



HAL
open science

Analyse de la sûreté de fonctionnement d'un Data Center

Walid M. Bennaceur, Leila Kloul

► **To cite this version:**

Walid M. Bennaceur, Leila Kloul. Analyse de la sûreté de fonctionnement d'un Data Center. Congrès Lambda Mu 21, " Maîtrise des risques et transformation numérique : opportunités et menaces ", Oct 2018, Reims, France. hal-02066351

HAL Id: hal-02066351

<https://hal.science/hal-02066351v1>

Submitted on 13 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse de la sûreté de fonctionnement d'un Data Center

Safety analysis of a Data Center system

WM. Bennaceur

Laboratoire DAVID UVSQ
45 Avenue de Etats Unis Versailles 78000
valid.mkh.ben@gmail.com

L.Kloul

Laboratoire DAVID UVSQ
45 Avenue de Etats Unis Versailles 78000
leila.kloul@uvsq.fr

Résumé

Dans cet article, nous étudions la fiabilité et la disponibilité de production d'un Data Center. Plusieurs facteurs peuvent affecter la disponibilité des Data Centers, les plus importants étant la production de l'énergie électrique et les variations de température dans la salle des serveurs. Les variations de température sont dues au système de refroidissement qui est en charge de l'extraction de la chaleur dans cette salle. Dans un premier temps, nous analysons individuellement les sous-systèmes électriques et thermiques en utilisant les Arbres de Production, une nouvelle méthodologie de modélisation pour l'analyse de la disponibilité des systèmes de production. Ensuite, nous analysons les différentes interactions entre ces sous-systèmes.

Summary

In this article, we investigate the reliability and the production availability of a Data Center. Several factors may affect the availability of Data Centers, the most important being the electrical energy production and the temperature variations within the data center room. The temperature variations are due to the cooling system which is responsible of extracting the heat from this room. First, we analyze electrical and thermal subsystems using Production Trees, a new modeling methodology for availability analysis of production systems. Then we analyze the different interactions between these subsystems.

1. Introduction

Un Data Center est un bâtiment dont le but est d'héberger des équipements électroniques de type télécom ou informatique : des serveurs, des supports de stockage de données, des routeurs, . . . Ces équipements sont la matérialisation physique d'Internet, du Cloud ou de l'informatique d'entreprise. Les Data Centers sont donc utilisés par les banques, les opérateurs télécoms, les hôpitaux, et toute entreprise connectée.

Les équipements hébergés dans un Data Center ont trois besoins matériels essentiels : un espace physique, de l'électricité de qualité industrielle et un apport en froid constant. Un Data Center peut être donc vu comme un système regroupant 3 sous-systèmes différents : électrique, thermique et réseau. L'espace physique est un lieu où se trouvent les différents équipements électroniques, des ordinateurs, des systèmes de stockage et des équipements de télécommunications. Leurs interconnexions forment un réseau important.

Pour garantir un fonctionnement constant de ces équipements, une énergie est fournie par le système électrique. Cette énergie est transformée par la suite en chaleur par effet joule. Pour garder à température constante le matériel d'un Data Center, un système de refroidissement est nécessaire. Les Data Centers sont ainsi construits pour respecter des contraintes fortes de continuité de service.

Ces contraintes peuvent représenter jusqu'à 50% du coût du Data Center, soit plusieurs millions d'Euros [10]. En effet, une coupure électrique de 10s peut engendrer un arrêt de service informatique de 10h et 1 minute d'interruption est chiffrée à plus de 7000 dollars [15].

Afin d'effectuer l'analyse de la disponibilité d'un Data Center, plusieurs techniques sont utilisées. Celles-ci sont classées en deux catégories: les formalismes booléens et les formalismes états/transitions [11].

Les techniques booléennes sont les plus populaires. Elles incluent l'analyse des Arbres de Fautes (AF) et les Diagrammes de Blocs de Fiabilité (DBF). Ces techniques ont des représentations graphiques pratiques, ce qui est important pour les modèles industriels. Cependant, il n'est pas possible de prendre en compte l'ordre dans lequel les événements se produisent et les événements peuvent se produire à tout moment, quel que soit l'état actuel du système. Une solution partielle à ce problème est fournie par les Arbres de Fautes Dynamiques (AFD). Cependant, cette technique ne permet pas l'estimation de la disponibilité de la production.

Les techniques Etats/Transitions sont capables de représenter les dépendances entre les défaillances. De nombreuses techniques ont été proposées dans la littérature telles que les Chaînes de Markov (CM) et les Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés (RPSG) [11]. Elles sont très utilisées pour représenter des modèles dynamiques qui ont une représentation graphique pratique, mais cette représentation devient illisible pour les grands modèles et il est difficile de représenter la propagation des flux. Une autre limitation majeure est l'explosion de l'espace d'état due à la grande taille du système.

L'analyse de la disponibilité d'un Data Center dépend du sous-système électrique conçu pour fournir de l'énergie, et du sous-système de refroidissement qui est responsable de l'extraction de la chaleur de la salle du Data Center. En plus de cela, l'analyse de disponibilité de chaque sous-système dépend non seulement de l'état interne de chaque composant, mais aussi de leur capacité de production.

Une nouvelle technique récemment développée, permet de décrire les interactions entre les composants en tenant compte des flots qui circulent dans le système. Il s'agit de la technique des Arbres de Production [12].

Les Arbres de Production (AP) sont vus comme des Arbres de Fautes classiques avec des nœuds qui

représentent des composants et des portes (non logiques) qui représentent le comportement du système. Un flot qui circule du composant source vers le composant cible est aussi représenté pour fournir une sémantique par rapport aux Arbres de Fautes classiques.

Dans cet article, nous étudions les interactions entre les différents sous-systèmes du Data Center ainsi que leurs impacts sur la fiabilité et la disponibilité de production de Data Center. Ces interactions représentent l'impact du système électrique sur le système de refroidissement et sur le système informatique, et l'impact du système de refroidissement sur le système informatique en termes de variations de température dans la salle du Data Center.

Cet article est structuré comme suit. Dans la section 2, nous discutons les différents travaux réalisés dans le contexte de fiabilité et disponibilité des Data Centers. La section 3 présente un aperçu des arbres de production et une description de la méthode utilisée pour analyser le système. La section 4 résume les résultats obtenus. Enfin, la section 5 conclut cet article.

2. Travaux connexes

Au cours des dernières années, des recherches ont été faites sur l'analyse de la sûreté de fonctionnement des systèmes des Data Centers.

Wei [20] présente une méthode hiérarchique pour modéliser et analyser un Data Center Virtuel (DCV). L'approche combine les Diagrammes de Blocs de Fiabilité (DBF) et les Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés (RPSG) pour quantifier la disponibilité et la fiabilité. Les architectures électriques et thermiques du Data Center ne font pas l'objet de ces recherches et les modèles proposés sont spécifiques à la modélisation de DCV.

Gmach [7] propose une approche pour gérer l'approvisionnement en énergie du data center. L'approche estime l'utilisation de l'énergie dans un data center en fonction de l'utilisation moyenne des processeurs CPU dans les serveurs. Dans [17], les auteurs proposent une plateforme pour l'évaluation des Data Centers intelligents en tenant compte tenu des systèmes thermiques, électriques et réseaux. Un coefficient de performance est proposé pour mesurer l'efficacité globale des flux d'énergie. Cependant, les deux travaux ne fournissent pas d'étude sur la fiabilité et la disponibilité des différentes architectures des Data Centers.

Patterson [14] évalue l'impact de la température ambiante sur l'efficacité énergétique. L'analyse menée indique l'existence d'une température optimale pour le fonctionnement du Data Center qui dépend de plusieurs facteurs. Herold [8] décrit les possibilités d'intégration de l'énergie dans le contexte des systèmes électriques et thermiques combinés. Cependant, les deux travaux ne sont pas axés sur une approche intégrale tenant compte des problèmes de capacité, de disponibilité et de fiabilité.

La pratique du monitoring pour suivre et mesurer les impacts sur l'environnement représente un défi pour de nombreuses industries. Les auteurs de [6] illustrent l'importance de l'Efficacité de l'Utilisation Energétique (EUE), ce qui correspond au rapport de la puissance totale sur la puissance utilisée par les équipements informatiques. Ce travail se concentre uniquement sur les problèmes de durabilité.

Dans [9] l'Indice de Refroidissement du Rack (IRR) a été introduit. Cet indice permet d'évaluer les températures entrantes dans un rack et les comparer avec les températures admissibles et recommandées dans les Data Centers. D'autres indices ont été proposés dans [4]. Cependant, ces indices ne prennent pas en compte la défaillance des différents composants du système.

Wang [19] propose un algorithme d'optimisation, appelé CARPO, pour optimiser la consommation d'énergie des Data Centers. L'algorithme se concentre sur la réduction du nombre de commutateurs réseaux activés dans le Data Center grâce à la consolidation dynamique du trafic réseau. L'objectif est de réduire les flux de données dans un petit ensemble de liens et, ensuite, d'arrêter les périphériques réseau inutilisés pour économiser l'énergie. Ces travaux se focalisent sur l'architecture réseau sans mentionner les autres architectures (électrique et thermique).

Enfin, une approche intégrale pour estimer la fiabilité et la disponibilité d'un Data Center appelée Mercury est présentée dans [2]. Cet outil permet d'utiliser des approches telles que DBF, RPSG, les Chaînes de Markov et le Model de Flux d'Énergie (MFE). Celle-ci vérifie le modèle de flux d'énergie sur le système électrique, compte tenu de la capacité de puissance que chaque composant peut fournir. Cependant, ces travaux se focalisent seulement sur l'architecture électrique sans mentionner l'architecture électrique.

Actuellement, rares sont les techniques qui fournissent une approche pour estimer la disponibilité du Data Center en tenant compte à la fois des interactions entre les différents sous-systèmes (électriques et thermiques) et les flux circulant dans chaque sous-système. Les Arbres de Production sont une technique simple qui décrit les interactions entre les composants du système en tenant compte du flux de capacité maximal. Ils sont utiles pour représenter des modèles dynamiques et estimer la disponibilité de production.

3. Méthode

Les Arbres de Production (AP) fournissent deux types de composants pour modéliser un système : les composants de base et les portes. Les composants de base représentent les unités de production ou de traitement du système alors que les portes modélisent le comportement du système.

Les composants de base sont similaires aux événements de base dans les Arbres de Fautes classiques. Cependant, contrairement aux portes d'un arbre de fautes, les portes de l'AP ne sont pas logiques. Ils permettent de traiter les flots de production en amont et en aval d'une ligne de production, selon le type de ces flots. Trois types de flots circulent dans un AP :

- un flot de capacité depuis le nœud source vers le nœud destination.
- un flot de demande depuis le nœud destination vers le nœud source.
- un flot de production depuis le nœud source vers le nœud destination.

La production dépend de la demande qui dépend elle-même de la capacité et se déroule en trois étapes:

- Tout d'abord, chaque composant (unité de production) exporte sa capacité réelle, notée (*outCapacity*). Cette capacité est nulle si le composant est défaillant et égale à sa capacité intrinsèque (*intraCapacity*) s'il est fonctionnel.
- Ensuite, le composant reçoit une demande, notée *inDemand*, qui, dans des conditions stables, ne doit pas dépasser la capacité du composant.

- Enfin, le composant exporte une production (*outProduction*), qui est le minimum de sa capacité réelle et de la demande. Si la demande est nulle, le composant est considéré en mode veille.

La Figure 1 montre les flots entrants et sortants d'un composant ayant m parents et n fils.

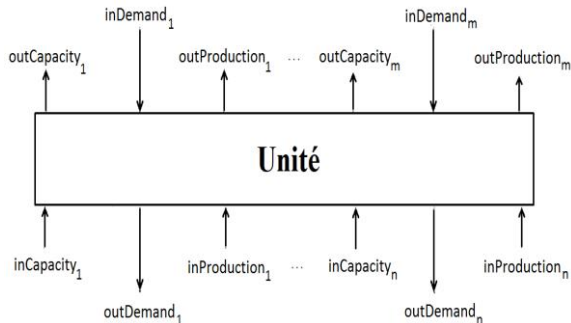


Figure 1. Les Flots circulants en amont et en aval d'un composant

Dans un AP, les portes permettent d'autoriser, d'inhiber ou de modifier le passage des flots. Il existe trois types de portes (Figure 2) : *Plus*, *Min* et *Splitter*.

- Porte Min** : Cette porte est une extension directe de la porte "AND" d'un arbre de fautes classiques. Elle a un parent et deux ou plusieurs fils. Le flot de capacité sortant de la porte *outCapacity* est le minimum des flots de capacité provenant de ses fils et de sa capacité intrinsèque. La demande en entrée de la porte (provenant de son parent) *inDemand* est propagée inchangée à ses fils. Enfin, le flot de production en sortie de la porte *outProduction* est le minimum des flots de production de ses fils.
- Porte Plus** : Cette porte est une extension de la porte "OR" d'un AF classique, mais d'une manière moins évidente que la porte *Min* avec la porte "AND". La porte *Plus* possède un parent et plusieurs fils. Son flot de capacité sortant *outCapacity* est le minimum de sa capacité intrinsèque et la somme des flots de capacité provenant de ses fils. La demande en entrée de la porte *inDemand* est propagée sans modification à ses fils. Enfin, le flot de production en sortie de la porte *outProduction* est la somme des flots de production provenant de ses fils. Dans le cas où le flot de capacité sortant de la porte n'est pas égal aux flots de capacité provenant de ses fils, la demande en entrée de la porte est propagée aux fils selon une stratégie d'allocation. Par exemple, la demande peut être attribuée selon la stratégie du prorata. Une autre stratégie consiste à allouer la production maximale au premier fils, le reste au deuxième fils, etc. (priorité).
- Porte Splitter** : Contrairement aux autres portes, cette porte n'a qu'un fils et plusieurs parents. Le flot de capacité sortant de la porte *outCapacity* est le minimum de sa capacité intrinsèque et le flot de capacité provenant de son unique fils. Ce flot est transmis inchangé aux parents. La demande en entrée de la porte

inDemand est la somme des demandes de ses parents. Enfin, le flot de production sortant de la porte *outProduction* est divisé entre ses parents suite à une stratégie d'allocation (priorité, prorata, ...), comme pour la porte *Plus*.

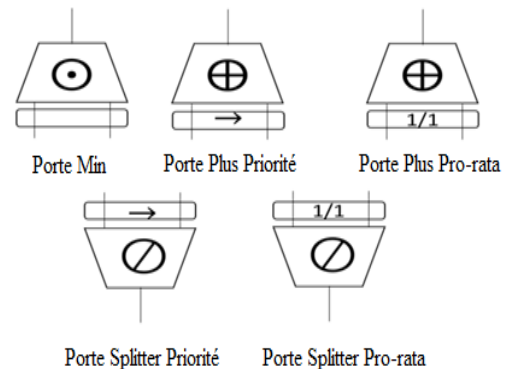


Figure 3. Les portes d'un Arbre de Production

Les APs sont une nouvelle méthodologie de modélisation pour laquelle il n'existe pas d'outil pour les analyser. La simulation est une solution pour l'analyse de la fiabilité du système. Cependant, la simulation ne produit que des réponses approximatives, car elle repose principalement sur l'utilisation de générateurs de nombres aléatoires pour fournir l'entrée du modèle. Par conséquent, pour analyser le modèle d'AP, nous avons développé une méthode basée sur les Distributions de Probabilité de Capacité (DPC) des flots circulants dans le système. Cette approche calcule la disponibilité d'un système en utilisant un ensemble de formules prédéfinies. Elle est plus restreinte et fournit plus de précision en terme de disponibilité du système que les méthodes de simulation.

L'idée de base de l'algorithme de résolution des APs que nous avons développé est inspirée de la méthode utilisée dans le logiciel UNIRAM développé par ARINC (USA) [18]. Les ajouts et les modifications qui ont été apportés concernent le traitement des DPCs.

Les APs sont caractérisés par des portes. Selon le type de ces portes, un traitement particulier est appliqué aux DPCs des flots circulant en amont et en aval de cette porte.

Formellement, nous définissons un AP comme un graphe orienté $g = (V, E, s, t, \lambda, \mu, \omega)$ tel que:

- $V = V_C \cup V_G$: un ensemble de nœuds où les sous-ensembles sont disjoints.
 - V_C : ensemble des composants.
 - V_G : ensemble des portes.
- $E = E_{Cap} \cup E_{Dem} \cup E_{Pro}$: un ensemble d'arcs où les sous-ensembles sont disjoints.
 - E_{Cap} : ensemble d'arcs représentant les flux de capacité.
 - E_{Dem} : ensemble d'arcs représentant les flux de demande.
 - E_{Pro} : ensemble d'arcs représentant les flux de production.
- $s: E \rightarrow V$: fonction qui assigne à chaque arc son nœud source.
- $t: E \rightarrow V$: fonction qui assigne à chaque arc son nœud destination.

- λ : fonction qui renvoie le taux de défaillance d'un nœud.
- μ : fonction qui renvoie le taux de réparation d'un nœud.
- $\omega : E \rightarrow \mathbb{R}^+$: fonction qui assigne une valeur à un arc.

Un nœud $v \in V$ peut être un composant ou une porte. Un arc $e \in E$ peut représenter soit un flot de capacité *outCapacity*, un flot de demande *inDemand* ou un flot de production *outProduction*, qui circule entre le nœud source $s(e)$ et le nœud destination $t(e)$. La quantité de chaque flot est définie par la fonction $w(e)$.

Chaque nœud $v \in V_C$ possède une Distribution de Probabilité de Capacité (DPC). Celle-ci est définie par deux attributs :

- le premier représente le flot de capacité *outCapacity* sortant de l'arc, $w(e)$ tel que $e \in E_{cap}$ et $s(e) = v$.
- Le deuxième attribut représente la probabilité d'avoir cette capacité.

À l'état initial, un composant peut avoir deux états (fonctionnel, défaillant). Un composant v possède un taux de défaillance et un taux de réparation donné par la fonction $\lambda(v)$ et $\mu(v)$, respectivement.

En considérant un modèle Markovien, on peut calculer les probabilités d'être dans les deux états comme suit :

$$\Pr(\text{Composant défaillant}) = \frac{\lambda(v)}{\lambda(v) + \mu(v)}$$

$$\Pr(\text{Composant fonctionnel}) = \frac{\mu(v)}{\lambda(v) + \mu(v)}$$

Donc pour chaque attribut, deux valeurs sont associées : le composant v est fonctionnel, *outCapacity* = $w(e)$ tel que $e \in E_{cap}$ et $s(e) = v$ avec une probabilité $\Pr(\text{Composant fonctionnel})$.

De même, le composant v est défaillant, *outCapacity* = 0 avec une probabilité $\Pr(\text{Composant défaillant})$.

L'analyse de l'Arbre de Production est basée sur la DPC de chaque nœud v . En parcourant le graphe G de bas en haut (bottom-up), le traitement se déroule comme suit :

- si le nœud est une feuille (il n'envoie pas de demande), c'est-à-dire $\forall e \in E_{dem} \nexists v$, tel que $s(e) = v$ alors ne rien faire.
- si le nœud n'est pas une feuille ($\forall e \in E_{dem} \exists v$, tel que $s(e) = v$), et que c'est un composant ($v \in V_{comp}$) alors mettre à jour la DPC du nœud en fonction de son prédécesseur dans le graphe.
- si le nœud représente une porte, alors combiner les DPCs de ses fils selon le type de la porte (*Plus*, *Min* ou *Splitter*).
- si le nœud est le sommet du graphe (il n'envoie pas de flot de capacité *outCapacity*), c'est-à-dire $\forall e \in E_{cap} \nexists v$, tel que $s(e) = v$, mettre à jour sa DPC en fonction de son prédécesseur et la renvoyer.

Nous avons également implémenté le modèle d'AP en utilisant AltaRica 3.0 [13] et utilisé son simulateur stochastique afin de l'analyser. En utilisant le langage de haut niveau AltaRica 3.0, il est possible de concevoir le modèle avec une structure proche de l'architecture fonctionnelle et physique du système étudié. AltaRica 3.0 implémente le paradigme orienté prototype [16]. Ce paradigme convient bien au niveau d'abstraction de fiabilité et aux normes d'analyse de sûreté. En ce qui concerne les fondements mathématiques, AltaRica 3.0 est basé sur le formalisme de des Systèmes de Transitions Gardées (STG) [13].

Un Système de Transitions Gardées est un automate où les états sont représentés par des variables. Les changements d'états sont représentés par des transitions déclenchées par des événements. Chaque événement est associé à une distribution de probabilité cumulative de son délai. Les variables sont séparées en deux groupes: les variables d'état dont les valeurs ne sont modifiées que dans les actions des transitions et les variables de flux qui représentent les flux circulant dans le réseau. Il est également possible de synchroniser les événements afin de décrire les interactions à distance entre les composants du système étudié. La sémantique de STG est similaire à celle des Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés RPSG [13]. Les composants de base sont représentés au moyen de classes. Les classes sont des STG qui contiennent des variables, des événements, des transitions et tout ce qui est nécessaire pour décrire leur comportement.

L'infrastructure électrique est responsable de fournir l'alimentation au système de refroidissement. Afin de modéliser les deux topologies (thermique et électrique), il est pertinent de modéliser d'abord le système de refroidissement, puis le système d'alimentation électrique, puisqu'il existe une dépendance entre eux. Par la suite, le modèle global est défini en tenant compte de l'interaction entre les deux sous-systèmes. Nous avons utilisé les APs pour la modélisation et l'analyse du système électrique et thermique d'un Data Center. Dans notre cas nous avons choisi deux systèmes (thermique et électrique) définis par l'Uptime Institute [15], qui sont considérés comme des standards pour les ingénieurs de conception des Data Centers.

En appliquant cette approche sur le système électrique et thermique, on peut calculer la disponibilité des deux systèmes. Cependant, afin d'analyser l'interaction entre les deux systèmes, il est important d'étudier la dépendance entre le système électrique et le système thermique. La variation de la température est une cause fréquente de la défaillance des composants. Une fois la plage de température dépassée, les taux de défaillance augmentent. Si une unité de refroidissement tombe en panne, la capacité à extraire la chaleur sera réduite et la température augmentera. Donc le système est analysé selon deux points de vue :

- l'impact du système de refroidissement sur la température de la salle.
- l'impact de la température sur les serveurs.

L'analyse de l'AP du système thermique permet d'évaluer l'impact du système de refroidissement sur la température de la salle en calculant la capacité du système à extraire la chaleur dans la salle des serveurs. En conséquence, une nouvelle température est calculée, qui va impacter à son tour les serveurs.

Pour analyser l'impact de la température sur les serveurs, le modèle d'Arrhenius est appliqué [1]. Ce modèle relie la

durée de vie d'un composant électronique à la température de fonctionnement comme suit :

$$MTTF_{TP} = MTTF_{TP_0} * e^{\left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{TP} - \frac{1}{TP_0}\right)\right)}$$

- $MTTF_{TP}$: durée moyenne avant défaillance du composant à la température TP .
- $MTTF_{TP_0}$: durée moyenne avant défaillance du composant initiale.
- E_a : l'énergie d'activation.
- k : constante de Boltzman.

4. Résultats

En appliquant les APs sur le système considéré de l'Uptime Institute, avec des données de taux de défaillance disponibles dans [3], on peut calculer la disponibilité de ses deux sous-systèmes. Pour analyser la dépendance entre le système thermique et électrique, nous avons augmenté la puissance du serveur du Data Center comme le montre la Figure 3.

Nous avons remarqué qu'en augmentant la demande électrique au niveau des serveurs, le système thermique (CRAC) produit plus de froid pour dissiper la chaleur produite par ces serveurs. Donc le système thermique dépend du système électrique. Cependant, une fois la demande des serveurs atteint un certain seuil (60 kW dans notre cas), le système électrique produit de l'électricité pour satisfaire en priorité la demande des serveurs et le reste de l'électricité produite alimente le système thermique. Dans ce cas, le système thermique produit moins de froid, ce qui signifie qu'il n'arrive pas à extraire toute la chaleur, donc ceci impacte la durée de vie des composants qui impacte la fiabilité du système global (Figure 4).

Ceci montre l'impact du système de refroidissement sur les serveurs (système réseau) qui dépendent eux-mêmes du système électrique. Les résultats obtenus sont comparés aux résultats obtenus avec le simulateur stochastique d'AltaRica3.0 [16].

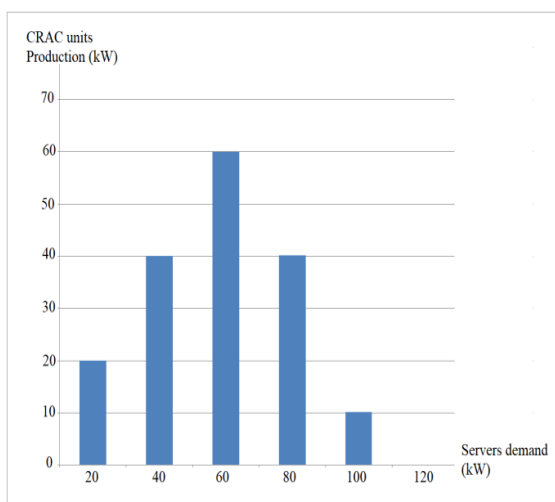


Figure 3. L'impact du système électrique sur le système thermique

Pour résumer le tout, l'analyse de la sûreté de fonctionnement d'un Data Center consiste à analyser la sûreté de fonctionnement du serveur qui dépend non seulement de son état interne, mais aussi du système électrique qui l'alimente et du système thermique qui le refroidit. Ce dernier dépend aussi du système électrique pour assurer un fonctionnement constant afin d'extraire la totalité de la chaleur produite par les serveurs. La technique d'analyse d'Arbre de Production est bénéfique sur plusieurs plans. Un premier avantage est la réduction des coûts. Cette technique prend en compte les différents flux (électriques, thermiques) qui circulent dans le système, et permet à la fois une distribution et une consommation optimale de l'électricité. Un autre avantage majeur est l'amélioration de la fiabilité du système global en identifiant les composants (voire sous-systèmes) qui impactent la probabilité de défaillance de tout le système.

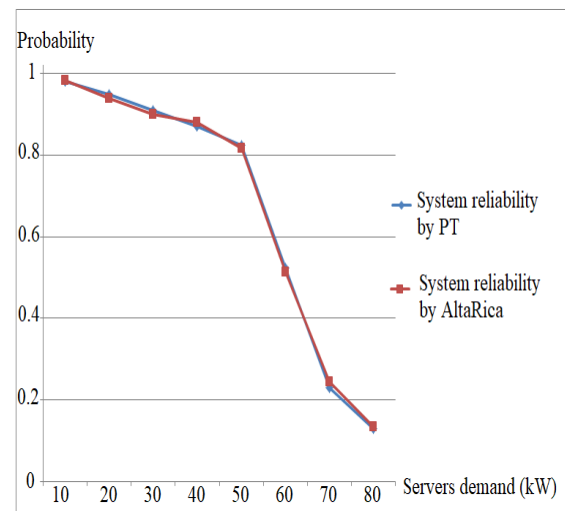


Figure 4. La fiabilité du système global

L'algorithme proposé pour la résolution des APs donne des résultats que nous avons validés par ailleurs en les comparant aux résultats obtenus avec le simulateur stochastique d'AltaRica3.0 [16]. Les résultats montrent une efficacité prometteuse de pour estimer la disponibilité des systèmes.

D'autres techniques peuvent être appliquées tels que les réseaux de Petri, mais elles restent dans la catégorie de la simulation, puisque la simulation est toujours nécessaire pour résoudre les équations générées par les réseaux de Petri. La fiabilité des graphes de flux est aussi une solution, mais pas assez efficace puisque l'une des difficultés de ces techniques est que le flux de production réel d'un composant dépend des flux de production des composants situés en aval et en amont du réseau.

5. Conclusion

L'analyse de la sûreté de fonctionnement d'un Data Center consiste à analyser les interactions entre ses différents sous-systèmes. Dans cette étude, nous avons montré à quel point les APs permettent facilement de modéliser ces sous-systèmes (électrique et thermique) prenant en compte la capacité de production.

Cependant, concernant le système thermique, l'analyse du modèle permet d'évaluer seulement la disponibilité du système en termes de capacité à dissiper la chaleur. Or, on peut se retrouver dans des situations où toute la chaleur est extraite, mais il y a toujours une présence de points de chaleur dus à l'infiltration de l'air. Les seules

techniques qui permettent de détecter ces phénomènes sont les techniques de la mécanique des fluides dynamiques ou les indices thermiques. C'est pour cette raison que dans le futur, nous pensons introduire les indices thermiques dans le modèle, afin d'avoir une analyse intégrale du système thermique.

6. Références

- [1] Arrheni K. C. G, Wood S. A tribute to the memory of svante arrhenius.
- [2] Chen Y, Gmach D, Shah A, Rolia J and Bash C. Profiling sustainability of data centers. *IEEE 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)*, 2010.
- [3] Component reliability data for use in probabilistic safety assessment. *IEEE Gold Book*, 473, 2013.
- [4] Curtis A, Carpenter T, Elsheikh M, Lopez-Ortiz A and Keshav S. Rewire: An optimization based framework for unstructured data center network design. *In Proceedings of the 2012 IEEE INFOCOM*, 2012.
- [5] Dugan JB, Sullivan KJ and Coppit D. Developing a low-cost highquality software tool for dynamic fault-tree analysis. *IEEE Transactions on Reliability*, 2000.
- [6] Ellis R, Perre D, Latreche A, Hearnden J, Gajic L, Boonstra E and Hoxtell A. The green grid energy policy research for data centres: France, germany, the netherlands and the united kingdom. *In The Green Grid : White Paper 25*, 2009.
- [7] Gmach D, Chen Y, Shah A, Rolia J and Bash C. Profiling sustainability of data centers. *IEEE 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)*, 2010.
- [8] Herold K and Radermacher R. Integrated power and cooling systems for data centers. *In Proceedings of the Eighth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, 2002.
- [9] Herrlin MK. Rack cooling effectiveness in data centers and telecom central offices : The rack cooling index (rci). *ASHRAE Transaction*, 2005.
- [10] Hill MD. *The Datacenter as a Computer*. Morgan Calypool, 2009.
- [11] Kehren C. Motifs formels d'architectures de systèmes pour la sûreté de fonctionnement. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronotique et de l'Espace (SUPAERO).
- [12] Kloul L and Rauzy A. Production trees: a new modeling methodology for production availability analyses., *Reliability Engineering & System Safety* 167 (2017) 561–571.
- [13] Noble J, Taivalsaari A and Moore I. Prototype-based programming: Concepts, languages and applications, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg.
- [14] Patterson M. The effect of data center temperature on energy efficiency. *In Proceedings of the IThERM'08, 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, 2008.
- [15] Pitt Turner W, Seader JH and Brill KG. Tier classifications define site infrastructure performance. *Uptime Institute White Paper*.
- [16] Rauzy A. Guarded transition systems: a new states/events formalism for reliability studies. *Journal of Risk and Reliability*, 222 :495–505, 2008.
- [17] Sharma R.K, Shih R, Bash C, Patel C, Varghese P, Mekanapurath M, Velayudhan S, and Manu Kumar V. On building next generation data centers: Energy flow in the information technology stack. *In Proceedings of the 1st Bangalore Annual Compute Conference Compute '08*, 2008.
- [18] User's guide for the UNIRAM version 4.1 for Windows—availability assessment methodology, Availability Systems. 1996.
- [19] Wang X, Yao Y, Wang X, Lu K and Cao Q. Carpo : Correlation-aware power optimization in data center networks. *In Proceedings of the 2012 IEEE INFOCOM*, 2012.
- [20] Wei B, Lin C and Kong X. Dependability modeling and analysis for the virtual data center of cloud computing. *the IEEE 13th International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC)*, 2011.