

Rapport de projet

Étude et analyse d'un système de refroidissement de centre de données

Modélisation sous PyCATSHOO et analyse de scénarios dégradés

Auteurs

ECH-CHAFIY Soufiane
KNADEL Ayman

Encadrement

Hassane Chraïbi
Mohamed HIBTI

Date : 09/02/2026

Table des matières

1	Introduction	4
2	Le système étudié	5
2.1	Systèmes de refroidissement des centres de données (général)	5
2.2	Système retenu dans ce projet	7
2.3	Description du système étudié et rôle des composants	7
2.3.1	Salle informatique (IT Room)	8
2.3.2	Unité CRAC	8
2.3.3	Circuit d'eau réfrigérée	8
2.3.4	Chiller	8
2.3.5	Condenseur	8
2.3.6	Chaîne fonctionnelle	9
3	Modélisation du système sous PyCATSHOO	10
3.1	Principe PDMP	10
3.2	Description des classes	10
3.2.1	ITLoad	11
3.2.2	OutdoorAir	11
3.2.3	Condenser	12
3.2.4	ChillerPlant	12
3.2.5	CoolingDistribution	13
3.2.6	CRACRoom	14
3.2.7	ITRoom	14
3.3	Architecture du modèle	15
3.3.1	Chaîne fonctionnelle principale	15
3.3.2	Flux d'informations	16
4	Scénarios de simulation et résultats	17
4.1	Scénario nominal (sans canicule)	17
4.1.1	Hypothèses du scénario	17
4.1.2	Résultats	18

4.1.3	Conclusion	18
4.2	Scénario dégradé (avec canicule)	19
4.2.1	Hypothèses du scénario	19
4.2.2	Sous-scénario A : $Q_{nom} = 1200$ kW	19
4.2.3	Sous-scénario B : $Q_{nom} = 1600$ kW	20
4.2.4	Conclusion	21
5	Discussion sûreté	22
5.1	Influence des conditions environnementales	22
5.2	Rôle du dimensionnement	22
5.3	Effet des défaillances aléatoires	22
5.4	Limites et sensibilité du modèle	23
6	Conclusion et perspectives	24

Table des figures

2.1	Système de refroidissement d'un centre de données	7
3.1	Flux d'informations du modèle	16
4.1	Résultats du scénario nominal	18
4.2	Résultats du scénario dégradé A	19
4.3	Résultats du scénario dégradé B	20

Chapitre 1

Introduction

Les centres de données constituent aujourd’hui des infrastructures essentielles au fonctionnement des services numériques. Ils hébergent un grand nombre de serveurs informatiques chargés de traiter, stocker et transmettre des données en continu. Cette activité intensive entraîne une consommation électrique élevée, dont la quasi-totalité est convertie en chaleur. La maîtrise de cette chaleur est un enjeu majeur pour la sûreté de fonctionnement des centres de données. En l’absence d’un refroidissement adéquat, une élévation excessive de la température peut provoquer des dysfonctionnements des équipements électroniques, une dégradation du matériel, voire une interruption complète du service. Le système de refroidissement joue ainsi un rôle critique dans la disponibilité et la fiabilité globale du centre de données.

L’objectif de ce projet est d’étudier et d’analyser le comportement d’un système de refroidissement de centre de données, en particulier dans des situations dégradées telles que des conditions environnementales défavorables. L’analyse porte à la fois sur le fonctionnement nominal du système et sur les situations pouvant conduire à une perte de capacité de refroidissement.

Chapitre 2

Le système étudié

2.1 Systèmes de refroidissement des centres de données (général)

Les centres de données regroupent un grand nombre de serveurs informatiques dont le fonctionnement continu génère une quantité importante de chaleur. D'un point de vue énergétique, il est généralement admis que la quasi-totalité de l'énergie électrique consommée par les équipements informatiques est transformée en chaleur. Cette relation peut être exprimée de manière simplifiée par :

$$P_{\text{th}} \approx P_{\text{élec}} \quad (2.1)$$

Ainsi, pour une charge informatique de plusieurs centaines de kilowatts, la puissance thermique à évacuer est du même ordre de grandeur. Sans un système de refroidissement efficace, cette chaleur s'accumule rapidement et entraîne une élévation de la température de l'air dans la salle informatique.

Le rôle principal d'un système de refroidissement de centre de données est donc d'extraire cette chaleur et de la rejeter vers l'environnement extérieur, tout en maintenant la température des équipements dans une plage acceptable. Des organismes de référence tels que l'ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) recommandent généralement de maintenir la température d'entrée d'air des serveurs dans une plage comprise approximativement entre 18 °C et 27 °C, afin de garantir un fonctionnement sûr et fiable des équipements.

D'un point de vue physique, le refroidissement repose sur le transfert de chaleur entre différents milieux. La chaleur produite par les serveurs est d'abord transmise à l'air circulant dans la salle informatique. Cette quantité de chaleur transférée peut être exprimée par la relation classique :

$$Q = \dot{m} c_p \Delta T \quad (2.2)$$

où :

- Q est la puissance thermique échangée (en watts),
- \dot{m} est le débit massique d'air,
- c_p est la capacité thermique massique de l'air,
- ΔT est la différence de température entrée/sortie.

Cette relation montre que la capacité de refroidissement dépend directement du débit d'air et de la différence de température entre l'air entrant et sortant des équipements. Elle met en évidence l'importance de la circulation d'air, qui constitue un élément clé de tout système de refroidissement de centre de données.

De manière générale, les systèmes de refroidissement suivent une chaîne de transfert thermique en plusieurs étapes. La chaleur est d'abord transférée des serveurs vers l'air ambiant de la salle, puis de l'air vers un fluide de refroidissement (air extérieur, eau ou fluide frigorigène), avant d'être rejetée vers l'environnement extérieur. Ce principe peut être résumé par la chaîne suivante :

Serveurs \rightarrow Air de la salle \rightarrow Fluide de refroidissement \rightarrow Environnement extérieur

Il existe plusieurs architectures de refroidissement permettant de réaliser ce transfert thermique. Les systèmes les plus répandus reposent sur des unités de climatisation de salle informatique (CRAC), utilisant soit un circuit à expansion directe, soit un circuit à eau réfrigérée alimenté par une production centralisée de froid. D'autres solutions, telles que le refroidissement libre (*free cooling*) ou le refroidissement évaporatif, exploitent directement les conditions climatiques extérieures favorables afin de réduire la consommation énergétique.

Un indicateur couramment utilisé pour évaluer l'efficacité énergétique globale d'un centre de données est le *Power Usage Effectiveness* (PUE). Un système de refroidissement performant contribue directement à réduire le PUE en limitant l'énergie nécessaire à l'évacuation de la chaleur.

Ces différents systèmes répondent à des contraintes communes de sûreté, de performance et de disponibilité. Le choix d'une architecture de refroidissement dépend notamment de la taille du centre de données, de sa localisation géographique, de la densité de puissance des racks et des exigences de continuité de service. Il n'existe donc pas de solution universelle, mais un ensemble de technologies adaptées à différents contextes d'exploitation.

2.2 Système retenu dans ce projet

Parmi les différentes architectures de refroidissement utilisées dans les centres de données, le système retenu dans ce projet est un système de refroidissement mécanique basé sur des unités CRAC couplées à une production centralisée de froid par un chiller, tel que présenté dans le schéma associé.

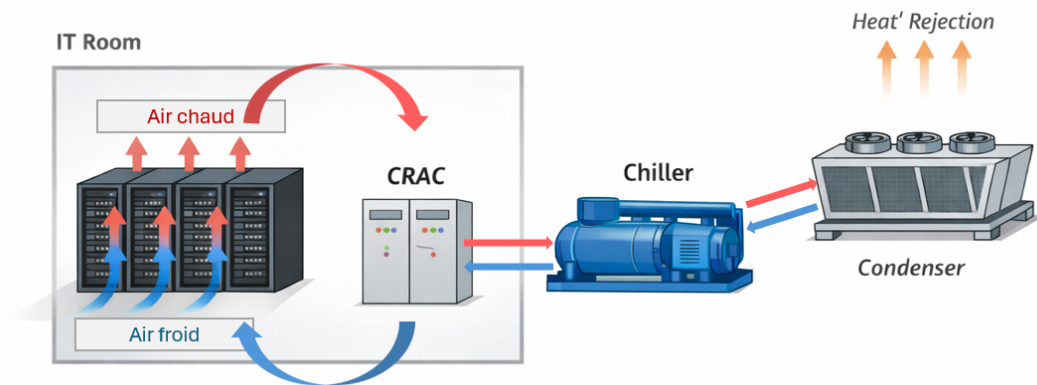


FIGURE 2.1 – Système de refroidissement d'un centre de données

Ce choix s'explique par le fait que ce type de système est largement répandu dans les centres de données de petite et moyenne taille et constitue une solution de référence dans de nombreuses installations existantes. Il s'agit d'une architecture bien maîtrisée sur le plan industriel, dont les principes de fonctionnement sont clairement identifiés.

Le système étudié repose sur une organisation fonctionnelle en plusieurs sous-ensembles distincts. Les unités CRAC assurent le traitement de l'air dans la salle informatique, tandis que le chiller est chargé de la production d'eau réfrigérée nécessaire au fonctionnement des serpentins de refroidissement. Le rejet final de la chaleur s'effectue vers l'environnement extérieur à travers le circuit de condensation.

Cette architecture permet une séparation claire entre la circulation de l'air dans la salle informatique et la production de froid, ce qui facilite l'identification des différents composants et de leurs rôles respectifs. Elle constitue ainsi une base adaptée pour une étude détaillée du fonctionnement et du comportement global du système de refroidissement.

2.3 Description du système étudié et rôle des composants

Le système de refroidissement étudié est constitué d'un ensemble de composants interconnectés assurant le transfert de la chaleur produite par les équipements informatiques

vers l'environnement extérieur. Chaque composant joue un rôle fonctionnel précis au sein de cette chaîne thermique.

2.3.1 Salle informatique (IT Room)

La salle informatique regroupe les équipements IT organisés en racks. Elle constitue la source de la charge thermique du système. La chaleur produite par les serveurs est transmise à l'air ambiant de la salle, qui devient le support initial du transfert thermique. La salle informatique représente ainsi l'élément à protéger, dont l'état dépend directement de la capacité du système de refroidissement à évacuer la chaleur produite.

2.3.2 Unité CRAC

L'unité CRAC assure le traitement thermique de l'air de la salle informatique. Elle met l'air en circulation à l'aide de ventilateurs et permet l'échange de chaleur entre l'air chaud et l'eau réfrigérée circulant dans les serpentins. Son rôle est de réduire la température de l'air avant sa redistribution vers les équipements IT. La performance de l'unité CRAC conditionne directement la capacité de refroidissement disponible dans la salle.

2.3.3 Circuit d'eau réfrigérée

Le circuit d'eau réfrigérée assure le transport de la chaleur extraite de l'air par les unités CRAC vers le système de production de froid. L'eau circule entre les CRAC et le chiller, en absorbant la chaleur au niveau des serpentins puis en la restituant au chiller. Ce circuit permet de découpler spatialement la salle informatique et la production de froid.

2.3.4 Chiller

Le chiller est responsable de la production d'eau réfrigérée. Il extrait la chaleur contenue dans l'eau de retour issue des unités CRAC et fournit une eau à basse température pour alimenter de nouveau les serpentins. Le chiller constitue l'élément central de la production de froid et conditionne la puissance frigorifique maximale disponible pour le système.

2.3.5 Condenseur

Le condenseur assure le rejet final de la chaleur vers l'environnement extérieur. Il reçoit la chaleur extraite par le chiller et la dissipe dans l'air ambiant extérieur, généralement à l'aide de ventilateurs. Son efficacité influence directement les performances globales du système, notamment lorsque les conditions extérieures sont défavorables.

2.3.6 Chaîne fonctionnelle

L'ensemble du système fonctionne selon une chaîne thermique continue reliant la source de chaleur aux conditions extérieures. La perte de performance ou la défaillance d'un composant de cette chaîne peut entraîner une réduction de la capacité globale de refroidissement et affecter l'état de la salle informatique.

Chapitre 3

Modélisation du système sous PyCATSHOO

3.1 Principe PDMP

La modélisation du système de refroidissement repose sur une approche permettant de représenter à la fois l'évolution continue des grandeurs physiques et l'occurrence d'événements discrets affectant le fonctionnement des composants. Ce comportement hybride est caractéristique des systèmes industriels réels.

Pour prendre en compte ces deux dynamiques, le système est modélisé à l'aide du formalisme PDMP (Piecewise Deterministic Markov Processes). Celui-ci combine des variables continues, décrivant les flux thermiques et les capacités de refroidissement, avec des états discrets représentant les modes de fonctionnement des composants et des lois probabilistes associées aux pannes et réparations.

Entre deux événements discrets, le système évolue selon des équations déterministes. Lorsqu'un événement survient, l'état du système est modifié, ce qui peut entraîner un changement du régime de fonctionnement.

3.2 Description des classes

Le modèle est construit sous forme de composants, chaque composant représentant un sous-ensemble fonctionnel du système de refroidissement. Les échanges entre composants sont réalisés via des variables partagées (entrées/sorties), ce qui permet de reproduire la chaîne fonctionnelle complète, depuis la sollicitation thermique jusqu'à la capacité finale de refroidissement.

3.2.1 ITLoad

La classe `ITLoad` modélise la charge thermique produite par les équipements informatiques. Elle fournit au reste du modèle une puissance thermique variable dans le temps, exprimée en kilowatts, représentant la sollicitation principale du système de refroidissement.

La charge est construite à partir d'une valeur moyenne autour de laquelle s'ajoutent deux variations périodiques :

- Un cycle principal de variation lente (par exemple jour/nuit),
- Une ondulation rapide représentant des fluctuations locales de charge.

La loi utilisée est la suivante :

$$\text{Load}(t) = L_0 \left(1 + a \sin \left(\frac{2\pi t}{P} \right) \right) + b L_0 \sin \left(\frac{2\pi t}{P_2} \right) \quad (3.1)$$

Où :

- L_0 est la charge moyenne,
- a et P sont l'amplitude et la période du cycle principal,
- b et P_2 sont l'amplitude et la période de l'ondulation rapide.

La valeur calculée est bornée entre une charge minimale et maximale afin de garantir un comportement physique cohérent.

La variable `load` est exportée via une *MessageBox* vers la classe `ITRoom`, où elle est utilisée pour comparer la demande thermique à la capacité de refroidissement disponible. Son évolution est gérée comme une variable continue PDMP, initialisée à la charge moyenne au démarrage de la simulation.

3.2.2 OutdoorAir

La classe `OutdoorAir` modélise l'évolution de la température extérieure, qui constitue une condition environnementale influençant les performances du système de refroidissement. Cette température est exprimée en degrés Celsius et fournie au reste du modèle comme une variable continue.

La température extérieure est construite à partir de deux contributions :

- Un cycle journalier sinusoïdal, représentant les variations normales jour/nuit,
- Un épisode de canicule, modélisé par une surélévation temporaire de température avec montée et descente progressives.

Le modèle thermique utilisé est :

$$T_{\text{out}} = T_0 + A \sin \left(\frac{2\pi t}{P} \right) + \omega(t) \Delta T \quad (3.2)$$

Où $\omega(t)$ est un coefficient compris entre 0 et 1, décrivant la phase de la canicule

(montée, plateau ou descente).

Les paramètres permettent de définir :

- La température moyenne et l’amplitude journalière,
- Le début et la fin de la canicule,
- L’intensité maximale de la surélévation,
- La durée des transitions (rampe).

La température calculée est bornée entre des valeurs minimale et maximale afin de garantir un comportement physique cohérent.

La variable `Tout` est exportée via une *MessageBox* vers la classe `Condenser`, où elle est utilisée pour évaluer l’efficacité du rejet de chaleur. Elle est gérée comme une variable continue PDMP et initialisée à la température moyenne au démarrage de la simulation.

3.2.3 Condenser

La classe `Condenser` modélise le système de rejet de chaleur du circuit frigorifique. Son rôle est de traduire l’influence de la température extérieure sur l’efficacité avec laquelle la chaleur peut être dissipée vers l’environnement.

La classe reçoit en entrée la température extérieure `Tout` et fournit en sortie un facteur d’efficacité thermique noté η , compris entre 0 et 1. Ce facteur représente la capacité du condenseur à rejeter la chaleur dans les conditions climatiques courantes.

Le comportement thermique est modélisé de manière simple :

$$\eta(T_{\text{out}}) = \begin{cases} 1; & T_{\text{out}} < T_{\text{nom}} \\ 1 - k (T_{\text{out}} - T_{\text{nom}}); & T_{\text{nom}} < T_{\text{out}} < T_{\text{crit}} \\ \eta_{\text{min}}; & T_{\text{out}} > T_{\text{crit}} \end{cases} \quad (3.3)$$

Cette loi permet de représenter la dégradation progressive des performances du condenseur lorsque les conditions climatiques deviennent défavorables.

La classe intègre également un automate de fiabilité à deux états (OK / KO). Les transitions de panne et de réparation sont modélisées par des lois exponentielles, caractérisées par des taux de défaillance et de réparation. Lorsque le condenseur est en état KO, son efficacité est considérée comme nulle.

La variable η est gérée comme une variable continue PDMP et est transmise au chiller via une *MessageBox*. Elle conditionne directement la capacité de production de froid du système.

3.2.4 ChillerPlant

La classe `ChillerPlant` modélise la production centralisée de froid assurée par le chiller. Elle fournit la puissance frigorifique disponible pour le reste du système, exprimée en

kilowatts.

Le chiller reçoit en entrée un facteur d'efficacité η provenant du condenseur. Cette efficacité traduit les conditions de rejet de chaleur vers l'extérieur et influence directement la capacité de production de froid.

Le modèle thermique est volontairement simple :

- Lorsque le chiller est en état fonctionnel, la puissance produite est proportionnelle à l'efficacité reçue :

$$Q_{\text{ch}}(t) = \eta \times Q_{\text{nom}} \quad (3.4)$$

- Lorsque le chiller est en panne, aucune puissance frigorifique n'est produite.

La classe intègre un automate de fiabilité à deux états (OK / KO). Les transitions de panne et de réparation sont modélisées par des lois exponentielles, ce qui permet de représenter l'indisponibilité aléatoire du chiller.

La variable $Q_{\text{ch}}(t)$ est gérée comme une variable continue PDMP et est exportée via une *MessageBox* vers la classe `CoolingDistribution`, où elle représente la puissance frigorifique effectivement disponible pour la distribution du froid.

3.2.5 CoolingDistribution

La classe `CoolingDistribution` modélise la distribution du froid entre la production centralisée (chiller) et les unités de refroidissement en salle. Elle représente de manière globale les effets du réseau de distribution, tels que les pompes, les pertes et les limitations de transport.

Elle reçoit en entrée la puissance frigorifique produite par le chiller (Q_{ch}) et fournit en sortie la puissance effectivement distribuée aux unités en salle (Q_{dist}).

Le modèle utilisé est simple :

- Lorsque le système de distribution est fonctionnel, la puissance distribuée est proportionnelle à la puissance produite :

$$Q_{\text{dist}}(t) = \eta_{\text{dist}} \times Q_{\text{ch}}(t) \quad (3.5)$$

- Lorsque le système est en panne, aucune puissance n'est transmise.

η_{dist} représente l'efficacité globale de la distribution.

La classe intègre un automate de fiabilité à deux états (OK / KO). Les pannes et réparations sont modélisées par des lois exponentielles, permettant de représenter l'indisponibilité aléatoire du réseau de distribution.

La variable $Q_{\text{dist}}(t)$ est traitée comme une variable continue PDMP et est exportée via une *MessageBox* vers la classe `CRACRoom`, où elle est utilisée pour calculer la capacité de refroidissement disponible dans la salle.

3.2.6 CRACRoom

La classe CRACRoom modélise l'ensemble des unités CRAC/CRAH installées dans la salle informatique, en intégrant explicitement une architecture redondante de type N+1. Elle reçoit la puissance frigorifique distribuée (Q_{dist}) et fournit en sortie la capacité de refroidissement réellement disponible dans la salle (Q_{room}).

Le comportement thermique repose sur le nombre d'unités disponibles N_{ok} par rapport au nombre d'unités nécessaires N_{required} :

- Lorsque le nombre d'unités disponibles est suffisant, la capacité de refroidissement est nominale,
- Lorsque ce nombre devient insuffisant, la capacité est dégradée proportionnellement.

Le modèle de capacité est :

$$Q_{\text{room}} = \begin{cases} \eta_{\text{CRAC}} \times Q_{\text{dist}}; & N_{\text{ok}} > N_{\text{required}} \\ \eta_{\text{CRAC}} \times Q_{\text{dist}} \times \frac{N_{\text{ok}}}{N_{\text{required}}}; & N_{\text{ok}} < N_{\text{required}} \end{cases} \quad (3.6)$$

La disponibilité des unités CRAC est représentée par un automate discret multi-états décrivant le nombre d'unités opérationnelles, de zéro jusqu'au nombre total installé. Les transitions entre états correspondent à des pannes ou des réparations d'unités, modélisées par des lois exponentielles, identiques pour chaque unité.

La variable Q_{room} est traitée comme une variable continue PDMP, tandis que le nombre d'unités disponibles est géré par l'automate discret. La capacité de refroidissement fournie à la salle dépend ainsi à la fois de la puissance distribuée et de la redondance effective des unités CRAC.

3.2.7 ITRoom

La classe ITRoom représente la salle informatique du point de vue performance et sûreté. Elle compare en permanence la demande thermique, fournie par la classe ITLoad, à la capacité de refroidissement disponible issue de la classe CRACRoom.

Le critère de sûreté repose sur une comparaison simple entre l'offre et la demande :

- La salle est considérée en état OK tant que la capacité de refroidissement est suffisante,
- Elle bascule en état KO lorsque la capacité devient insuffisante.

La condition de défaillance est définie par :

$$Q_{\text{room}} < \text{margin} \times \text{load} \quad (3.7)$$

où :

- *load* : la charge thermique produite par les équipements IT, calculée par la classe ITLoad,
- Q_{room} : la capacité de refroidissement disponible dans la salle,
- *margin* : un coefficient de sécurité permettant d'introduire une marge entre l'offre et la demande.

La classe calcule également une variable de diagnostic appelée *balance*, correspondant à la différence entre la capacité de refroidissement et la demande pondérée par la marge. Cette variable permet de suivre l'état thermique de la salle au cours du temps.

Le comportement de la salle est représenté par un automate de sûreté à deux états (OK / KO). La transition vers l'état KO correspond à l'événement redouté étudié dans le projet.

3.3 Architecture du modèle

Le modèle PyCATSHOO est structuré de manière modulaire, chaque classe représentant un sous-système fonctionnel du système de refroidissement. L'architecture globale suit la chaîne physique réelle de transfert de chaleur, depuis la production de la charge thermique jusqu'à l'évaluation de la sûreté de la salle informatique.

3.3.1 Chaîne fonctionnelle principale

L'architecture du modèle repose sur la chaîne fonctionnelle suivante :

ITLoad \rightarrow ITRoom

OutdoorAir \rightarrow Condenser \rightarrow ChillerPlant \rightarrow CoolingDistribution \rightarrow CRACRoom \rightarrow ITRoom

Cette organisation permet de séparer clairement :

- la génération de la charge thermique,
- la production et la distribution du froid,
- l'évaluation finale de la sûreté.

3.3.2 Flux d'informations

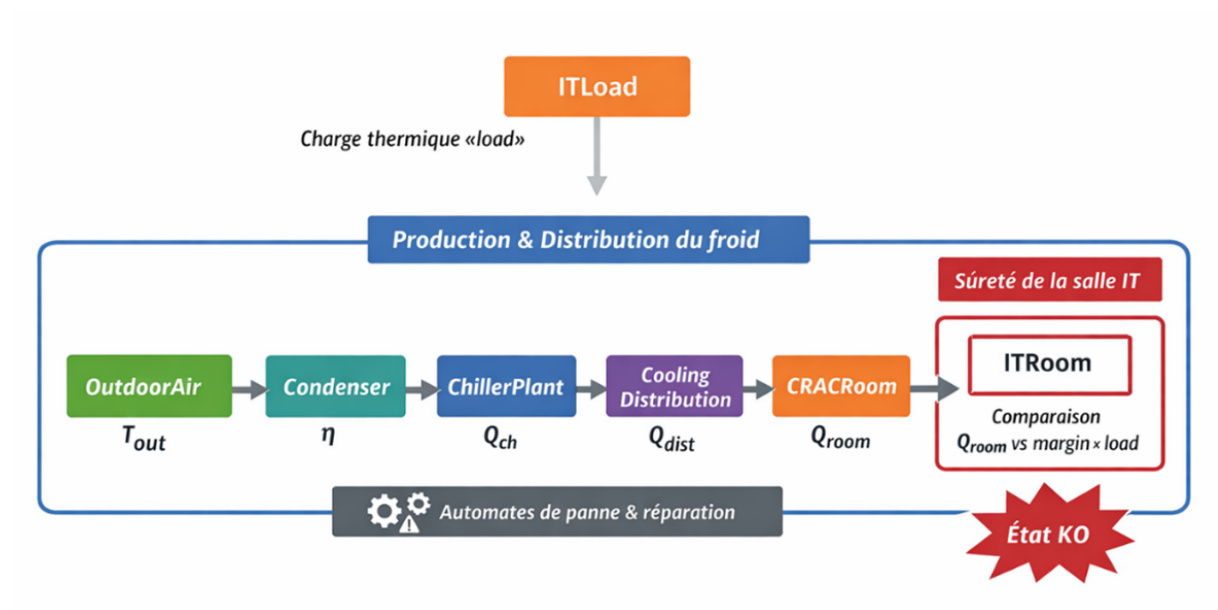


FIGURE 3.1 – Flux d'informations du modèle

Chapitre 4

Scénarios de simulation et résultats

4.1 Scénario nominal (sans canicule)

Le scénario nominal correspond au fonctionnement du système dans des conditions environnementales normales, c'est-à-dire sans épisode de canicule. L'objectif est d'observer le comportement du modèle lorsque le système n'est pas soumis à une contrainte extérieure extrême, et de vérifier que la chaîne de refroidissement est capable de répondre à la charge thermique imposée.

4.1.1 Hypothèses du scénario

Dans ce scénario, la température extérieure suit uniquement le cycle journalier défini dans la classe `OutdoorAir`, sans activation de la surélévation liée à la canicule. La charge informatique varie selon le profil temporel défini par la classe `ITLoad` (cycle principal + ondulation). Les composants susceptibles de tomber en panne conservent leurs lois de défaillance et de réparation, ce qui permet de représenter un fonctionnement réaliste même en conditions nominales.

4.1.2 Résultats

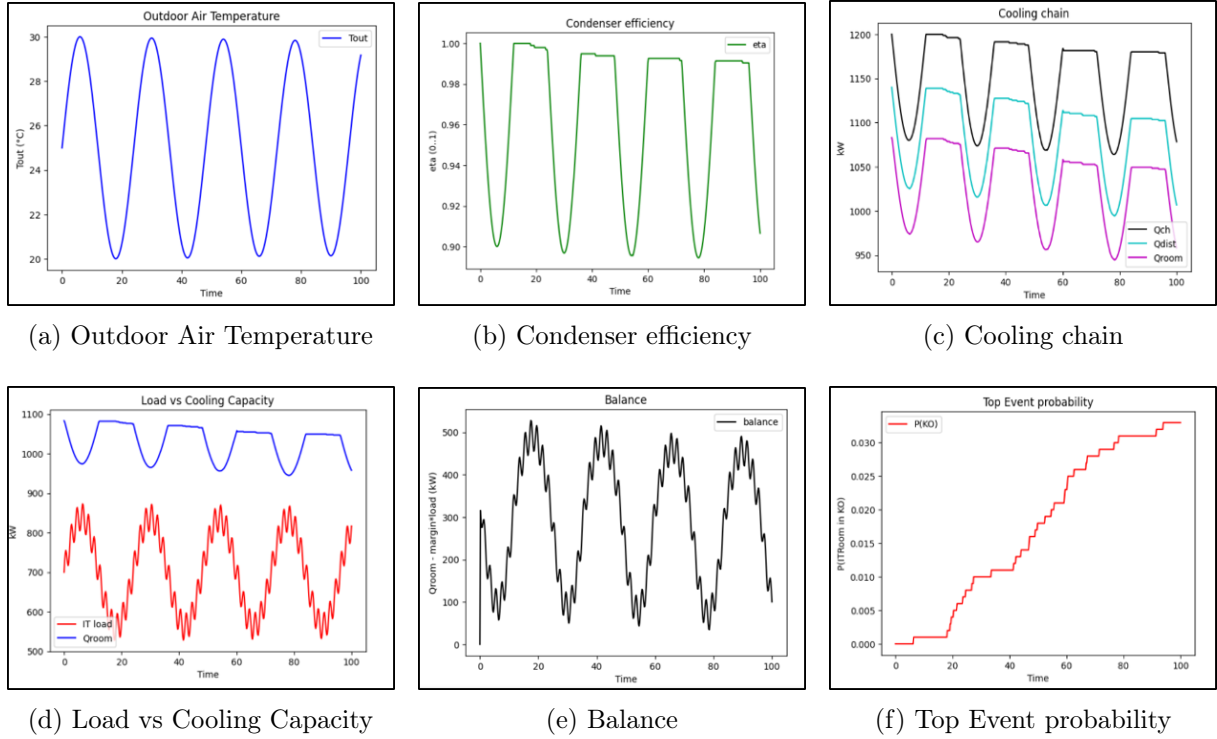


FIGURE 4.1 – Résultats du scénario nominal

La température extérieure évolue de manière périodique entre des valeurs modérées, correspondant à des conditions climatiques normales. Cette variation entraîne une légère fluctuation de l'efficacité du condenseur, qui reste proche de sa valeur nominale sur l'ensemble de la simulation.

La chaîne de refroidissement (production, distribution et refroidissement en salle) suit cette dynamique sans rupture. La puissance frigorifique produite diminue progressivement le long de la chaîne, mais reste stable et suffisante pour alimenter la salle informatique.

La comparaison entre la charge thermique des équipements IT et la capacité de refroidissement disponible montre que Q_{room} reste toujours supérieure à la charge. Le système est donc capable d'absorber les variations de charge sans perte de performance.

La balance thermique reste positive sur toute la durée de la simulation, ce qui confirme que le système fonctionne avec une marge suffisante.

La probabilité de l'événement redouté (état KO de la salle) demeure très faible, avec une augmentation lente liée uniquement aux défaillances aléatoires possibles des composants.

4.1.3 Conclusion

En conditions nominales, le système de refroidissement assure correctement sa fonction. La salle informatique reste dans un état sûr, ce qui valide le dimensionnement et le

comportement global du modèle en régime normal.

4.2 Scénario dégradé (avec canicule)

4.2.1 Hypothèses du scénario

Dans les deux cas, toutes les hypothèses et tous les paramètres du modèle sont identiques, la canicule est activée : la température extérieure augmente fortement, ce qui dégrade l'efficacité du condenseur (η) et réduit la puissance frigorifique disponible sur toute la chaîne ($Q_{ch} \rightarrow Q_{dist} \rightarrow Q_{room}$). Le seul paramètre modifié entre les deux cas est la capacité nominale du chiller Q_{nom} , afin d'isoler son impact sur la capacité de refroidissement et sur l'apparition de l'état KO.

4.2.2 Sous-scénario A : $Q_{nom} = 1200$ kW

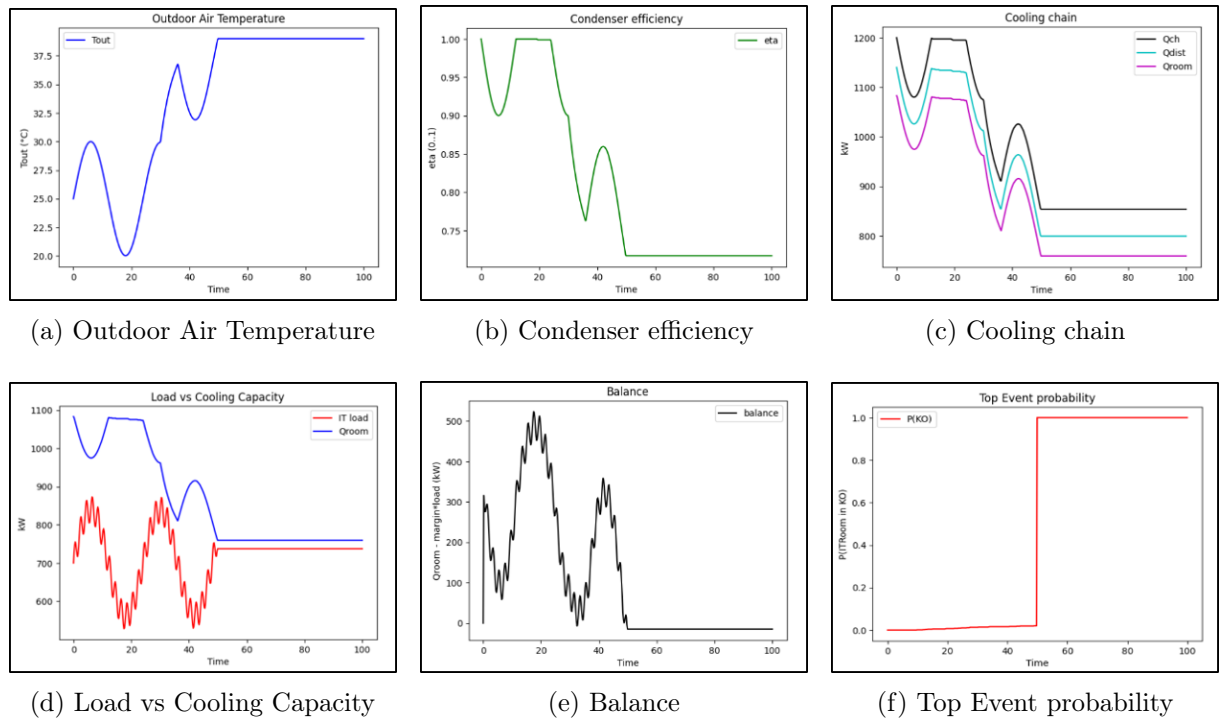


FIGURE 4.2 – Résultats du scénario dégradé A

Résultats observés

- Pendant la canicule, T_{out} atteint un niveau élevé et η chute jusqu'à sa valeur minimale.
- La chaîne de refroidissement s'effondre partiellement : Q_{ch} , puis Q_{dist} et Q_{room} diminuent nettement.

- Sur le graphe *Load vs Q_{room}* , on voit que Q_{room} devient inférieur à la charge IT autour de la période critique.
- La balance devient négative puis reste proche de zéro/négative : la capacité n'est plus suffisante.
- La probabilité du top event $P(KO)$ saute brutalement et atteint 1 : le système bascule en KO et y reste.

Interprétation

Avec $Q_{nom} = 1200$ kW, la marge de dimensionnement est insuffisante : lorsque l'efficacité du rejet se dégrade fortement, la capacité de refroidissement en salle n'arrive plus à suivre la demande, ce qui entraîne l'événement redouté (KO).

4.2.3 Sous-scénario B : $Q_{nom} = 1600$ kW

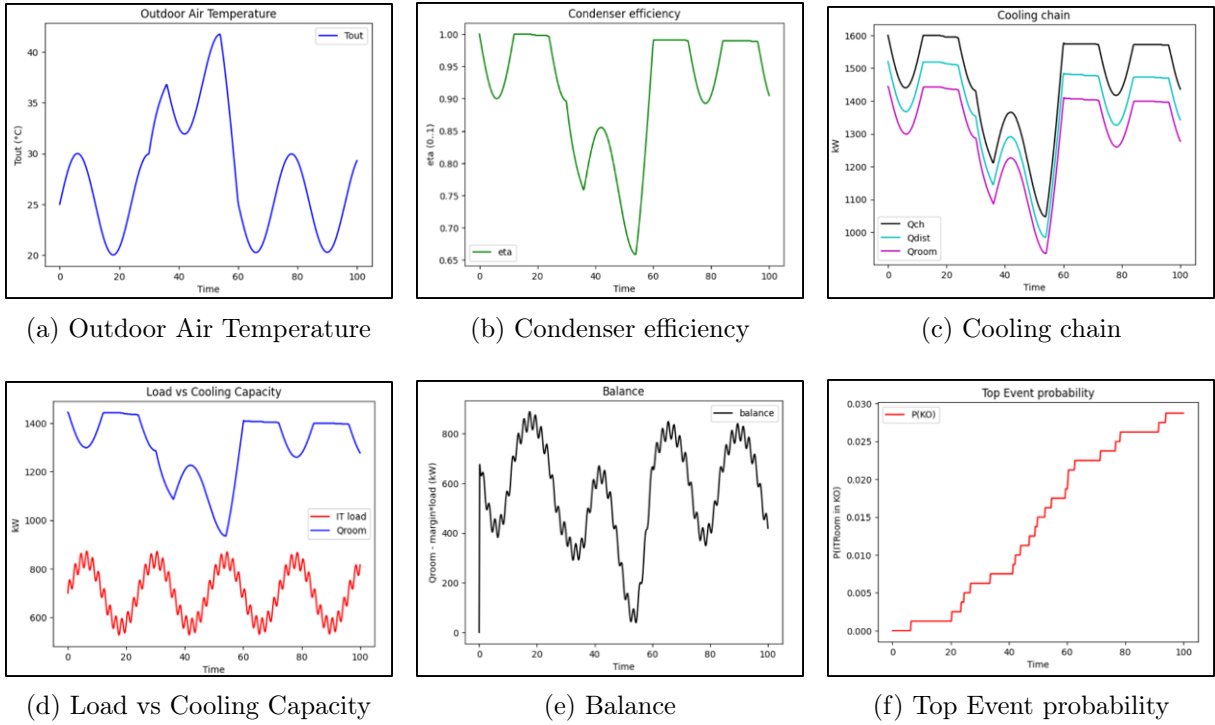


FIGURE 4.3 – Résultats du scénario dégradé B

Résultats observés

- La canicule provoque aussi une baisse de η , donc une dégradation visible de $Q_{ch}/Q_{dist}/Q_{room}$.
- Cependant, Q_{room} reste globalement au-dessus de la charge IT, même au moment le plus défavorable.
- La balance diminue fortement (dégradation), mais ne bascule pas durablement en négatif.

- La probabilité $P(\text{KO})$ reste faible (quelques pourcents) et ne s’emballe pas : pas de KO global sur la simulation.

Interprétation

Avec $Q_{\text{nom}} = 1600 \text{ kW}$, le chiller dispose d’une réserve suffisante pour compenser la dégradation du condenseur. Le système subit une baisse de performance pendant la canicule, mais conserve une capacité de refroidissement suffisante pour éviter l’événement redouté.

4.2.4 Conclusion

Ces deux sous-scénarios illustrent que, à paramètres identiques, la variation de Q_{nom} modifie fortement le comportement du système sous canicule. Toutefois, le résultat global reste dépendant de l’ensemble des paramètres fixés (conditions extérieures, charge IT, rendements, pertes et fiabilité), qui déterminent la marge réelle de fonctionnement.

Chapitre 5

Discussion sûreté

L'analyse des scénarios de simulation met en évidence le rôle central du système de refroidissement dans la sûreté de fonctionnement de la salle informatique. L'événement redouté étudié correspond à une situation dans laquelle la capacité de refroidissement disponible devient insuffisante par rapport à la charge thermique des équipements IT.

5.1 Influence des conditions environnementales

Les résultats montrent que les conditions climatiques extérieures ont un impact direct sur la sûreté du système. L'augmentation de la température extérieure dégrade l'efficacité du condenseur, ce qui réduit progressivement la capacité de production de froid. En situation de canicule, cette dégradation peut conduire à une insuffisance de refroidissement, même en l'absence de défaillance matérielle.

5.2 Rôle du dimensionnement

Le dimensionnement des composants, en particulier la capacité nominale du chiller, apparaît comme un facteur déterminant. Les simulations montrent qu'un dimensionnement insuffisant conduit rapidement à l'événement redouté lorsque le système est soumis à une contrainte climatique sévère. À l'inverse, une capacité nominale plus élevée permet d'absorber la dégradation des performances sans basculement en état KO.

5.3 Effet des défaillances aléatoires

Même en conditions nominales, les lois de défaillance et de réparation introduisent une probabilité non nulle d'indisponibilité des composants. Cependant, lorsque le système est correctement dimensionné, l'impact de ces défaillances reste limité. En situation dégradée, ces événements aléatoires peuvent en revanche accélérer l'apparition de l'événement

redouté.

5.4 Limites et sensibilité du modèle

Les résultats obtenus dépendent fortement des paramètres fixés dans le modèle, tels que les rendements, les seuils thermiques, les profils de charge et les paramètres de fiabilité. Le choix de faire varier un paramètre à la fois permet d'identifier son influence, mais souligne également la nécessité d'analyses de sensibilité plus approfondies pour une évaluation complète de la sûreté.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

Ce travail a permis d'étudier le comportement d'un système de refroidissement de centre de données à travers une approche de modélisation et de simulation. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence conjointe des conditions d'exploitation et des choix de conception sur la sûreté du système. L'étude souligne l'importance d'une analyse globale intégrant à la fois les sollicitations opérationnelles et les situations dégradées afin d'assurer la continuité de service des centres de données.