodes d'implémentation des simulations de Monte Carlo dans MODELICA

6. Première approche pour modéliser la fiabilité du réseau électrique du Data Center

Pour modéliser la fiabilité du réseau électrique du Data Center on a représenté sous MODELICA un certain nombre d'équipements en détail qui sont indiqués par une flèche sur la figure 14. On a copié également des figures de l'interface graphique de MODELICA présentant la moitié du Data center (figure 15) et tout le Data Center (figure 16).

Les aléas de pannes sont en fait tous générés via les pannes du composant « disjoncteur global » au travers des modes de pannes refus d'ouverture ou de fermeture à la sollicitation de la partie mécanique du disjoncteur, et fonctionnement intempêtif de la protection en fonction du temps, qui aboutit à des ordres d'ouverture intempêtive non justifiée du disjoncteur.



On précise sur la figure 16 les points d'intérêt que l'on a étudié, à savoir les tensions au niveau d'une charge (ou client) situé du côté gauche du data center (flèche rouge), et du jeu de barre qui est alimenté par les deux côtés du data center (flèche bleue). Sur la figure 17 on indique les résultats des simulations en cours du temps (pour une durée arbitraire) permettant de voir un certain nombre de pannes puis de réparation des composants. On voit que pour le point d'intérêt de la charge située à gauche

du data center (courbe rouge), on arrive à perdre l'alimentation en fonction de la perte de différents composants. Par contre pour le jeu de barre alimenté par les deux parties du data center (courbe bleue), on n'a pas de coupure totale, mais des variations de tension comprises entre 165 V et 190V alors que la tension nominale au niveau de ce jeu de barre est de 173 V.

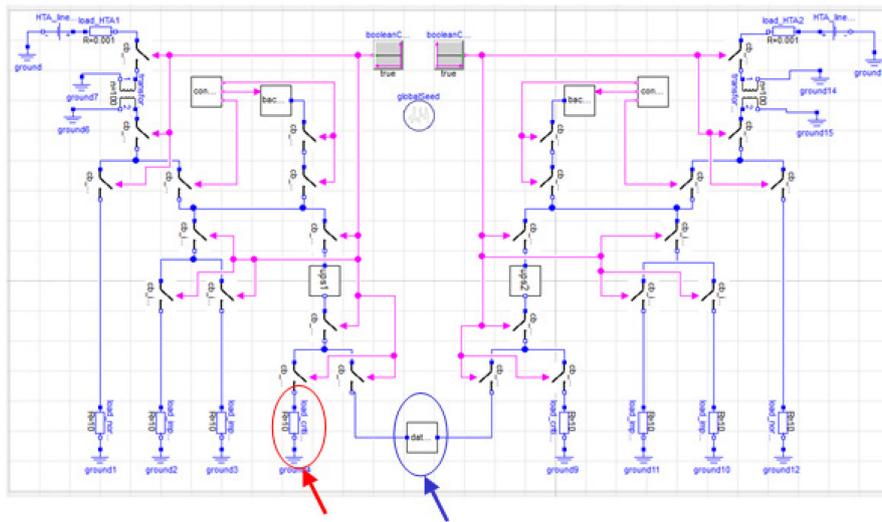


Figure 16 : Point d'intérêt (flèches rouge et bleue) regardés dans le cadre de la modélisation sous MODELICA

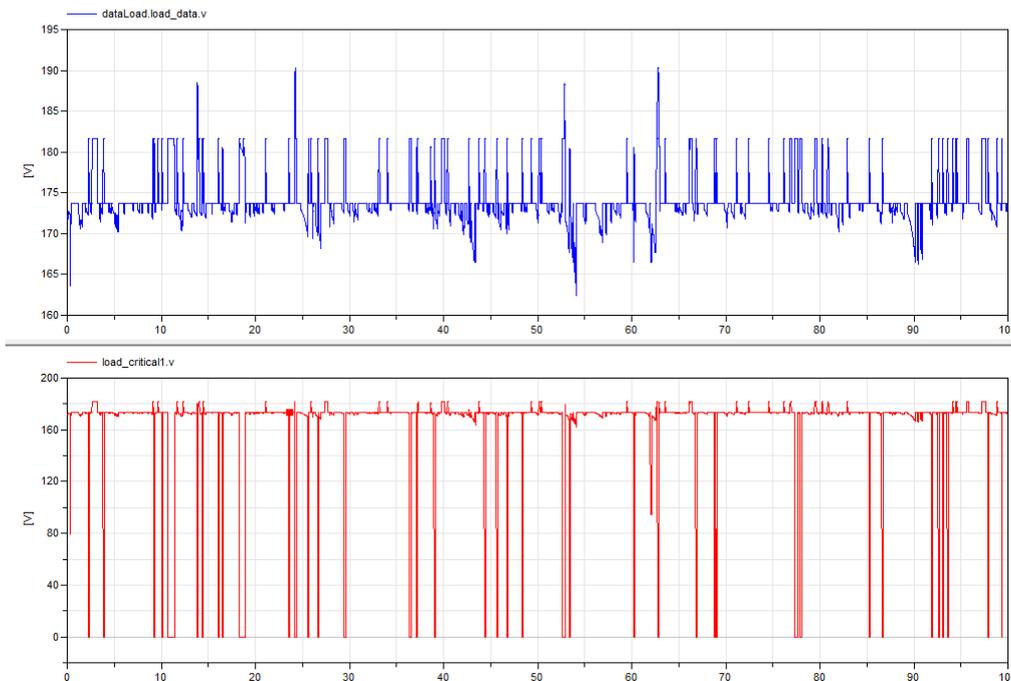


Figure 17 : Résultat obtenu en terme de variation de tension aux niveaux des points d'intérêts (flèche bleue ou flèche rouge de la figure précédente) en fonction de pannes des composants qui provoquent des basculements ou des pertes totales d'alimentation

7. Exemple d'étude avec MODELICA de la fiabilité de la « salle climatisée » avec des serveurs dont le taux de panne varie avec la température

Le cas d'étude de la « salle chauffée » (ou « heated room ») avec modélisation de l'inertie thermique de la salle et des pannes du chauffage a été traité avec MODELICA dans [10]. Dans cet exemple l'inertie thermique était représentée par l'équation suivante, où T est la température de la salle, « T_outside » est la température externe et « Heater » est le chauffage qui s'enclenche pour maintenir la température de la salle entre deux consignes de température. Le chauffage « heater » peut tomber en panne et être réparé.

$$\frac{dT}{dt} = 0.1 \times (T_{Outside} - T) + 5 \times Heater_{is_on}$$

avec : suivant les ordres de la régulation thermique « Heater = 1 » s'il doit chauffer la salle, et « Heater = 0 » lorsqu'il est à l'arrêt. Quand le chauffage est en panne, « Heater » est bloqué à 0.

Pour le « data center » on a considéré un autre exemple proche du cas précédant à savoir l'étude de la fiabilité de la « climatisation de la salle des serveurs ». La température de la salle des serveurs doit être maintenue entre deux consignes de température [Tmin ; Tmax] à savoir [15°C ; 20°C]. Le système de climatisation peut tomber en panne et être réparé. De plus on ajoute le fait que le taux de défaillance matériel des serveurs est dépendant de la température de la salle des serveurs selon une loi d'Arrhenius. Pour représenter l'évolution de la température dans la salle des serveurs on considère l'équation suivante :

$$\frac{dT}{dt} = 0.1 * (T_{Outside} - T) - 5 * Cooling_{is_on} + HeaterComputer$$

T représente la température de la salle des serveurs. T_outside est la température externe. "HeaterComputer" représente la chaleur dégagée par les serveurs. La variable "Cooling" représente la climatisation qui démarre ou s'arrête en fonction des consignes de régulation de la température. Suivant la régulation de la température, on a « cooling » = 1 s'il faut refroidir la salle, ou « cooling = 0 » si la température de la salle est bien dans la plage de consigne [Tmin ; Tmax]. Quand la climatisation est en panne « Cooling » est bloqué à 0. De plus comme on l'a indiqué le taux de panne des serveurs est fonction de la température de la salle suivant une loi d'Arrhenius (classiquement décrite dans FIDES [11]) :

$$\lambda(T) = \lambda_0 * \exp \left[-\frac{E_a}{K} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

Avec λ_0 : le taux de défaillance nominal des composants électroniques (/h)

E_a : Energie d'activation (eV)

K : Constante de Boltzmann (eV.K⁻¹)

T : Temperature de la salle climatisée (K)

T₀ : Température de référence (K)

Les deux événements redoutés que l'on souhaite étudier sont les suivants :

- la probabilité que la température de la salle des serveurs sorte de la consigne de température nominale [Tmin ; Tmax]
- et la probabilité de panne des serveurs sur une durée de mission donnée compte tenu des pannes éventuelles de la climatisation.

Sur les figures suivantes on visualise les résultats de modélisation du système de climatisation sous MODELICA pour une durée de mission arbitraire. On voit bien sur la figure 18 la mise en œuvre régulière de la régulation de température entre 15°C et 20°C et les deux événements de pannes aléatoires de la climatisation (suivies de réparations). Sur la figure de droite (figure 19) on visualise le taux de pannes des serveurs en fonction de la température de la salle où se trouvent les serveurs.

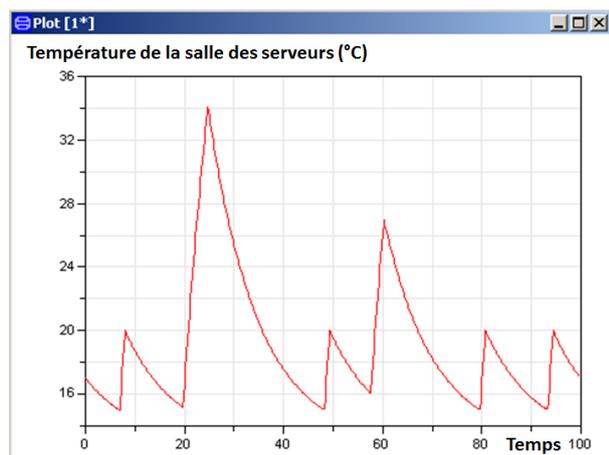


Figure 18 : Evolution de la température de la salle des serveurs compte tenu de la régulation thermique et des pannes puis réparation de la climatisation

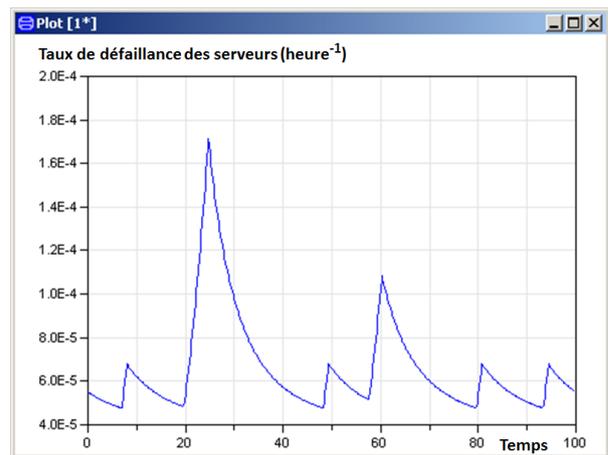


Figure 19 : Evolution du taux de défaillance des serveurs en fonction de la température de la salle des serveurs

8. Conclusion, Perspective

Cet article a permis de présenter les résultats de la modélisation de la fiabilité et disponibilité du réseau électrique d'un data center et de son système de climatisation avec l'outil MODELICA et la méthode de simulations de Monte Carlo. L'enjeu est la modélisation hybride pour les études de fiabilité où l'on modélise à la fois les fonctionnements continu (état nominal) et discret (état dégradé ou de panne) du système. Ces études ont été réalisées dans le cadre du projet Européen MODRIO au sein duquel un partenariat fructueux a été mis en place entre EDF R&D, DLR et SUPELEC. La démarche présentée pourrait être utile à termes pour les études de fiabilité et disponibilité des réseaux intelligents (« smart grid ») ou pour les réseaux électriques îlotés (« micro-grid »). Cette nouvelle approche permettra de compléter les outils existants pour les études de fiabilité des systèmes électriques.

Références

- [1] M. Bouissou, S. Humbert, S. Muffat, N. Villate "KB3 tools : feedback on knowledge bases" Conférence Lambda Mu 13 ESREL (European safety and reliability conference) 2002 Lyon France
- [2] Carer P. , Bellvis J., Bouissou M., Domergue J., Pestourie (2002) J. "A new method for reliability assessment of electrical power supplies with standby redundancies" 7th international conference on Probabilistics Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Naples Italy, September 2002
- [3] Pestourie J., Carer P., Cazaban D., Pamphile P. (2004) "Etude de fiabilité et disponibilité du réseau électrique de la cokerie d'un aciériste" Conférence Lambda Mu 14 Bourges 12-14 Oct 2004
- [4] Pestourie J., Malarange, Breton E., Muffat S. Bouissou M., (2004) "Etude de la sûreté de fonctionnement d'un poste source EDF (90/20 kV) avec le logiciel OPALE" Conférence Lambda Mu 14 Bourges 12-14 Oct 2004
- [5] T. Chaudonneret, F. Robin "Un nouvel outil KB3-K6 pour l'estimation de la fiabilité et disponibilité des réseaux électriques industriels" soumis à la conférence Lambda Mu 20 October 2016 St-Malo.
- [6] Chilard O., Boes J., Perles A, Camelleri G., Gleizes MP, Tavella JP, Croteau D. "The modelica language and the FMI standard for modelling and simulation of smart grids" Modelica international conference 2015 Versailles France
- [7] H. Chraïbi « Pythonic oriented stochastic hybrid automata (PyCATSHOO) : a new tool for reliability assessment of hybrid systems » submitted to JRR 2016
- [8] Pitt Turner IV W., Seader John H., Renaud Vince, Brill Kenneth G. (2005) "Tier Classification define site infrastructure performance, White Paper" Uptime Institute <http://uptimeinstitute.com/publications>
- [9] Carer P., Guerineau L., (2014) "Evaluation de l'impact des conditions météorologiques sur la fiabilité du réseau électrique par des processus stichastiques" conférence Lambda Mu 19, Dijon 21-23 October 2014
- [10] M. Bouissou, H. Elmqvist , M. Otter, A. Benveniste (2014) « Efficient Monte Carlo simulation of stochastic hybrid system » Modelica' 2014 Conference Lund Sweden, March 10-12
- [11] "FIDES guide 2009 Reliability methodology for electronic systems" www.fides-reliability.org
- [12] H. Elmqvist, F. Gaucher, S.E. Mattsson, F. Dupont State Machine in MODELICA » MODELICA'2012 Conference, Munich, Germany Sept. 3-5 2012 Download : <http://www.ep.liu.se/ecp/076/003/ecp12076003.pdf>
- [13] H. Elmqvist, S.E. Mattsson. M.Otter « Modelica extensions for Multi-mode DAE systems » Modelica' 2014 Conference, Lund Sweden March 10-12
- [14] M. Bouissou, X De Bossoreille (2015) «From Modelica models to dependability systems» 5th International Workshop on Dependable Control of Discrete Systems Cancun, Mexico 27-29 May 2015
- [15] Henry S., Breda-Seyes E., Lefebvre H., Sermasson V., Bena M. "Probabilistic study of the collapse modes of an area of the French network" 9th international conference on Probabilistics Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Stockholm Sweden June 11-15, 2008
- [16] L. Vanfretti, T. Bogodorova, M. Baudette "A modelica power systems Library for model validation and parameter identification" Proceeding of the 11th International Modelica Conference March 10-12, 2014 Lund Sweden
- [17] F-J Gomez, L. Vanfretti, S.H. Olsen "Binding CIM and Modelica for consistent power system Dynamic model Exchange and simulation" IEEE PES General Meeting Denver Colorado 26-30 July 2015
- [18] Schallert C. "Incorporation of reliability analysis methods with modelica" The modelica association, MODELICA 2008, March 3rd- 4th 2008
- [19] Bouissou M. Buffoni, Thiele B. "From dependability : a bridge between physical and risks analysis" article soumis à la conférence Lambda Mu 20 Oct 2016 - St Malo