

Diplôme national de master

Domaine – sciences humaines et sociales

Mention – sciences de l'information et des bibliothèques

Parcours – archives numériques

Les centres de données : facteurs et stratégies pour l'efficacité énergétique

Tom BARTHÉLÉMY

Sous la direction de Pascal Robert

Professeur des universités et co-responsable du Master 2 Archives numériques de l'École nationale supérieure des sciences de l'information et des bibliothèques

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Pascal Robert, directeur de ce mémoire de recherche, professeur des universités et co-responsable du Master 2 Archives numériques de l'École nationale supérieure des sciences de l'information et des bibliothèques, pour son accompagnement et ses conseils avisés pour la construction de ce mémoire de recherche.

Je remercie les personnes interrogées, Benoît Delaunay du Centre de calcul de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules, Wayne Salter et Anna Cook de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, ainsi que Dimitri Picasso d'Infomaniak pour leur disponibilité et les données transmises qui ont permis d'enrichir ce mémoire de recherche.

Je souhaite remercier les professeurs du Master 2 Archives numériques de l'École nationale supérieure des sciences de l'information et des bibliothèques pour la qualité de leurs enseignements.

Enfin, je remercie également mes proches pour leur soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire de recherche.

Résumé : Infrastructures physiques massives et énergivores, les centres de données sont devenus indispensables à la circulation, au stockage et au traitement des données qui structurent nos sociétés contemporaines. Confrontés à une pluralité d'enjeux, les responsables de centres de données mettent en place des stratégies visant à optimiser leur consommation d'énergie. Ce mémoire de recherche retrace l'évolution historique des centres de données et explore leurs dimensions géopolitiques avant d'analyser les facteurs qui les orientent vers cette recherche d'efficacité énergétique. Ce travail s'appuie sur une enquête qualitative menée auprès d'interlocuteurs-clés du terrain. Enfin, les stratégies concrètes d'efficacité énergétique mises en œuvre font l'objet d'une étude approfondie.

Descripteurs : Centre de données, Données, Efficacité énergétique, Stratégie

Abstract: As massive, energy-hungry physical infrastructures, data centers have become essential to the flow, storage, and processing of the data that underpin our contemporary societies. Confronted with several challenges, data centers managers are implementing strategies aimed at optimizing their energy consumption. This dissertation outlines the historical development of data centers and explores their geopolitical dimensions, before analysing the factors behind their drive for energy efficiency. This work is based on a qualitative survey conducted with key players in the field. Finally, the concrete energy efficiency strategies implemented are examined in depth.

Keywords: Data; Data center; Energy efficiency; Strategy

Droits d'auteur réservés.

Toute reproduction sans accord exprès de l'auteur à des fins autres que strictement personnelles est prohibée.
--

Sommaire

REMERCIEMENTS.....	
SOMMAIRE	
SIGLES ET ABREVIATIONS	
INTRODUCTION.....	1
I. COMPRENDRE LES CENTRES DE DONNEES	5
1.1 Introduction aux centres de données	5
1.1.1. Histoire et évolution	5
1.1.2. Rôle et importance dans le réseau informatique	8
1.1.3. Typologies et classification	10
1.2 La dimension géopolitique	15
1.2.1 Les logiques d'implantation	15
1.2.2 Les acteurs	19
1.2.3 Les conflits	22
1.3 La gestion de données.....	23
1.3.1 Le stockage de données.....	24
1.3.2 Le réseau interne	29
1.4 L'impact environnemental	31
1.4.1 Le cycle de vie	31
1.4.2 Les principaux impacts	32
II. ENJEUX ET MOTIVATIONS DES CENTRES DE DONNEES EN	
MATIERE D'EFFICIENCE ENERGETIQUE	35
2.1 Le cadre réglementaire.....	37
2.1.1 Le cadre juridique	38
2.1.2 Le cadre normatif.....	39
2.1.3 Son application dans les organisations étudiées	40
2.2 Les initiatives autonomes	42

2.3 La crise énergétique	46
2.4 La recherche et le développement.....	49
2.5 Les enjeux réputationnels	50
2.6 Conclusion de l'enquête	52
III. STRATEGIES D'EFFICIENCE ENERGETIQUE DES CENTRES DE DONNEES	53
3.1 La production et l'approvisionnement en énergie	54
3.1.1 L'intégration des énergies renouvelables	54
3.1.2 L'autoproduction d'énergie nucléaire	60
3.2 L'optimisation de la consommation énergétique	62
3.2.1 Le refroidissement des serveurs	63
3.2.2 La virtualisation	71
3.2.3 Les supports de stockage.....	72
3.3 La valorisation de l'énergie thermique	73
3.3.1 Le chauffage urbain.....	73
3.3.2 Les projets de recherche	75
CONCLUSION	77
SOURCES.....	
BIBLIOGRAPHIE.....	
ANNEXES.....	
TABLE DES ILLUSTRATIONS	
TABLE DES MATIERES.....	

Sigles et abréviations

BaaS : *Back-up as a Service* (Sauvegarde à la demande)

BESS : *Battery Energy Storage System* (Système de stockage d'énergie par batterie)

CC-IN2P3 : Centre de calcul de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

CERN : Organisation européenne pour la recherche nucléaire

CNIL : Commission nationale de l'informatique et des libertés

DRaaS : *Disaster Recovery as a Service* (Reprise d'activités à la demande)

ENIAC : *Electronic Numerical Integrator and Computer* (Intégrateur et Calculateur Numérique Électronique)

Enssib : École nationale supérieure des sciences de l'information et des bibliothèques

EPFL : École polytechnique fédérale de Lausanne

GAFAM : Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft

IaaS : *Infrastructure as a Service* (Infrastructure à la demande)

IN2P3 : Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

ISO : Organisation internationale de normalisation

LAN : *Local Area Network* (Réseau local)

LHC : *Large Hadron Collider* (Grand collisionneur de hadrons)

PaaS : *Platform as a Service* (Plateforme à la demande)

PC : *Personal Computer* (Ordinateur personnel)

RAID : *Redundant Array of Independent Disks* (Regroupement redondant de disques indépendants)

RGPD : Règlement général sur la protection des données

SaaS : *Software as a Service*

SAN : *Storage Area Network*

SMR : *Small Modular Reactors* (Petits réacteurs nucléaires modulaires)

SSD : *Solid-State Drive*

UPS : *Uninterruptible Power Supplies* (Alimentation sans interruption)

INTRODUCTION

En 1999, le magazine économique *Forbes* publiait un article, coécrit par Peter Huber et Mark Mills, intitulé *Dig more coal—the PCs are coming* (Extrayez plus de charbon : les PC arrivent [traduction libre]). L'objectif de cet article est de remettre en question l'idée largement répandue selon laquelle l'utilisation des ordinateurs personnels et plus globalement celle d'Internet réduirait la consommation énergétique des États-Unis, notamment dans des secteurs-clés comme le transport, le système bancaire ou encore la santé. À l'époque, près de la moitié de l'infrastructure du réseau électrique du pays est au service de deux technologies anciennes : l'ampoule électrique et le moteur électrique. Cette situation laisse présager une croissance quasi nulle pour l'industrie de l'électricité. Dans le même temps, des millions d'ordinateurs sont fabriqués par des leaders technologiques tels qu'IBM et environ 200 milliards de microprocesseurs sont produits chaque année, nécessitant chacun une alimentation électrique continue pour pouvoir fonctionner. Bien que chaque nouvelle génération de microprocesseurs soit toujours plus efficace que la précédente, l'évolution de la demande en puissance de calcul tend à dépasser les gains d'efficacité énergétique, ce qui entraîne une augmentation constante et inexorable de la consommation énergétique. Pour chaque appareil électronique posé sur un bureau, plusieurs autres équipements sont disséminés dans le réseau informatique : serveurs, routeurs, commutateurs, câbles terrestres et sous-marins, etc. Derrière l'essor du numérique, c'est une infrastructure matérielle colossale et énergivore qui se développe¹.

Les auteurs se demandent alors si le modèle numérique ne réduit pas la demande énergétique dans d'autres domaines. C'est le cas dans celui des transports où la demande en hydrocarbures stagne, vraisemblablement grâce à l'essor du télétravail et du courrier électronique. Cependant, la demande en électricité ne faiblit pas, elle-même produite à partir d'énergies fossiles ainsi que d'uranium enrichi, et dans une moindre mesure par l'hydroélectricité et le gaz. « *About 1 pound of coal to create,*

¹ Peter Huber et Mark Mills, « *Dig more coal—the PCs are coming* ». *Forbes*, 31 mai 1999. Consulté le 25 août 2025, <https://www.forbes.com/forbes/1999/0531/6311070a.html>.

*package, store and move 2 megabytes of data*² » (Environ 450 grammes de charbon sont nécessaires pour créer, conditionner, conserver et transmettre 2 mégaoctets de données [traduction libre]). Les auteurs concluent que, contrairement aux prédictions de futuristes qui imaginaient un monde dominé par des autoroutes de l'information et des câbles de fibre optique, une infrastructure énergétique massive composée de trains chargés de charbon et de lignes électriques à haute tension demeure indispensable³.

Ce constat sur la dépendance énergétique du numérique reste toujours d'actualité. À mesure que le monde numérique poursuit son expansion à un rythme effréné, sa consommation énergétique va de pair. Chaque jour, un volume important de données est produit, environ 5 exaoctets de données, c'est-à-dire l'équivalent de 5 milliards de gigaoctets, « soit autant que toutes celles produites depuis les débuts de l'informatique jusqu'en 2003 »⁴. De plus, le numérique consomme environ 10 % de l'électricité mondiale, soit l'équivalent de la production de 100 réacteurs nucléaires⁵. Le Sommet pour l'action sur l'intelligence artificielle, qui s'est tenu à Paris en février 2025, a été marqué par l'annonce d'investissements à la hauteur de 100 milliards d'euros dans les années à venir en France afin de construire de nouveaux centres de données destinés à l'intelligence artificielle⁶. Ce plan d'investissement vise à rivaliser avec le projet Stargate qui a pour but d'investir 500 milliards de dollars américains afin de financer sur le sol états-unien des projets également liés à l'intelligence artificielle et à la construction de nouveaux centres de données⁷.

Cependant, l'impact environnemental du numérique reste un défi majeur. Alors que Peter Huber et Mark Mills, les co-auteurs de l'article publié dans *Forbes*,

² Peter Huber et Mark Mills, « *Dig more coal—the PCs are coming* ». *Forbes*, 31 mai 1999. Consulté le 25 août 2025, <https://www.forbes.com/forbes/1999/0531/6311070a.html>.

³ *Ibid.*

⁴ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

⁵ *Ibid.*

⁶ Damien Licata Caruso, « *Sommet de l'IA : Macron appelle à un sursaut européen et à une stratégie d'action à Notre-Dame de Paris* ». *Le Parisien*, 10 février 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.leparisien.fr/high-tech/sommet-de-lia-macron-appelle-a-un-sursaut-europeen-et-a-une-strategie-daction-a-la-notre-dame-de-paris-10-02-2025-QCR6LLSX5BFBKVLQR5CZXVCKM.php>.

⁷ Damien Licata Caruso, « *Intelligence artificielle : Stargate, l'intrigant projet pharaonique des États-Unis à 500 milliards de dollars* ». *Le Parisien*, 22 janvier 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.leparisien.fr/high-tech/stargate-le-nouveau-projet-fou-des-etats-unis-quatre-questions-pour-tout-comprendre-22-01-2025-C3EKYARKLRDHTNHIZAK7NCETUM.php>.

soulignaient des efforts minces, voire inexistants, sur l'efficacité énergétique, ce sujet est désormais central. Également appelée efficacité énergétique, l'efficacité énergétique peut être définie comme « *the fraction of input power delivered to the IT load*⁸ » (la part d'énergie fournie aux équipements informatiques [traduction libre]), ou encore comme « le rapport entre les résultats, le service, la marchandise ou l'énergie que l'on obtient et l'énergie consacrée à cet effet⁹ ». Les annonces de géants du Web comme Microsoft, Apple ou Facebook se multiplient en faveur de solutions innovantes. Les centres de données, autrefois relégués dans des armoires techniques au sein des bureaux d'entreprises, se sont métamorphosés en de gigantesques infrastructures gérées par une poignée d'entreprises qui traitent, stockent et distribuent de grandes quantités de données¹⁰. Alors que le numérique est responsable de près de 4 % des émissions de dioxyde de carbone à l'échelle mondiale¹¹, les centres de données en constituent actuellement 16 %, une proportion qui pourrait atteindre 42 % à l'avenir¹². Face à de multiples enjeux, ces derniers sont engagés dans une course à l'efficacité énergétique.

Cette tension entre l'essor exponentiel du numérique, les activités des centres de données et leurs efforts en matière d'efficacité énergétique soulève une question centrale qui sera le fil directeur de ce mémoire de recherche dans le domaine des sciences de l'information : quels facteurs poussent les centres de données à investir dans les stratégies d'efficacité énergétique ?

Ce mémoire de recherche est structuré en trois grandes parties. Nous commencerons par mobiliser des concepts-clés pour appréhender la notion de centre de données et nous faire une représentation concrète de cette infrastructure. Nous analyserons leur importance croissante dans nos sociétés, leur implantation géographique, leur

⁸ Miyuru Dayarathna, Yonggang Wen, et Rui Fan, « Data Center Energy Consumption Modeling: A Survey », *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18, no. 1 (2016): 733. Consulté le 25 août 2025, <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2481183>.

⁹ Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, *Directive 2012/27/UE du Parlement européen et du Conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique*, Journal officiel de l'Union européenne L 315 (14 novembre 2012). Consulté le 25 août 2025, <http://data.europa.eu/eli/dir/2012/27/oj>.

¹⁰ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

¹¹ *Ibid.*

¹² Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, « *Avis d'experts - Les data centers ou centres de données* ». ADEME, 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://librairie.ademe.fr/ged/9341/Avis-Data-Centers-Centre-de-Donnees-2024.pdf>.

architecture ainsi que la manière dont les données sont stockées. Nous nous appuierons principalement sur les travaux de Guillaume Pitron et de Hwaiyu Geng pour répondre à ces questions. Des visites de centres de données et une étude de la littérature viendront compléter cette première approche.

Dans un deuxième temps, nous procéderons à une enquête qualitative auprès de responsables de centres de données afin de comprendre les raisons qui les poussent à investir dans l'efficacité énergétique. Cette enquête vise à déterminer si ces investissements répondent uniquement à une contrainte réglementaire, à un objectif économique, à un impératif environnemental ou s'ils relèvent également d'autres motivations.

Enfin, nous nous concentrerons sur les solutions mises en place dans les centres de données pour améliorer leur efficacité énergétique. Quelles sources d'énergie alimentent aujourd'hui ces centres ? Quels dispositifs permettent d'optimiser l'utilisation de l'énergie consommée ? La chaleur est-elle récupérée et valorisée ? Une visite d'une centrale thermique opérant avec un centre de données sera réalisée ainsi qu'une étude de la littérature portant sur les centres de données récents ou en construction. Les entretiens réalisés avec des professionnels du terrain enrichiront également cette dernière partie.

I. COMPRENDRE LES CENTRES DE DONNEES

1.1 INTRODUCTION AUX CENTRES DE DONNEES

1.1.1. Histoire et évolution

Un centre de données est une infrastructure spécialisée essentielle au fonctionnement du réseau informatique. Couramment désigné par son anglicisme *data center*, il se compose d'un ensemble d'équipements informatiques et de réseaux interconnectés conçus pour traiter, stocker et faire circuler de grandes quantités de données¹³. Il comprend, quelles que soient sa taille et sa finalité, des composants indispensables tels que des serveurs, des commutateurs et des routeurs, un système de distribution électrique, un système de refroidissement, des équipements de contrôle environnemental, ainsi que des systèmes de sécurité¹⁴.

Si les centres de données actuels sont des infrastructures modernes et hautement optimisées, leur origine remonte à des installations bien plus rudimentaires. Le début du développement des centres de données dans les années 1940 et 1950 est étroitement lié aux ordinateurs centraux appelés *mainframes*. Ceux-ci sont des ordinateurs de grande puissance conçus pour le traitement de données et les calculs complexes¹⁵. Le premier de ces ordinateurs centraux est l'ENIAC, signifiant en anglais *Electronic Numerical Integrator and Computer* (Intégrateur et Calculateur Numérique Électronique [traduction libre]). Conçu en 1945 à l'université de Pennsylvanie, aux États-Unis, par les ingénieurs américains John P. Eckert et John W. Mauchly¹⁶, et financé par l'armée américaine dans le contexte de la Seconde Guerre mondiale, il permettait de calculer avec précision des tables de tir pour l'artillerie. Les données alors produites par l'ordinateur central étaient inscrites sur des cartes perforées, un support de stockage de données sur lequel l'information est

¹³ Hwaiyu Geng, *Data Center Handbook* (Hoboken, NJ: Wiley, 2015). ISBN 978-1118436639.

¹⁴ *Ibid.*

¹⁵ Richard H. Dee, « *Magnetic Tape for Data Storage: An Enduring Technology* », *Proceedings of the IEEE* 96, no. 11 (2008): 1775. Consulté le 25 août 2025, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2004311>.

¹⁶ Olivier Lavoisy, « E.N.I.A.C. », *Encyclopædia Universalis*. Consulté le 25 août 2025, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/e-n-i-a-c/>.

encodée par la présence ou l'absence de trous¹⁷. Volumineux, pesant 30 tonnes et occupant un espace de 30 mètres cubes, l'ENIAC utilisait 18 000 tubes électroniques et était de cent à mille fois plus rapide que les appareils électromécaniques de l'époque¹⁸. Inauguré en 1946 et utilisé jusqu'en 1955 par l'armée américaine, il a ensuite servi dans des domaines tels que la physique nucléaire et la météorologie, sous l'impulsion du mathématicien John von Neumann¹⁹. L'ENIAC était hébergé dans une salle dédiée et équipée d'un système de refroidissement utilisant de grands ventilateurs pour le maintenir à une température opérationnelle. Ce dispositif peut être considéré comme l'un des premiers centres de données²⁰.

L'invention du transistor par les « laboratoires américains Bell d'American Telephone and Telegraph [...], alors monopole des télécommunications américaines²¹ », a eu un impact significatif sur l'industrie, sur la microélectronique et sur les centres de données. Ce dispositif électronique permet le « contrôle d'un courant [électrique] à travers un morceau de matériau semi-conducteur par une tension appliquée sur une grille de commande²² ». Cette découverte a été récompensée d'un Prix Nobel de Physique en 1956, décerné à ses inventeurs américains John Bardeen, Walter H. Brattain, et William B. Shockley. Les premiers ordinateurs munis de transistors, comme l'IBM 608 datant de 1955, devenus plus petits, plus efficaces et moins coûteux, ont ainsi pu progressivement être utilisés dans un environnement commercial. Des salles informatiques, comparables à des petits centres de données, sont créées dans les bureaux des entreprises pour héberger des *mainframes* qui sont efficaces en termes de rapidité, de puissance et de stockage de données²³.

¹⁷ Duke Robertson, « *Data Center History and Evolution* ». Enconnex (blog), 22 mars 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://blog.enconnex.com/data-center-history-and-evolution>.

¹⁸ Olivier Lavoisy, « E.N.I.A.C. ». *Encyclopædia Universalis*. Consulté le 25 août 2025, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/e-n-i-a-c/>.

¹⁹ *Ibid.*

²⁰ Duke Robertson, « *Data Center History and Evolution* ». Enconnex (blog), 22 mars 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://blog.enconnex.com/data-center-history-and-evolution>.

²¹ Claude Weisbuch, « *Microélectronique* ». *Encyclopædia Universalis*. Consulté le 25 août 2025, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/microelectronique/>.

²² *Ibid.*

²³ Duke Robertson, « *Data Center History and Evolution* ». Enconnex (blog), 22 mars 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://blog.enconnex.com/data-center-history-and-evolution>.

Le développement des *mainframes* se poursuit des années 1970 aux années 1990, une période marquée par une évolution technologique rapide. Parallèlement, les ordinateurs personnels, de taille semblable à ceux d'aujourd'hui, font leur apparition et connaissent une démocratisation progressive. Ils deviennent de plus en plus accessibles, aussi bien au sein des entreprises que chez les particuliers. Ces ordinateurs se connectent aux réseaux informatiques sur le modèle client-serveur. Grâce à ces innovations, les *mainframes* sont peu à peu remplacés par des équipements plus petits, tels que des serveurs, qui fonctionnent de manière coordonnée. Ces serveurs, connectés entre eux au sein d'un réseau, interagissent avec d'autres périphériques comme des ordinateurs, créant ainsi une infrastructure ouverte et flexible, contrairement aux *mainframes* qui fonctionnaient dans des environnements fermés²⁴.

Dans le même temps, dans les années 1980 et 1990, les acteurs du secteur des télécommunications, historiquement issus du secteur public et de l'armée, vont alors suivre une « logique de la privatisation²⁵ ». Elle reflète l'orientation politique libérale initiée par les États-Unis, suivie par le Royaume-Uni et ensuite par l'Europe. Les monopoles publics comme AT&T aux États-Unis ou France Télécom sont alors démantelés. L'ouverture des marchés mène alors à l'émergence d'une multitude d'acteurs privés qui naissent sur ce terreau fertile tels que les géants du numérique, eux-mêmes profitant également du développement de nouvelles technologies, notamment le Web. De plus, cette « logique de la privatisation » s'accompagne d'un changement d'échelle²⁶. Le réseau local et fermé comme celui de l'ENIAC s'élargit progressivement au réseau global et interconnecté Internet. Les tubes électroniques de taille imposante sont remplacés par des transistors et des microprocesseurs toujours plus miniaturisés. Les centres de données évoluent des *mainframes* aux salles de serveurs jusqu'aux *hyperscales* de grande taille, qui permettent de traiter, stocker et faire circuler toujours plus de données.

Certains acteurs privés se spécialisent dans ce secteur et permettent à d'autres entreprises d'utiliser leurs centres de données surdimensionnés et surpuissants afin

²⁴ Duke Robertson, « *Data Center History and Evolution* ». Enconnex (blog), 22 mars 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://blog.enconnex.com/data-center-history-and-evolution>.

²⁵ Pascal Robert, *Le numérique-monde : Histoire et géopolitique de la logistique informationnelle, du télégraphe à l'IA* (Paris: FYP Éditions, 2025). ISBN 978-2364052536.

²⁶ *Ibid*

de traiter leurs données, à l'instar d'« Equinix, Interxion, EdgeConneX, CyrusOne, Alibaba Cloud ou Amazon Web Service²⁷ ». La bulle Internet, période de grande spéculation sur les entreprises des nouvelles technologies, atteint son apogée en 2000 avant d'éclater au cours des deux années suivantes, ce qui affecte fortement le secteur des technologies. Malgré les pertes financières importantes et la réduction des investissements, l'infrastructure développée pendant cette période permet l'émergence d'un nouveau concept au début des années 2000 : les services cloud. Salesforce.com introduit dès 1999 l'idée de fournir des applications via le Web. Amazon Web Services, pionnier du cloud, commence à offrir des services de calcul, de stockage et d'infrastructure informatiques en 2006, entraînant la création de centres de données de plus en plus vastes²⁸. « L'ensemble de ces installations constitue le nuage, un service externalisé de stockage de [données] [...] tellement populaire qu'un tiers des données produites aujourd'hui dans le monde transite par lui²⁹ ». En 2012, 38 % des entreprises utilisaient des services cloud³⁰ et il est prévu qu'en 2025, 80 % des entreprises auront fermé leur propre système de stockage de données pour l'externaliser auprès de prestataires offrant des services de cloud³¹.

1.1.2. Rôle et importance dans le réseau informatique

Les centres de données sont des infrastructures indispensables de nos jours. Ils constituent des points stratégiques d'interconnexion où les données circulant sur le réseau informatique sont stockées et traitées. Lorsqu'un utilisateur interagit avec un site Web ou une application sur un ordinateur ou un téléphone portable, que ce soit pour effectuer une recherche en ligne, discuter sur une messagerie instantanée ou encore pour visionner une vidéo, il se connecte à un serveur situé dans un centre de données. Ce serveur traite la requête formulée par l'utilisateur et envoie les

²⁷ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

²⁸ Duke Robertson, « *Data Center History and Evolution* ». Enconnex (blog), 22 mars 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://blog.enconnex.com/data-center-history-and-evolution>.

²⁹ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

³⁰ Duke Robertson, « *Data Center History and Evolution* ». Enconnex (blog), 22 mars 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://blog.enconnex.com/data-center-history-and-evolution>.

³¹ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

informations demandées depuis le centre de données jusqu'à l'appareil électronique³².

Un volume important de données est produit chaque jour, environ 5 exaoctets de données, « soit autant que toutes celles produites depuis les débuts de l'informatique jusqu'en 2003³³ ». En 2017, la revue *The Economist* considère que les données sont dorénavant la ressource la plus précieuse au monde, surpassant le pétrole³⁴. Par ailleurs, la quantité de données produites dans le futur n'est pas près de ralentir. Chaque utilisateur produit sans le savoir « 150 gigaoctets de [données] par jour³⁵ ». « L'humanité, qui avait stocké 12 zettaoctets de [données] en 2015, générera 175 zettaoctets en 2025 et atteindra 2 142 zettaoctets en 2035³⁶ », soit plus de 2 milliards de milliards de gigaoctets. « Cette quantité de données est exponentielle et nous ne stopperons pas cette tendance³⁷. »

Outre les requêtes effectuées directement par les utilisateurs, une majeure partie des échanges de données s'opère de manière autonome entre les machines sans intervention humaine. « Le non-humain s'est déjà mis à [...] produire davantage [de données] que l'humain, et ce depuis l'année 2012³⁸ ». « En 2023, les connexions entre machines [...], tirées en particulier par les maisons connectées et les voitures intelligentes, devraient totaliser la moitié des connexions sur le Web³⁹ ».

L'importance des centres de données est présente dans chaque secteur d'activité. Par exemple, les services bancaires reposent sur les centres de données pour garantir des opérations bancaires sécurisées et instantanées, de même que les services de santé pour le suivi des patients et l'accès à des résultats d'analyses. Leur importance est d'autant plus frappante dès lors qu'ils subissent des interruptions de service. L'un des exemples les plus marquants de ces dernières années est l'incendie d'un des

³² Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

³³ *Ibid.*

³⁴ The Economist, « The World's Most Valuable Resource Is No Longer Oil, but Data ». *The Economist*, 6 mai 2017. Consulté le 25 août 2025, <https://www.economist.com/leaders/2017/05/06/the-worlds-most-valuable-resource-is-no-longer-oil-but-data>.

³⁵ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

³⁶ *Ibid.*

³⁷ *Ibid.*

³⁸ *Ibid.*

³⁹ *Ibid.*

centres de données de l'entreprise française OVHcloud en mars 2021, situé à Strasbourg en France⁴⁰. Deux des quatre sites du centre de données ont brûlé à la suite du probable incendie d'onduleurs : les deux autres sites n'ont pas pris feu mais ont dû être arrêtés temporairement le temps de l'intervention. En conséquence, de nombreux sites Web hébergés sur des serveurs de ce centre de données ont été mis hors service comme ceux de services publics, d'entreprises, de médias, d'établissements d'enseignement ou encore de transport. Certains clients d'OVHcloud ont même vu leurs données définitivement perdues⁴¹.

1.1.3. Typologies et classification

Les centres de données peuvent être classés selon différentes typologies afin de comprendre leurs différents rôles. Nous explorerons les principaux types de centres de données, la classification Tier ainsi que les différents services qu'ils proposent.

Les types de centres de données

Les centres de données se déclinent en plusieurs typologies selon leurs besoins spécifiques et leurs finalités.

Les centres de données d'entreprises, également appelés centres de données privés, sont des installations mises en place par une entreprise ou tout autre organisme pour répondre à ses propres besoins en termes de traitement et de stockage de données⁴². Ces installations sont détenues et exploitées par l'entité qui les utilise. Ce système leur permet d'avoir un contrôle total sur la gestion des données et de ne pas dépendre d'autres acteurs externes⁴³. Bien que l'adoption des services de cloud soit de plus en

⁴⁰ Wikipédia, « Incendie du centre de données d'OVHcloud à Strasbourg », dernière modification le 2 juin 2025. Consulté le 25 août 2025, https://fr.wikipedia.org/wiki/Incendie_du_centre_de_donn%C3%A9es_d'OVHcloud_%C3%A0_Strasbourg.

⁴¹ Dominique Filippone, « Incendie SGB2 Strasbourg : OVH condamné à verser plus de 100 000 € », *Le Monde Informatique*, 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-incendie-sgb2-strasbourg-ovh-condamne-a-verser-plus-de-100-000-euro-89434.html>.

⁴² Thane Moore, « 6 Types of Data Centers ». Enconnex (blog), 2023, Consulté le 25 août 2025, <https://blog.enconnex.com/6-types-of-data-centers>.

⁴³ *Ibid.*

plus populaire de nos jours, environ la moitié des données gérées dans le monde le sont dans des centres de données d'entreprises⁴⁴.

Les centres de données de colocation, quant à eux, offrent une gamme de services pour la gestion de données à une multitude d'entreprises et de particuliers. Ce modèle permet aux clients de louer des serveurs au sein du centre de données sans avoir à gérer l'ensemble de l'infrastructure comme les aspects techniques et logistiques. Cela comprend notamment des services tels que la sécurité, le refroidissement des serveurs, leur alimentation en énergie ou encore la maintenance du matériel. Les clients peuvent ainsi bénéficier des avantages des services d'un centre de données tout en réduisant les coûts de sa gestion. Les centres de données de colocation sont populaires auprès des petites et moyennes entreprises pour lesquelles l'installation d'un centre de données privé serait trop chère et peu ergonomique⁴⁵.

Les centres de données *hyperscales* sont des installations de grande taille, spécialement adaptées aux besoins massifs de traitement et de stockage de données⁴⁶. Les géants du Web tels que Google, Microsoft ou Amazon ont recours à ces structures imposantes qui occupent souvent des espaces de plusieurs centaines de milliers de mètres carrés, pour répondre aux besoins de services cloud du monde entier. Par exemple, l'une des plus grandes d'entre elles est opérée par la société de télécommunication chinoise China Telecom. Elle s'étend sur une superficie de plus d'1 million de mètres carrés et héberge près de 1,2 million de serveurs pour un investissement total d'environ 3 milliards de dollars⁴⁷.

Enfin, l'*edge computing*, à l'inverse des *hyperscales*, repose sur une stratégie d'implémentation d'un grand nombre de centres de données de petite taille « au plus proche des utilisateurs⁴⁸ ». Ce système vise à réduire les distances que les données parcourent pour atteindre leur destination, ce qui permet de réduire les latences de transfert des données et ainsi d'acheminer les données plus rapidement auprès des

⁴⁴ Thane Moore, « 6 Types of Data Centers ». Enconnex (blog), 2023, Consulté le 25 août 2025, <https://blog.enconnex.com/6-types-of-data-centers>.

⁴⁵ *Ibid.*

⁴⁶ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

⁴⁷ *Ibid.*

⁴⁸ *Ibid.*

utilisateurs finaux. De plus, l'*edge computing* contribue à diminuer la consommation énergétique nécessaire aux transferts de données, qui est « réputée plus lourde que leur stockage⁴⁹ ».

La classification Tier

Les centres de données peuvent également être classifiés selon leur niveau de disponibilité, qui est une caractéristique essentielle dans leur évaluation. Le consortium Uptime Institute a mis au point la classification Tier qui se décline en 4 niveaux, allant de Tier I à Tier IV. Chaque niveau correspond à des critères précis définissant le degré de redondance, c'est-à-dire la duplication des composants critiques pour assurer la continuité de service, et de tolérance aux pannes d'un centre de données. Plus le niveau est élevé, plus les exigences sont strictes, ce qui se traduit par une haute disponibilité et une grande résilience du centre de données⁵⁰.

Les centres de données de catégorie Tier I sont les centres de données les plus basiques. Ils sont dotés d'une seule voie de distribution pour les équipements informatiques ainsi que d'un système d'alimentation électrique et de ventilation dépourvu de redondance. Cette configuration élémentaire les rend plus vulnérables aux interruptions en cas de panne des composants. La disponibilité prévue pour ces installations est de 99,671 %, ce qui correspond à un maximum d'environ 29 heures de panne par an⁵¹.

Les centres de données de catégorie Tier II comprennent les caractéristiques du niveau Tier I, tout en y ajoutant des éléments de redondance pour le système d'alimentation électrique et pour le système de ventilation afin d'améliorer leur résilience. Avec une disponibilité prévue de 99,741 %, soit une limite de 22 heures de panne par an, ce niveau offre ainsi une meilleure protection. Ce type d'infrastructures est adapté aux entreprises de taille moyenne qui souhaitent une

⁴⁹ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

⁵⁰ Hwaiyu Geng, *Data Center Handbook* (Hoboken, NJ: Wiley, 2015). ISBN 978-1118436639.

⁵¹ *Ibid.*

certaine tolérance aux défaillances sans recourir à des solutions entièrement redondantes et donc plus coûteuses⁵².

Les centres de données de catégorie Tier III intègrent toutes les caractéristiques des niveaux Tier I et II. En outre, ils sont dotés de multiples chemins de distribution indépendants pour les équipements informatiques et tous les équipements sont doublement alimentés. Ce niveau permet une disponibilité de 99,982 %, ce qui équivaut à un maximum de 1,6 heure de panne par an. Il est souvent privilégié pour les applications critiques nécessitant une grande fiabilité et une grande tolérance aux pannes⁵³.

Les centres de données de catégorie Tier IV, le niveau le plus élevé, regroupent toutes les caractéristiques des niveaux précédents et assurent une tolérance totale aux pannes. Ces centres de données sont équipés de systèmes de refroidissement et d'alimentation indépendants et doublés, comprenant des installations de stockage et de distribution d'énergie. La disponibilité prévue est de 99,995 %, ce qui équivaut à une limite d'environ 26 minutes de panne par an. Ce niveau est particulièrement adapté aux entreprises qui gèrent des opérations critiques comme les géants du numérique ou les institutions bancaires et qui ne peuvent tolérer aucune interruption de service⁵⁴.

Les services associés aux centres de données

Les centres de données sont utilisés pour fournir différents services adaptés aux besoins des clients en termes d'infrastructure, de plateformes ou de logiciels. Ces services sont regroupés sous l'appellation générale « as a Service » qui est précédée par le domaine concerné.

L'infrastructure en tant que service, en anglais *Infrastructure as a Service* (IaaS), permet la location de ressources comme des « équipements de réseaux, des serveurs, des unités de stockage⁵⁵ » auprès d'un centre de données. « Le client externalise son

⁵² *Ibid.*

⁵³ Hwaiyu Geng, *Data Center Handbook* (Hoboken, NJ: Wiley, 2015). ISBN 978-1118436639.

⁵⁴ *Ibid.*

⁵⁵ Jean-Michel Mur, *Les centres de données : notions fondamentales, normes, fibres optiques, connectique, émetteurs-récepteurs, protocoles* (Saint-Herblain: Éditions ENI, 2020). Consulté le 25 août 2025,

parc de matériels informatiques dont la gestion, la mise à niveau et l'entretien sont assurés par le fournisseur⁵⁶. »

La plateforme en tant que service, en anglais *Platform as a Service* (PaaS), offre un environnement clé en main pour développer et héberger des applications. Ce service comprend la location de serveurs, de stockage et d'outils de développement hébergés dans les centres de données d'un fournisseur. Il est utilisé par des clients pour créer des applications sans affecter le fonctionnement du système interne⁵⁷.

Les logiciels en tant que service, en anglais *Software as a Service* (SaaS), proposent des applications prêtes à l'emploi accessibles en ligne. Ce modèle, qui repose sur une facturation à l'utilisation (volume de données, nombre de requêtes, etc.), permet aux entreprises de bénéficier de solutions complètes sans avoir à se charger ni de la gestion d'un centre de données, ni de celle des logiciels utilisés⁵⁸.

Le stockage en tant que service, en anglais *Storage as a Service* (StaaS), offre la possibilité de louer des infrastructures de stockage modulables en fonction des besoins. Ce service nécessite une confiance particulière envers le fournisseur, notamment concernant la sécurisation des données⁵⁹.

La sauvegarde des données en tant que service, en anglais *Back-up as a Service* (BaaS), simplifie la sauvegarde des données en offrant un stockage externalisé et accessible depuis n'importe où⁶⁰.

La reprise d'activités en tant que service, en anglais *Disaster Recovery as a Service* (DRaaS), fournit les outils, équipements et procédures nécessaires pour relancer les activités informatiques après un sinistre. Intégré dans un plan de reprise d'activités (PRA), ce service permet de restaurer rapidement les systèmes critiques en cas de panne majeure ou de catastrophe⁶¹.

<https://www.editions-eni.fr/livre/les-centres-de-donnees-notions-fondamentales-normes-fibres-optiques-connectique-emetteurs-recepteurs-protocoles-9782409027062>.

⁵⁶ *Ibid.*

⁵⁷ *Ibid.*

⁵⁸ *Ibid.*

⁵⁹ *Ibid.*

⁶⁰ *Ibid.*

⁶¹ *Ibid.*

1.2 LA DIMENSION GEOPOLITIQUE

Les centres de données sont des infrastructures de grande importance qui répondent à des logiques d'ordre géopolitique. Ceux-ci entretiennent des relations spécifiques avec l'espace et la politique, ce qui influence certaines de leurs caractéristiques comme leur localisation⁶², et doivent aussi faire face à des menaces d'ordre physique comme informatique.

1.2.1 Les logiques d'implantation

La localisation des centres de données répond à des logiques qui ne doivent rien au hasard. Celles-ci tiennent compte d'une multitude de facteurs comme la proximité des utilisateurs, les conditions climatiques, la disponibilité d'un personnel qualifié ou encore la fiscalité. Nous allons principalement prendre comme exemple l'un des centres de données de Facebook situé à Luleå en Suède.

Régions urbaines

Les centres de données sont en grande partie concentrés dans des aires urbaines réparties dans une cinquantaine de villes à travers le monde⁶³. Ce phénomène peut être expliqué par l'effet magnet, selon la théorie de l'historienne Fanny Lopez. La valeur des données réside essentiellement dans leur capacité à être rapidement mobilisées et échangées au sein du réseau informatique, ce que permettent ces hubs de connexion urbains⁶⁴. Cependant, cette concentration urbaine de centres de données ne signifie pas pour autant qu'ils sont absents en région. Bien au contraire, il en existe de nombreux et ceux-ci sont davantage dédiés à la distribution et à la collecte de données⁶⁵. Ainsi, le centre de données de Facebook situé à Luleå, au nord de la Suède, est éloigné des grandes aires urbaines et est situé à 100 kilomètres du

⁶² Philippe Moreau Defarges, « Géopolitique ». *Encyclopædia Universalis*. Consulté le 25 août 2025, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/geopolitique>.

⁶³ Fanny Lopez, *À bout de flux* (Paris: Éditions Divergences, 2022). ISBN 979-1097088507.

⁶⁴ *Ibid.*

⁶⁵ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

cercle polaire⁶⁶. De plus, Ashburn, une ville d'environ 50 000 habitants située dans l'État de Virginie aux États-Unis, est depuis 1992 l'un des premiers points d'échange où 70 % du trafic Internet mondial transite dans la surnommée « Silicon Valley de la côte est⁶⁷ ».

Latence

Les centres de données doivent être situés au plus près des utilisateurs pour réduire au minimum la latence, c'est-à-dire la durée de transmission des données partant du centre de données jusqu'aux utilisateurs finaux à travers le maillage complexe des câbles du réseau informatique. La latence est devenue cruciale de nos jours pour répondre aux besoins de l'intelligence artificielle, du streaming vidéo, des jeux vidéo multijoueurs en ligne ou encore de la finance. Chaque milliseconde est cruciale comme le démontre la construction du câble sous-marin transatlantique Hibernia Express reliant les Bourses de Londres et de New York. Il permet de faire transiter sous l'eau les données en « 58,95 millisecondes, soit 5 millisecondes de moins que la concurrence⁶⁸ ». Ce gain de temps a forcé les principaux traders à emprunter ce câble pour rester compétitifs malgré un coût d'accès à l'Hibernia Express cent fois plus élevé que par la route traditionnelle. Concernant Facebook, la construction d'un centre de données en Suède répondait à la volonté de gérer les données de ses internautes européens, africains et moyen-orientaux ainsi que de réduire le temps de connexion⁶⁹.

Risques naturels et sociétaux

Les centres de données étant des infrastructures stratégiques, leur emplacement l'est tout autant et ils ne doivent pas être situés dans des zones à risques susceptibles de freiner leurs activités. Ces risques peuvent être d'origine naturelle, tels que des

⁶⁶ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

⁶⁷ *Ibid.*

⁶⁸ *Ibid.*

⁶⁹ *Ibid.*

tremblements de terre, des inondations, des zones à haut risque d'incendie ou une instabilité du sol. À ces risques naturels s'ajoutent des risques sociétaux comme une instabilité politique ou encore des risques technologiques comme des réseaux de transports ou des installations pétrolières ou chimiques⁷⁰. Le centre de données de Facebook bénéficie en Suède d'une région où l'activité sismique est quasi inexistante ainsi que d'une « exceptionnelle stabilité politique, la dernière guerre, avec le voisin norvégien, remontant à 1814⁷¹ ».

Conditions climatiques

Les conditions climatiques constituent également un critère important dans le choix de l'implantation des centres de données. Ces infrastructures dégagent une quantité importante de chaleur, notamment en raison de l'activité en continu des serveurs, dont la température peut atteindre 60 °C. Or, pour assurer un fonctionnement optimal et éviter tout risque de surchauffe, la température des composants doit osciller entre 20 °C et 27 °C⁷². Plutôt que de s'appuyer exclusivement sur des systèmes de refroidissement coûteux et énergivores permettant de maintenir une température optimale dans les centres de données, des solutions permettant d'aller récupérer du froid dans l'environnement immédiat sont privilégiées.

Le climat polaire du nord de la Suède fournit aux centres de données, comme celui de Facebook à Luleå, un refroidissement naturel pour ses composants. Les températures extérieures sont généralement basses et peuvent atteindre les -41 °C⁷³. Ces conditions climatiques permettent de refroidir naturellement les centres de données sans consommer davantage d'électricité. L'électricité allouée au centre de données l'est alors davantage à l'alimentation des équipements qu'à leur refroidissement. Cette technique de refroidissement par l'air sera abordée plus en détail dans la troisième partie de ce mémoire de recherche.

⁷⁰ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

⁷¹ *Ibid.*

⁷² *Ibid.*

⁷³ *Ibid.*

Personnel qualifié

Les centres de données nécessitent du personnel qualifié comme des ingénieurs spécialisés en réseaux, des administrateurs système, des experts en cybersécurité et des techniciens de maintenance. Ils doivent par conséquent être situés « à moins d'une heure de voiture d'un aéroport international pour attirer les meilleurs talents⁷⁴ ». Il faut également des « professionnels du BTP compétents, de sorte que le [centre de données] à venir jaillisse du sol en moins de dix-huit mois⁷⁵ ». Le centre de données de Facebook bénéficie de l'université technologique locale et d'un centre de recherche du groupe de télécommunications suédois Ericsson. « Pour parachever ce dispositif, l'Etat et la région viennent de créer dans la ville de Luleå un laboratoire industriel qui servira à tester les nouveaux équipements liés à l'industrie des [centres de données]⁷⁶. »

Fiscalité

La localisation des centres de données répond également à des critères d'ordre fiscal⁷⁷. Depuis des décennies, l'Irlande a mis en place des politiques visant à encourager le développement d'entreprises informatiques sur son territoire. Dès les années 1950, des acteurs notables comme IBM et Ericsson s'y sont installés, suivis par Dell, Intel, HP et Microsoft dans les années 1970 et 1980. En 2004, Google a également choisi l'Irlande pour y implanter son siège européen. Aujourd'hui, 16 des 20 plus grandes entreprises du numérique y sont présentes. Le principal critère de cette implantation est le taux d'imposition sur les sociétés, une taxe reversée par ces entreprises à l'Irlande selon leurs bénéfices. Ce taux est relativement bas par rapport à ses voisins européens. Il a été longtemps à 0 % afin d'inciter ces entreprises à s'y installer. Puis, il a été relevé à 12,5 % avant de passer récemment à 15 % pour les grandes entreprises, y compris celles du secteur du numérique, conformément aux

⁷⁴ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

⁷⁵ Yves Eudes, « Les datas du grand froid ». *Le Monde*, 3 juin 2016. Consulté le 25 août 2025, https://www.lemonde.fr/pixels/article/2016/06/03/les-datas-du-grand-froid_4932566_4408996.html.

⁷⁶ *Ibid.*

⁷⁷ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

directives de l'Organisation de coopération et de développement économiques. À titre de comparaison, la moyenne mondiale des taux d'imposition sur les sociétés est de 23 %. Les centres de données font partie intégrante de ces politiques de développement à destination des entreprises du numérique. Leur expansion a été facilitée au point que la centaine de centres de données présents sur le territoire irlandais consomme aujourd'hui près de 18 % de l'électricité de l'île. Tous les projets de centres de données en Irlande ne se sont pas concrétisés, mais si cela devait être le cas, ce pourcentage pourrait atteindre 70 % d'ici 2030⁷⁸.

Cette situation bénéficie principalement aux grandes entreprises du numérique qui réalisent des bénéfices record au détriment de la population irlandaise. Bien qu'ils représentent une part importante de l'économie de l'île, les centres de données emploient seulement 16 000 personnes pour une population de plus de 5 millions d'habitants. De plus, la consommation électrique des centres de données est telle que les risques de coupure de courant sont grands. On peut également noter que les politiques facilitant le déploiement des centres de données mettent en évidence les relations ambiguës entre l'État irlandais et les entreprises du numérique. Ces politiques bénéficient principalement à ces entreprises, au détriment de la démocratie et des citoyens⁷⁹.

1.2.2 Les acteurs

Ces tensions entre acteurs publics et privés peuvent s'expliquer par le concept de glissement de la prérogative politique théorisé par le professeur des universités Pascal Robert⁸⁰. Des compétences comme le traitement, la circulation et le stockage de données, qui relevaient initialement de la prérogative d'acteurs publics comme les gouvernements, les centres de recherche ou encore l'armée, ont progressivement glissé aux mains d'acteurs privés. Ce processus découle de la logique de privatisation des années 1990 dans le cadre de l'ouverture des marchés et de la fin

⁷⁸ Jessica Traynor, « *Power Grab: The Hidden Costs of Ireland's Datacentre Boom* ». *The Guardian*, 15 février 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.theguardian.com/world/2024/feb/15/power-grab-hidden-costs-of-ireland-datacentre-boom>.

⁷⁹ *Ibid.*

⁸⁰ Pascal Robert, *Le numérique-monde : Histoire et géopolitique de la logistique informationnelle, du télégraphe à l'IA* (Paris: FYP Éditions, 2025). ISBN 978-2364052536.

des monopoles publics. Ces entreprises du numérique se sont donc appropriées des compétences originellement publiques sans que cela ne relève de la légitimité démocratique et sans être dépositaires du pouvoir de l'État⁸¹.

Les centres de données mettent également en évidence des réalités liées à l'espace. Le concept de « déspatialisation » grâce au numérique, selon lequel les nouvelles technologies de l'information permettraient d'effacer la notion d'espace et, par conséquent, d'abolir les frontières, n'est pas nouveau. Comme l'affirme Pascal Robert, le numérique ne possède pas les « vertus déspatialisantes » qu'on lui attribue à tort. « [L]'espace n'est pas dissous, [...] au contraire il se multiplie⁸². » « Une infrastructure comme celle du numérique, qui se déploie dans l'espace concret dans sa face matérielle et qui produit tout un ensemble de représentations (dont des représentations de l'espace) simultanément, ne pouvait pas ne pas engendrer de l'espace et non l'effacer⁸³. »

Ces questions liées aux espaces et aux frontières sont notamment soulignées lorsqu'il est question du stockage de données sensibles, définies comme étant « une catégorie particulière des données personnelles⁸⁴ » portant, par exemple, sur la santé de personnes physiques, leurs opinions politiques ou encore leurs données biométriques⁸⁵. Un exemple révélateur est la polémique portant sur le stockage de données de santé géré par Health Data Hub. Cet acteur public français est chargé de centraliser des bases de données de santé à des fins de recherche et regroupe ainsi des données pseudonymisées de citoyens français. Ces données pseudonymisées, à la différence des données anonymisées, ne sont pas rendues anonymes et sont donc des données personnelles soumises au Règlement général sur la protection des données (RGPD)⁸⁶. Health Data Hub a obtenu l'aval de la Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL) pour gérer ces données de santé, malgré le fait

⁸¹ Pascal Robert, *Le numérique-monde : Histoire et géopolitique de la logistique informationnelle, du télégraphe à l'IA* (Paris: FYP Éditions, 2025). ISBN 978-2364052536.

⁸² *Ibid.*

⁸³ *Ibid.*

⁸⁴ Commission nationale de l'informatique et des libertés, « *Donnée sensible* ». CNIL.fr. Consulté le 25 août 2025, <https://www.cnil.fr/fr/definition/donnee-sensible>.

⁸⁵ *Ibid.*

⁸⁶ Comité européen de la protection des données, « *Quelle est la différence entre un responsable du traitement et un sous-traitant ?* ». Consulté le 25 août 2025, https://www.edpb.europa.eu/sme-data-protection-guide/faq-frequently-asked-questions/answer/what-difference-between_fr.

que celles-ci soient hébergées par Microsoft, une entreprise américaine. Cela est problématique car le géant du Web est soumis au Cloud Act, une loi américaine permettant une surveillance élargie d'entreprises américaines par les services de renseignements américains, y compris en dehors des frontières du pays. Cela signifie que, quand bien même les données sont stockées sur le territoire européen, les renseignements américains pourraient tout de même légalement avoir accès à ces données. Ce risque est reconnu par la CNIL mais elle n'a pas les moyens juridiques d'interdire ce traitement de données. En effet, seul Microsoft a su répondre à l'appel d'offres face à différents acteurs européens comme le français OVH. Cette polémique s'ajoute aux soupçons de favoritisme au profit de l'entreprise américaine⁸⁷.

Un autre exemple révélateur de ces tensions de souveraineté numérique est le projet suisse « Public Clouds Confédération ». Pour répondre à ses besoins numériques, la Confédération suisse a conclu un contrat avec cinq multinationales étrangères, parmi lesquelles figurent l'américain Amazon et le chinois Alibaba. Le montant de cet accord s'élève à 110 millions de francs suisses pour une durée de cinq ans, soit environ 116 millions d'euros. Cette décision est critiquée car la Confédération a préféré des concurrents étrangers à des solutions cloud souveraines. Certains critères de l'appel d'offres, comme la gestion de centres de données sur au moins trois continents différents, excluait d'office des candidats locaux comme Infomaniak. Selon le directeur de cet acteur privé de services cloud, les risques encourus sont le blocage des données, des portes dérobées, des fermetures de services, de l'espionnage, de la censure voire de la destruction de données⁸⁸.

On peut également relever la menace de l'acteur du numérique suisse Proton de quitter la Suisse à cause d'une loi fédérale qui serait encore plus intrusive que les lois sur le renseignement de l'Union européenne ou des États-Unis. Il envisage de déménager son siège en Allemagne et a déjà fait des démarches pour exploiter ses

⁸⁷ Ingrid Vergara, « Données de santé des Français : l'hébergement chez Microsoft fait polémique ». *Le Figaro*, 8 février 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.lefigaro.fr/secteur/high-tech/donnees-de-sante-des-francais-l-hebergement-chez-microsoft-fait-polemique-20240207>.

⁸⁸ Anouch Seydtaghia, « La Suisse a abandonné sa souveraineté numérique ». *Le Temps*, 12 juillet 2021. Consulté le 25 août 2025, <https://www.letemps.ch/cyber/suisse-abandonne-souverainete-numerique-alerte-infomaniak>.

propres centres de données, non plus exclusivement en Suisse, mais aussi en Allemagne et en Norvège⁸⁹.

1.2.3 Les conflits

Les centres de données sont des cibles stratégiques lors de conflits ou pour extorquer de l'argent. On peut distinguer les attaques informatiques, ou cyberattaques, et les attaques physiques.

Les cyberattaques ne se limitent pas aux entreprises dont les activités sont hébergées dans des centres de données d'une autre entreprise. Certains centres de données peuvent eux-mêmes devenir des cibles directes en tant qu'hébergeurs de données et fournisseurs de services. En 2023, l'entreprise danoise CloudNordic a été victime d'une cyberattaque majeure qui a compromis la quasi-totalité des données de ses clients. Plus précisément, il s'agit d'un *ransomware*, un type de cyberattaque qui infecte les serveurs avec un logiciel malveillant visant à chiffrer les données et à rendre leur accès impossible sans le paiement d'une rançon, généralement en cryptomonnaie. Celui-ci s'est propagé au cours d'une migration de données entre serveurs, affectant également les données de sauvegarde. Les conséquences étaient telles que CloudNordic n'a pas réussi à se relever de cette attaque et a été contrainte de mettre fin à ses activités. Il faut noter que le paiement d'une rançon ne garantit pas la récupération des données^{90, 91}.

L'invasion de l'Ukraine par la Russie, toujours en cours, met également en évidence des risques non seulement liés aux cyberattaques mais aussi aux menaces physiques pesant sur des centres de données. Pour condamner cette invasion, des mesures ont été prises par les États membres de l'Union européenne, dont l'une porte sur l'exclusion de la Russie du système de messagerie bancaire SWIFT. Celui-ci est

⁸⁹ Pierre-Alexandre Sallier, « *Surveillance : le géant des mails cryptés Proton prêt à quitter Genève* ». *Tribune de Genève*, 14 avril 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.tdg.ch/surveillance-le-geant-des-mails-cryptes-proton-pret-a-quitter-geneve-947402188210>.

⁹⁰ Yves Grandmontagne, « *CloudNordic : le datacenter qui a perdu toutes les données de ses clients lors d'une attaque par ransomware* ». *DC Mag*, 2023. Consulté le 25 août 2025, <https://dcmag.fr/cloudnordic-le-datacenter-qui-a-perdu-toutes-les-donnees-de-ses-clients-lors-dune-attaque-par-ransomware>.

⁹¹ Claudia Glover, « *CloudNordic, AzeroCloud Lose All Data in Huge Ransomware Attack* ». *Tech Monitor*, 25 août 2023. Consulté le 25 août 2025 <https://www.techmonitor.ai/technology/cybersecurity/ransomware-attack-on-cloudnordic-azerocloud-loses-all-data>.

indispensable aux banques afin de réaliser des transferts financiers entre elles. Ces transferts sont assurés par trois centres de données, dont l'un situé en Suisse, dans le canton de Thurgovie, près de la frontière allemande. Face au risque que des individus s'en prennent directement à ce centre de données, des policiers locaux ont été dépêchés afin de protéger davantage l'infrastructure⁹².

En 2021, un attentat à la bombe contre un centre de données d'Amazon situé aux États-Unis dans l'État de Virginie a été déjoué. Cette attaque consistait à perturber le réseau Internet en visant des infrastructures stratégiques comme ce centre de données, dans l'optique de toucher les services gouvernementaux, notamment le FBI et la CIA. Cependant, cette attaque n'aurait pas eu de grandes conséquences dans la mesure où ces services ont des systèmes de redondances sur plusieurs sites. L'auteur des faits affirmait vouloir atteindre 70 % du trafic Internet en s'attaquant à ce seul centre de données, mais ces 70 % représentent la part du trafic qui transite via l'État de Virginie dans une multitude de centres de données, et non juste celui-ci⁹³.

1.3 LA GESTION DE DONNEES

Afin de mieux appréhender leur fonctionnement, des visites ont été réalisées dans des centres de données. En novembre 2023, une première visite organisée par l'École nationale supérieure des sciences de l'information et des bibliothèques (Enssib) dans le cadre de la formation de Master a eu lieu au centre de calcul de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (CC-IN2P3), situé à Villeurbanne en France. Une seconde visite a été réalisée en juillet 2024 au centre de données de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), situé à la frontière franco-suisse près de Genève, pour compléter la compréhension des centres de données.

Tout d'abord, il est nécessaire de distinguer les centres de calcul des centres de données. Les premiers sont des infrastructures similaires aux centres de données

⁹² Anouch Seydtaghia, « *Cyberattaques russes : la Suisse retient son souffle* ». *Le Temps*, 4 mars 2022. Consulté le 25 août 2025, <https://www.letemps.ch/cyber/cyberattaques-russes-suisse-retient-souffle>.

⁹³ Sebastian Moss, « *Right Wing Terrorist Gets 10 Years for Plotting to Blow Up AWS Data Center* ». *Data Center Dynamics*, 2021. Consulté le 25 août 2025, <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/right-wing-terrorist-gets-10-years-for-plotting-to-blow-up-aws-data-center>.

mais ils sont optimisés pour des calculs complexes à l'aide de supercalculateurs. Ceux-ci sont utilisés pour traiter un grand nombre de données, ce qui permet de réaliser des expériences dans des centres de recherches tels que le CERN et le CC-IN2P3. En revanche, les centres de données sont principalement destinés au stockage et à la distribution de données. Bien qu'ils puissent également effectuer des opérations de calcul, celles-ci sont réalisées à une échelle réduite et répondent à d'autres finalités.

Nous allons nous intéresser principalement à la manière dont sont stockées les données et comment elles circulent au sein d'un centre de données. L'objectif n'est pas de dresser un inventaire exhaustif et détaillé de toutes les facettes d'un centre de données. Les systèmes de refroidissement et les mesures d'efficacité énergétique seront détaillés dans la troisième partie de ce mémoire de recherche.

1.3.1 Le stockage de données

Les serveurs

Les serveurs sont les composants principaux des centres de données et sont responsables du traitement et du stockage de données. Ils sont organisés dans des baies, également appelés racks, afin d'optimiser leur fonctionnement et l'espace alloué ainsi que pour faciliter la gestion thermique. Un centre de données ne doit pas être considéré comme une multitude de serveurs travaillant de manière isolée car ceux-ci travaillent de concert pour former un seul grand ordinateur.

Ces serveurs contiennent différents types de mémoire numérique que l'on peut classer selon leur volatilité. La mémoire volatile, comme la mémoire vive, sert à stocker des données de manière temporaire. La mémoire non volatile, qui conserve les données de manière permanente, inclut les disques durs (HDD), les *Solid-State Drive* (SSD) et les bandes magnétiques. Chaque type de mémoire est sélectionné en fonction de ses spécificités distinctes et selon les besoins du centre de données⁹⁴.

Les baies de stockage dans les centres de données sont gérées à l'aide de la technologie RAID (*Redundant Array of Independent Disks*) qui répartit les données

⁹⁴ Hwaiyu Geng, *Data Center Handbook* (Hoboken, NJ: Wiley, 2015). ISBN 978-1118436639.

sur des disques durs et des *SSD* en fonction des besoins des centres de données. Ce système permet de gérer des données avec une performance, une capacité de stockage et une fiabilité élevées. Il existe une multitude de niveaux de RAID définissant le nombre de disques utilisés et les défaillances de disques tolérées⁹⁵.

Par exemple, le RAID 0 « combine deux disques [...] ou plus afin d'augmenter les performances et la capacité, mais n'offre pas de tolérance aux pannes. Une seule défaillance de disque résultera en une perte de données⁹⁶ ». Le RAID 1 fonctionne avec deux disques qui « sont dupliqués en miroir, procurant une tolérance aux pannes en cas de défaillance de disque » et peut donc « supporter une panne sans perte de données ». Enfin, le RAID 6 « requiert un minimum de quatre disques » et « peut supporter la défaillance de deux disques » sans perdre de données⁹⁷.

La nécessité de dupliquer les données de support en support pour ne pas les perdre ne constitue « pas un obstacle à leur mémorisation, mais plutôt une condition⁹⁸ ». « Les rythmes de l'innovation technologique et l'obsolescence des objets industriels réduisent en effet la durée de vie des mémoires matérielles à mesure qu'ils en augmentent les vitesses et les capacités. Sans une rotation rapide et continue des données, les stocks sont donc menacés [...], conserver ne signifie plus fixer, mais dupliquer, circuler, recycler⁹⁹. » Cette redondance ne se limite pas aux serveurs d'un centre de données, ces derniers étant eux-mêmes dédoublés. Les serveurs de la messagerie de Google Gmail seraient dupliqués 6 fois et ceux d'une grande institution financière une quinzaine de fois¹⁰⁰.

⁹⁵ Synology, « *Qu'est-ce que le RAID ?* ». *Synology Knowledge Base*. Consulté le 25 août 2025, https://kb.synology.com/fr-fr/DSM/help/DSM/StorageManager/storage_pool_what_is RAID.

⁹⁶ *Ibid.*

⁹⁷ *Ibid.*

⁹⁸ Louise Merzeau, « *Faire mémoire de nos traces numériques* », HAL SHS (archive ouverte), 2012. Consulté le 25 août 2025, <https://shs.hal.science/halshs-00727308>.

⁹⁹ *Ibid.*

¹⁰⁰ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

Stockage de données

Disque dur

Le fonctionnement et les composants des disques durs sont similaires depuis leur création dans les années 1950. Les évolutions portent sur leur capacité de stockage, leur coût par bit, leur performance et leur fiabilité. L'un des paramètres les plus importants des disques durs est leur densité, c'est-à-dire leur nombre de bits par pouce au carré. Cette variable a considérablement évolué, passant de 2 000 bits par pouce au carré pour le RAMAC 305, l'un des premiers ordinateurs utilisant un disque dur, à 2 000 gigabits par pouce au carré pour les disques durs actuels¹⁰¹.

Le disque dur est constitué de différents éléments. Le plateau permet de conserver les données. Une tête d'écriture et de lecture permet d'écrire et de lire les données sur le plateau. L'actuateur permet de contrôler les mouvements de la tête avec une précision fine. Un moteur assure la rotation du plateau à des vitesses élevées de plusieurs milliers de tours par minute. Une interface permet la communication entre le disque dur et le processeur. Enfin, une alimentation électrique fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement de tous les composants. Pour lire ou écrire un bit sur le plateau, le mécanisme combine le déplacement de la tête jusqu'à l'emplacement du bit et la rotation du plateau pour amener l'emplacement du bit sous la tête. Ce procédé est répété inlassablement pour chaque lecture et écriture de données¹⁰².



Figure 1 : Illustration d'un disque dur¹⁰³

¹⁰¹ Bruce Jacob, Spencer W. Ng, et David T. Wang, *Memory Systems: Cache, DRAM, Disk* (Burlington, MA: Morgan Kaufmann, 2008).

¹⁰² *Ibid.*

¹⁰³ Pixabay, *Disque dur*, photographie numérique, 2015. Consulté le 25 août 2025, <https://pixabay.com/fr/photos/disque-dur-m%C3%A9moire-secondaire-1071670/>.

Le plateau du disque dur est composé de différentes couches de métaux superposées les unes sur les autres. Une de ces couches est chargée magnétiquement de manière permanente. Cette propriété appelée ferromagnétique est non-volatile et permet de conserver les données de manière permanente. Cette couche peut contenir des métaux comme du fer, du nickel, du cobalt ou du chrome et mesure aujourd'hui environ 25 nanomètres d'épaisseur. Les autres couches du plateau assurent la protection, la durabilité et l'intégrité des données stockées. Chaque bit, la plus petite unité d'information en informatique, représente une section délimitée du plateau, mesurant quelques dizaines de nanomètres de côté. Lorsque la tête écrit un bit, elle convertit un signal électrique en champ magnétique et l'imprègne dans la matière. Lors de la lecture, la tête ne lit pas directement l'orientation magnétique de chaque section précédemment écrite. Elle détecte le changement d'orientation magnétique entre deux sections. Une inversion du champ magnétique entre deux sections représente un 1, et inversement, l'absence d'inversion du champ magnétique entre deux sections représente un 0¹⁰⁴.

Solid-State Drive

Le SSD, signifiant *Solid-State Drive* en anglais, est un support de stockage massivement utilisé par les centres de données. Le terme « *solid-state* » reflète l'absence de composants en mouvement contrairement au disque dur. Il est composé d'une mémoire, en général une mémoire NAND, où sont stockées les données ainsi que d'un contrôleur qui détecte et corrige les erreurs de bits. Le SSD possède une interface de connexion entre la mémoire et le processeur pour permettre les flux de données ainsi qu'une mémoire cache pour faciliter ces flux¹⁰⁵.

¹⁰⁴ Bruce Jacob, Spencer W. Ng, et David T. Wang, *Memory Systems: Cache, DRAM, Disk* (Burlington, MA: Morgan Kaufmann, 2008).

¹⁰⁵ *Ibid.*



Figure 2 : Illustration d'un SSD¹⁰⁶

Dans une mémoire NAND, il existe des milliards de cellules possédant chacune un transistor qui permet la capture d'électrons. L'écriture s'effectue en ajoutant ou en retirant des électrons dans le transistor d'une cellule à l'aide d'impulsions électriques. La lecture s'effectue à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique lorsqu'une tension de polarisation est appliquée à la cellule¹⁰⁷.

Selon le modèle de mémoire NAND, les cellules peuvent stocker un ou plusieurs bits de données et donc différentes valeurs seuils. Une cellule à un niveau contient un seul bit de données et possède deux valeurs seuils : l'absence d'électrons dans le transistor correspond à un 0 et la présence d'électrons correspond à un 1. Une cellule multiniveau peut contenir deux bits de données et possède quatre valeurs seuils correspondant aux combinaisons binaires 00, 01, 10 et 11 selon le niveau de tension du transistor. Les cellules à trois niveaux permettent de stocker trois bits de données et possèdent huit valeurs seuils correspondant aux combinaisons binaires de 000 à 111¹⁰⁸.

Bandes magnétiques

En plus des disques durs et des SSD, les bandes magnétiques sont également massivement utilisées par les centres de données pour le stockage sur le long terme. Une bande magnétique est une cartouche en plastique de forme carrée qui contient différents composants, notamment une bobine sur laquelle est enroulée une bande flexible qui elle aussi est appelée bande magnétique. La cartouche ne possède pas

¹⁰⁶ Tom Barthélémy, *Illustration d'un SSD*, photographie numérique, 2024.

¹⁰⁷ *Ibid.*

¹⁰⁸ Bruce Jacob, Spencer W. Ng, et David T. Wang, *Memory Systems: Cache, DRAM, Disk* (Burlington, MA: Morgan Kaufmann, 2008).

de tête d'écriture et de lecture. La bande flexible se compose de plusieurs couches assurant sa solidité et sa durabilité ainsi que d'une couche magnétique contenant des particules magnétiques qui conservent les données.

Lorsqu'une bande magnétique est écrite ou lue, la cartouche doit être insérée dans un lecteur. Un système de guidage présent dans la cartouche dirige la bande vers la tête d'écriture et de lecture du lecteur. Pour écrire des bits, le lecteur convertit alors un signal électrique en champ magnétique grâce à la tête afin d'orienter les particules magnétiques présentes dans la couche magnétique de la bande magnétique. Lors de la lecture, la tête va lire les inversions de champ magnétique entre deux sections de la bande au lieu de lire directement le champ magnétique d'une section. À l'instar du disque dur, une inversion de champ magnétique correspond à un 1 et, inversement, l'absence d'inversion de champ magnétique correspond à un 0¹⁰⁹.



Figure 3 : Illustration d'une bande magnétique sans le haut de la cartouche¹¹⁰

1.3.2 Le réseau interne

Au sein d'un centre de données, deux réseaux internes de câbles coexistent : le réseau local, ou LAN signifiant en anglais *Local Area Network*, et le réseau de stockage, ou SAN signifiant *Storage Area Network*. Le LAN permet aux données de circuler entre les serveurs tandis que le SAN permet l'échange de données entre les

¹⁰⁹ Richard H. Dee, « *Magnetic Tape for Data Storage: An Enduring Technology* ». *Proceedings of the IEEE* 96, no. 11 (2008): 1775. Consulté le 25 août 2025, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2004311>.

¹¹⁰ Wikimedia Commons, *LTO 2 Cartridge without the Top Shell*, photographie numérique, 2008, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LTO2-cart-wo-top-shell.jpg>.

systèmes de stockage¹¹¹. Ces réseaux peuvent être décomposés en plusieurs zones de manière hiérarchique. Ces câbles, utilisés pour relier les différentes zones du centre de données, sont principalement constitués de cuivre ou de fibre optique. Ils offrent un bon compromis entre débit de transfert de données, faible coût et facilité d'installation et de gestion¹¹².

L'architecture des réseaux internes d'un centre de données repose sur plusieurs zones délimitées :

- La salle d'entrée est le point d'interface entre les réseaux internes du centre de données et les réseaux externes ;
- La zone de distribution principale abrite les commutateurs et les routeurs principaux situés au cœur de l'infrastructure du centre de données. Les commutateurs permettent de connecter plusieurs appareils comme des serveurs sur un même réseau local et de transmettre les données entre eux. Les routeurs, eux, relient les différents réseaux entre eux et dirigent les flux de données dans la bonne direction. Cette zone permet donc de distribuer les données vers les autres zones du centre de données, qu'il s'agisse de serveurs connectés au réseau local (LAN) ou de supports de stockage reliés au réseau de stockage (SAN) ;
- Les zones de distribution de l'équipement abritent les serveurs qui se connectent aux commutateurs des zones de distribution horizontale ;
- Les zones de distribution horizontale servent de point de connexion entre les serveurs situés dans la zone de distribution de l'équipement et les commutateurs principaux de la zone de distribution principale. Ils permettent de distribuer les données entre les serveurs et les autres parties du centre de données ;
- Les zones de distribution intermédiaire sont des espaces optionnels, également appelés distributeurs intermédiaires. Leur rôle est de distribuer les liaisons en fibre optique. Elles se trouvent généralement dans les grands centres de données répartis sur plusieurs étages ou salles ;
- La zone de distribution de zone est un espace facultatif, rarement présent dans les centres de données d'entreprise. Elle ne contient pas d'équipement actif, mais sert de point de consolidation pour le câblage entre les zones de distribution

¹¹¹ Fluke Networks, « *Data Centers* ». Consulté le 25 août 2025, <https://fr.flukenetworks.com/expertise/learn-about/data-centers>.

¹¹² *Ibid.*

horizontale et les zones de distribution de l'équipement, facilitant ainsi les développements et reconfigurations futures¹¹³.

La présentation de l'architecture de centres de données constituée de supports de stockage et de câbles internes permet de contredire le mythe de la dématérialisation. Ce monde n'est en rien éloigné de la matérialité, les bits ne sont pas sans poids mais sont imprégnés dans la matière, ils ne sont pas sans friction mais circulent dans des câbles¹¹⁴. « Autrement dit, nos nouvelles mémoires ne sont en rien dématérialisées et moins encore immatérielles : elles relèvent simplement d'un nouveau “ mode de matérialisation ” qui, non seulement, est au moins aussi matériel, mais peut-être plus encore que le précédent¹¹⁵. »

1.4 L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

1.4.1 Le cycle de vie

Un centre de données génère un impact environnemental important tout au long de son cycle de vie, depuis sa construction jusqu'à sa phase d'exploitation en passant par son éventuel démantèlement. La construction nécessite une grande quantité de matériaux de construction et des métaux issus de ressources naturelles. Par exemple, il faut du fer pour fabriquer l'acier des armatures métalliques de l'infrastructure et du cuivre pour concevoir les câbles. L'extraction et la transformation de ces matériaux nécessitent d'importantes quantités d'énergies fossiles contribuant à cet impact environnemental¹¹⁶. Une fois transformés, les matériaux de construction sont ensuite acheminés sur le chantier du centre de données, un processus qui génère à nouveau des impacts environnementaux. La phase de construction engendre elle aussi des effets notables en raison de la consommation d'énergie nécessaire, des

¹¹³ Fluke Networks, « *Data Centers* ». Consulté le 25 août 2025, <https://fr.flukenetworks.com/expertise/learn-about/data-centers>.

¹¹⁴ Pascal Robert, « *Critique de la dématérialisation* ». *Communication & langages*, no. 140 (2004): 55. Consulté le 25 août 2025, https://www.persee.fr/doc/colan_0336-1500_2004_num_140_1_3268.

¹¹⁵ *Ibid.*

¹¹⁶ Margerie Guilliot, Raphaël Lemaire, et Sylvain Reverault, *Green IT* (Saint-Herblain : Éditions ENI, 2024).

pollutions potentielles de l'air et de l'eau, ainsi que de la production de déchets de construction. Une fois le bâtiment achevé et opérationnel, il entre dans une phase d'exploitation qui s'accompagne de plusieurs impacts environnementaux qui seront détaillés ci-dessous¹¹⁷. À la fin de sa phase d'exploitation, un centre de données entre dans une étape de démantèlement, qui marque la fin de son cycle de vie. Il peut alors être réaffecté à un nouvel usage, ce qui nécessite le démontage des installations spécifiques liées à l'informatique, ou bien être démoli. Dans les deux cas, cette phase entraîne des impacts environnementaux liés à l'énergie requise pour le démontage ou la destruction, au transport des matériaux vers les sites de traitement, ainsi qu'au recyclage ou au retraitement de ces matériaux lorsque cela est possible¹¹⁸. Bien que chaque étape du cycle de vie d'un centre de données ait son propre ensemble d'impacts environnementaux, la phase d'exploitation représente un défi majeur. Ce mémoire de recherche se concentre principalement sur la phase d'exploitation des centres de données.

1.4.2 Les principaux impacts

Empreinte carbone

Le monde numérique dans son ensemble requiert des ressources énergétiques diverses et en grand nombre. Alors que le numérique est responsable de près de 4 % des émissions de dioxyde de carbone à l'échelle mondiale¹¹⁹, les centres de données en constituent actuellement 16 %, une proportion qui pourrait atteindre 42 % à l'avenir¹²⁰. À titre de comparaison, les véhicules légers rejettent 8 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre tandis que l'aviation civile en produit 2,5 %¹²¹. La principale source d'émission de dioxyde de carbone provient de l'alimentation

¹¹⁷ Margerie Guilliot, Raphaël Lemaire, et Sylvain Reverault, *Green IT* (Saint-Herblain : Éditions ENI, 2024).

¹¹⁸ *Ibid.*

¹¹⁹ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

¹²⁰ Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, « *Avis d'experts - Les data centers ou centres de données* ». ADEME. 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://librairie.ademe.fr/ged/9341/Avis-Data-Centers-Centre-de-Donnees-2024.pdf>.

¹²¹ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

électrique du centre de données, notamment lorsque celle-ci est produite à partir d'énergies fossiles comme du charbon ou des hydrocarbures¹²². « Environ 35 % de l'électricité de la planète est aujourd'hui produite à partir du charbon¹²³. »

Consommation électrique

Le numérique consomme environ 10 % de l'électricité mondiale, soit l'équivalent de la production de 100 réacteurs nucléaires¹²⁴. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), les centres de données ont consommé 2 % de l'électricité au niveau mondial¹²⁵. La consommation électrique du numérique augmente de 5 à 7 % par an, et par conséquent, pourrait solliciter 20 % de l'électricité mondiale en 2025¹²⁶. On peut relever que « selon l'AIE, 40 % de la demande d'électricité des centres de données est dévolue au refroidissement, 40 % aux serveurs eux-mêmes et 20 % au système, aux éléments de stockage et de communication¹²⁷ ».

Consommation en eau

L'eau consommée dans les centres de données l'est principalement par les systèmes de refroidissement, où elle circule en circuit fermé¹²⁸, permettant d'être utilisée plusieurs fois. Une autre part de cette consommation est indirecte, liée à la production de l'électricité nécessaire au fonctionnement des centres de données, notamment lorsque celle-ci repose sur des centrales thermiques fortement

¹²² Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

¹²³ *Ibid.*

¹²⁴ *Ibid.*

¹²⁵ Margerie Guilliot, Raphaël Lemaire, et Sylvain Reverault, *Green IT* (Saint-Herblain: Éditions ENI, 2024).

¹²⁶ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

¹²⁷ Anne-Marie Brouet, « Énergivore, l'IA fera-t-elle baisser notre consommation d'énergie ? ». *Dimensions*, no. 16 (2025). Consulté le 25 août 2025, <https://actu.epfl.ch/news/energivore-l-ia-fera-t-elle-baisser-notre-consom-3>.

¹²⁸ Enterprise for Society Center, « *D4 Project: Technical Guide* ». Consulté le 25 août 2025, <https://d4project.org/technical-guide/>.

consommatrices d'eau¹²⁹. Le numérique représente 0,2 % de la consommation d'eau mondiale, dont 5 % sont utilisés par les centres de données lors de la phase de fonctionnement¹³⁰. Un centre de données de taille moyenne peut utiliser jusqu'à 600 000 mètres cubes d'eau par an, ce qui équivaut à 160 piscines olympiques¹³¹. La fabrication des équipements des utilisateurs (ordinateurs, téléphones portables et télévisions notamment), représente la majeure partie (75 %) de la consommation d'eau du numérique¹³².

Prévisions

L'empreinte du numérique entre 2010 et 2025 a été multipliée par 2,4 pour la consommation d'eau, 2,7 pour la consommation d'électricité et par 3,1 pour les émissions de dioxyde de carbone¹³³. La demande en énergie des centres de données, notamment pour satisfaire les besoins de l'intelligence artificielle, augmentera davantage que la capacité des fournisseurs d'électricité. « La consommation annuelle pour les serveurs [dédiés à l'intelligence artificielle] atteindra 500 térawattheures (TWh) d'ici 2027, soit 2,6 fois le niveau de 2023¹³⁴. »

¹²⁹ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

¹³⁰ Frédéric Bordage, « *Empreinte environnementale du numérique mondial* ». Green IT, 2019. Consulté le 25 août 2025, <https://www.greenit.fr/etude-empreinte-environnementale-du-numerique-mondial/>.

¹³¹ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

¹³² *Ibid.*

¹³³ Frédéric Bordage, « *Empreinte environnementale du numérique mondial* ». Green IT, 2019. Consulté le 25 août 2025, <https://www.greenit.fr/etude-empreinte-environnementale-du-numerique-mondial/>.

¹³⁴ Serge Leblal, « *Face à la croissance des datacenters IA, Gartner prédit des pénuries d'électricité* ». *Le Monde Informatique*, 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-face-a-la-croissance-des-datacenters-ia-gartner-predit-des-penuries-d-electricite-95225.html>.

II. ENJEUX ET MOTIVATIONS DES CENTRES DE DONNEES EN MATIERE D'EFFICIENCE ENERGETIQUE

Après avoir étudié dans la première partie le concept de centre de données, leur importance dans la société d'aujourd'hui et leurs impacts environnementaux, cette deuxième partie a pour objectif de comprendre les raisons qui poussent ces infrastructures à mettre en œuvre des stratégies d'efficacité énergétique. Si certaines motivations peuvent sembler évidentes comme la conformité avec le cadre juridique ou la maîtrise des coûts financiers, d'autres motivations sont moins connues et méritent d'être explorées, notamment les initiatives individuelles et les enjeux réputationnels.

Afin de répondre à ces interrogations, la méthodologie de recherche s'appuie sur l'étude de la littérature ainsi que sur une enquête qualitative auprès de professionnels du terrain sous la forme d'entretiens. Ceux-ci constituent la principale source d'informations pour la deuxième partie du mémoire de recherche. Ils apportent également des éléments à la troisième partie, dédiée aux stratégies mises en place par les centres de données pour l'efficacité énergétique.

Plus précisément, cette enquête qualitative est menée auprès d'interlocuteurs impliqués dans des missions liées à ces enjeux au sein de structures qui investissent grandement dans l'efficacité énergétique de leurs centres de données. Ces interlocuteurs ont été identifiés après des recherches en ligne et ont été contactés directement par courriel et sur les réseaux sociaux afin de convenir d'un échange. Chaque entretien a été conduit en visioconférence en suivant une grille d'entretien semi-directif¹³⁵. Cette grille comprend des questions fermées destinées à confirmer le contexte étudié en amont de l'entretien, ainsi que des questions ouvertes portant sur les motivations, afin de laisser une liberté de réponse aux interviewés. L'ordre des questions de la grille d'entretien n'a pas à être respecté au cours des entretiens, mais l'ensemble des thématiques prévues doit être systématiquement abordé.

¹³⁵ Voir annexes 1 et 2.

Le premier entretien a été effectué avec Benoit Delaunay, Directeur adjoint du Centre de Calcul de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (CC-IN2P3), situé à Villeurbanne en France. Cet entretien a été réalisé le 5 juin 2024 durant une heure et demie. En novembre 2023, une première visite organisée par l'Enssib dans le cadre de la formation de Master a eu lieu au CC-IN2P3. Une information concernant le prix de l'électricité a retenu mon attention : ces dernières années, l'IN2P3 a fait face à une forte augmentation des coûts énergétiques pour alimenter en électricité son centre de données, ce qui a eu un impact sur ses activités à court terme. Bien que cet entretien ait été initialement axé sur la problématique de mon ancien sujet de mémoire de recherche, sa proximité avec le sujet actuel permet de réutiliser une partie des données collectées.

Le deuxième entretien a été réalisé avec deux interlocuteurs de l'Organisation Européenne pour la recherche nucléaire (CERN). Wayne Salter est le chef du groupe *Fabric* au sein du département Informatique qui supervise la gestion des centres de données de l'Organisation. Anna Cook est la coordinatrice communication et environnement au sein de l'Unité de la santé et de la sécurité au travail et de la protection de l'environnement. Cette unité gère différentes missions dont la limitation de l'impact des activités du CERN sur l'environnement. L'entretien a été réalisé le 25 mars 2025 pendant près d'une heure. Le CERN a inauguré en février 2024 un centre de données intégrant des mesures visant à améliorer l'efficacité énergétique, un projet supervisé par Wayne Salter. De plus, l'importance de la consommation énergétique du CERN liée à ses activités scientifiques ainsi que son statut juridique d'organisation internationale en font un cas d'étude intéressant.

Un troisième et dernier entretien a été réalisé avec Dimitri Picasso, Responsable Conformité chez Infomaniak, un acteur privé suisse du cloud. L'entretien s'est tenu le 28 avril 2025 pendant une heure. Cette entreprise est impliquée dans une démarche environnementale depuis près de vingt ans et a récemment inauguré un centre de données à la pointe de l'efficacité énergétique.

Conformément au Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD), les données personnelles collectées lors des entretiens et réutilisées au fil du mémoire

de recherche l'ont été avec le consentement des personnes interviewées. Les autorisations de traitement de données personnelles sont jointes en annexe¹³⁶.

2.1 LE CADRE REGLEMENTAIRE

Notre première hypothèse est que les centres de données investissent dans l'efficacité énergétique afin de respecter une réglementation qui encadre et oriente leurs activités. Tout d'abord, il est essentiel de distinguer le cadre juridique applicable aux centres de données et les normes. Le cadre juridique constitue l'ensemble des règles, lois et obligations légales qui encadrent les activités des centres de données sur un territoire donné. Les normes sont des « documents, établis par consensus et approuvés par un organisme reconnu, qui fournissent, pour des usages communs et répétés, des règles, des lignes directrices ou des caractéristiques, pour des activités ou leurs résultats, garantissant un niveau d'ordre optimal dans un contexte donné¹³⁷ ». Contrairement au cadre juridique qui s'applique obligatoirement, les normes sont adoptées volontairement et certaines d'entre elles peuvent faire l'objet d'une certification. L'Organisation internationale de normalisation (ISO), la Commission électrotechnique internationale (CEI) et l'Union internationale des télécommunications (UIT) sont les principaux organismes au rang mondial qui élaborent les normes. Elles forment le World Standards Cooperation (WSC)¹³⁸.

Cette section n'a pas pour objet de dresser un inventaire exhaustif du cadre juridique et des normes applicables aux centres de données, mais de présenter les principales réglementations et normes en vigueur en Europe et en France. Nous n'aborderons pas le cadre juridique et normatif qui s'applique indirectement aux centres de données et qui affecte leurs mesures sur l'efficacité énergétique par exemple la législation relative à la construction.

¹³⁶ Voir annexes 3 à 5.

¹³⁷ Organisation internationale de normalisation, « *Les normes dans le monde d'aujourd'hui* », ISO. Consulté le 25 août 2025, https://www.iso.org/sites/ConsumersStandards/fr/1_standards.html.

¹³⁸ IONOS, « *Qu'est-ce qu'une norme ISO ?* ». The Digital Guide, 2022. Consulté le 25 août 2025, <https://www.ionos.fr/digitalguide/serveur/know-how/quest-ce-quune-norme-iso/>.

2.1.1 Le cadre juridique

La directive (UE) 2023/1791 relative à l'efficacité énergétique s'inscrit dans le cadre de la politique énergétique de l'Union européenne. Elle établit plusieurs objectifs pour réduire les émissions de dioxyde de carbone et pour améliorer l'utilisation des énergies dans de nombreux domaines comme le transport, le bâtiment, l'industrie et les technologies de l'information et de la communication. L'objectif principal est de diminuer la consommation énergétique des membres de l'Union européenne de 11,7 % d'ici 2030 par rapport aux projections de 2020^{139, 140}. Les centres de données sont particulièrement visés par cette directive. En effet, la Commission européenne reconnaît « la nécessité de faire en sorte que les centres de données soient durables et à haute efficacité énergétique¹⁴¹ ». Dans son article 12, la directive exige que les États membres collectent dès mai 2024 certaines données sur le fonctionnement des centres de données d'une puissance égale ou supérieure à 500 kW. Ces données comprennent, outre les données d'identification, « le volume annuel de données entrantes et sortantes et le volume de données stockées et traitées au sein du centre de données¹⁴² » ainsi que « la consommation d'énergie, l'utilisation de puissance, les consignes de température, l'utilisation de la chaleur fatale, la consommation d'eau et l'utilisation d'énergies renouvelables¹⁴³ ». De plus, ceux d'une puissance supérieure à 1 MW doivent valoriser la chaleur fatale rejetée par les serveurs¹⁴⁴. En France, le dispositif éco-énergie tertiaire est un décret du 23 juillet 2019 imposant aux acteurs du tertiaire des objectifs de diminution de la consommation énergétique. Il s'applique aux centres de données d'une surface supérieure à 1 000 mètres carrés et impose une baisse « de la consommation annuelle en kWh/m² par rapport à une

¹³⁹ Union européenne, *Directive (UE) 2023/1791 du Parlement européen et du Conseil du 13 septembre 2023 sur l'efficacité énergétique*, Journal officiel de l'Union européenne L (13 septembre 2023). Consulté le 25 août 2025, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj/eng>.

¹⁴⁰ Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, « *Avis d'experts - Les data centers ou centres de données* ». ADEME. 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://librairie.ademe.fr/ged/9341/Avis-Data-Centers-Centre-de-Donnees-2024.pdf>.

¹⁴¹ Union européenne, *Directive (UE) 2023/1791 du Parlement européen et du Conseil du 13 septembre 2023 sur l'efficacité énergétique*, Journal officiel de l'Union européenne L (13 septembre 2023). Consulté le 25 août 2025, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj/eng>.

¹⁴² *Ibid.*

¹⁴³ *Ibid.*

¹⁴⁴ *Ibid.*

année de référence postérieure à 2010¹⁴⁵ ». Cette baisse est de 40 % en 2030, 50 % en 2040 et 60 % en 2060. À l’instar de la directive européenne, les centres de données doivent fournir des données sur l’historique des consommations énergétiques pour assurer le suivi de ce dispositif¹⁴⁶. De plus, la loi n° 2021-1485 du 15 novembre 2021 vise « à réduire l’empreinte environnementale du numérique en France ». Elle offre aux centres de données « une taxation réduite sur l’électricité » à condition de valoriser la chaleur fatale ainsi que de « respecter un indicateur chiffré [...] en matière d’efficacité dans l’utilisation de la puissance » et « en matière d’utilisation de l’eau à des fins de refroidissement¹⁴⁷ ».

2.1.2 Le cadre normatif

La famille de normes ISO 14000 fournit un cadre pour la mise en place d'un système de management environnemental (SME), permettant à tout type de structure, dont les centres de données, de maîtriser leurs impacts environnementaux, de se conformer aux obligations légales et de favoriser l'amélioration continue de leur performance environnementale¹⁴⁸.

La norme ISO 50001:2018 offre un cadre pour mettre en œuvre et maintenir un système de management de l'énergie. Son objectif principal est d'aider tout type d'organisation, y compris les centres de données, à améliorer leur efficacité énergétique, leur sécurité énergétique, leur utilisation et leur consommation d'énergie. La norme encourage la réduction continue de la consommation d'énergie, des coûts associés et des émissions de dioxyde de carbone¹⁴⁹.

La norme TIA-942 relative à l'infrastructure de télécommunications pour les centres de données élaborée par la *Telecommunications Industry Association* (TIA) est une référence pour la conception et la construction des centres de données. Elle englobe

¹⁴⁵ Agence de l’environnement et de la maîtrise de l’énergie, « *Avis d’experts - Les data centers ou centres de données* ». ADEME. 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://librairie.ademe.fr/ged/9341/Avis-Data-Centers-Centre-de-Donnees-2024.pdf>.

¹⁴⁶ *Ibid.*

¹⁴⁷ *Ibid.*

¹⁴⁸ Organisation internationale de normalisation, « *ISO 14001 : management environnemental* », ISO. Consulté le 25 août 2025, <https://www.iso.org/fr/iso-14001-environmental-management.html>.

¹⁴⁹ Organisation internationale de normalisation, « *ISO 50001 : management de l’énergie* », ISO. Consulté le 25 août 2025, <https://www.iso.org/fr/iso-50001-energy-management.html>.

divers aspects, notamment la disponibilité, la sécurité, l'efficacité énergétique, les systèmes de refroidissement, la redondance et l'optimisation de l'espace¹⁵⁰.

Le Code de conduite européen pour l'efficacité énergétique des centres de données, élaboré par le *Joint Research Centre* de la Commission européenne, est une initiative volontaire visant à améliorer l'efficacité énergétique des centres de données. Il fournit des lignes directrices et des meilleures pratiques pour réduire la consommation d'énergie tout en maintenant les niveaux de performance requis. Ce code de conduite complète les normes ISO en offrant des recommandations spécifiques au secteur des centres de données¹⁵¹.

Enfin, l'Union internationale des télécommunications (UIT) a élaboré une série de recommandations techniques visant à encadrer la conception et l'exploitation des centres de données dans une stratégie environnementale. Ces recommandations regroupées dans une série L constituent une base normative complète pour améliorer l'efficacité énergétique des centres de données. On peut relever la recommandation L.1300 (*Best practices for green data centres*), qui expose les bonnes pratiques à adopter ainsi que la recommandation L.1320 (*Energy efficiency metrics and measurement for power and cooling equipment for telecommunications and data centres*) qui fournit des procédures pour évaluer l'efficacité énergétique des équipements de refroidissement et d'alimentation électrique¹⁵².

2.1.3 Son application dans les organisations étudiées

Les entretiens réalisés auprès des entreprises étudiées mettent en évidence que le cadre juridique ne constitue pas un facteur déterminant ni dans la mise en œuvre, ni dans l'atteinte des objectifs d'efficacité énergétique.

¹⁵⁰ Journée du Datacenter, « *Les normes et les réglementations pour les datacenters (Partie 1)* ». 2023. Consulté le 25 août 2025, <https://journeedudatacenter.com/wp-content/uploads/2023/05/fiche-normes-partie-1.pdf>.

¹⁵¹ Commission européenne, Centre commun de recherche, « *European Code of Conduct for Energy Efficiency in Data Centres* ». Consulté le 25 août 2025, https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/energy-efficiency/energy-efficiency-products/code-conduct-ict/european-code-conduct-energy-efficiency-data-centres_en.

¹⁵² Jean-Michel Mur, *Les centres de données : notions fondamentales, normes, fibres optiques, connectique, émetteurs-récepteurs, protocoles* (Saint-Herblain: Éditions ENI, 2020). Consulté le 25 août 2025, <https://www.editions-eni.fr/livre/les-centres-de-donnees-notions-fondamentales-normes-fibres-optiques-connectique-emetteurs-recepteurs-protocoles-9782409027062>.

En tant qu'organisation internationale¹⁵³, le CERN est régi par le droit international et bénéficie de privilèges et d'immunités nécessaires à son fonctionnement, notamment le droit d'établir sa propre réglementation. Celle-ci s'applique sur son domaine et se substitue aux normes nationales. Le CERN s'attache toutefois à respecter en permanence le cadre juridique de ses États-hôtes, la France et la Suisse. Ainsi, le CERN définit et met en œuvre ses propres règles y compris en matière de stratégie environnementale. Il s'efforce de limiter le plus possible l'impact environnemental de ses activités comme nous le verrons par la suite. Par ailleurs, le CERN mène une veille juridique qui contribue à ajuster cette stratégie¹⁵⁴.

De son côté, Infomaniak, en tant qu'entreprise soumise au droit privé suisse, est tenue de respecter l'ensemble des lois en vigueur, qu'elles soient fédérales, cantonales ou communales. Néanmoins, ces dernières ne contraignent pas de manière forte l'entreprise dans la mise en œuvre de stratégies d'efficacité énergétique. La stratégie et plus largement la démarche environnementale engagées depuis une vingtaine d'années par Infomaniak anticipent et dépassent largement les exigences légales prévues par les lois suisses. À l'instar du CERN, l'entreprise mène une veille juridique afin de maintenir une conformité continue¹⁵⁵.

L'analyse des entretiens démontre ainsi que le cadre juridique joue un rôle secondaire dans la mise en œuvre des stratégies d'efficacité énergétique. Celles-ci résultent avant tout d'initiatives autonomes que nous examinerons à présent.

¹⁵³ « An organization established by a treaty or other instrument governed by international law and possessing its own international legal personality » (Une organisation établie par un traité ou un autre instrument régi par le droit international et possédant sa propre personnalité juridique internationale [traduction libre]).

Darra L. Hofman, « Extraterritoriality and International Organizations ». *Recordkeeping in International Organizations* (New York: Routledge, 2021), 91.

¹⁵⁴ Wayne Salter et Anna Cook (CERN), entretien avec l'auteur, 25 mars 2025.

¹⁵⁵ Dimitri Picasso (Infomaniak), entretien avec l'auteur, 28 avril 2025.

2.2 LES INITIATIVES AUTONOMES

Alors que l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN) est aujourd'hui pleinement engagée dans une démarche environnementale, les premières initiatives en faveur de l'efficacité énergétique de son premier centre de données ont été lancées de manière autonome par un unique employé de l'Organisation il y a une quinzaine d'années. Il est nécessaire de prendre en considération quelques éléments avant de détailler cette initiative.

Le CERN possède désormais deux centres de données principaux, celui du site de Meyrin en Suisse et celui du site de Prévessin-Moëns en France. Le premier a été construit dans les années 1970 alors que le second a été inauguré et mis en service en 2024. Plus largement, la gestion de ces centres de données s'inscrit dans la grille de calcul mondiale pour le Grand collisionneur de hadrons (LHC). Cette grille offre une puissance de calcul et de stockage vertigineuse pour les besoins du CERN. Plus de 170 infrastructures réparties dans 42 pays partout dans le monde totalisent « 1,4 million de cœurs de processeurs et 1,5 exaoctet de stockage¹⁵⁶ ». Les deux centres de données du CERN sont les plus importants de cette grille et sont au premier niveau (Tier 0), les autres centres sont répartis dans 3 autres niveaux, de Tier 1 à Tier 3¹⁵⁷.

L'informatique des années 1970 est très différente de celle que nous connaissons aujourd'hui. Le centre de données du site de Meyrin a été construit pour gérer les données produites par les installations scientifiques du CERN grâce à des *mainframes*. Ceux-ci sont, comme évoqués dans la première partie, des ordinateurs de grande puissance, conçus pour le traitement de données et les calculs complexes, de grande taille et travaillant de manière isolée. Ces ordinateurs sont très éloignés du modèle actuel du système de racks et de serveurs connectés en réseau. Le centre de données du site de Meyrin est donc une infrastructure qui a été conçue pour abriter des *mainframes* qui ont été remplacés au cours des avancées technologiques par des serveurs modernes. Il n'a donc pas été conçu pour accueillir des serveurs et encore moins pour mettre en place des mesures pour améliorer l'efficacité énergétique.

¹⁵⁶ Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), « *Grid Computing* ». Consulté le 25 août 2025, <https://home.cern/fr/science/computing/grid>.

¹⁵⁷ Le centre de calcul de l'IN2P3 fait partie de la Grille de calcul mondiale pour le LHC et se situe au niveau Tier 1.

Lors d'une visite de ce centre en juillet 2024, nous avons pu constater que la hauteur du plafond est très élevée par rapport à la taille des serveurs, ce qui crée un espace vide important et ne favorise pas la circulation efficace de l'air¹⁵⁸.



Figure 4 : Photographie des baies de stockage du centre de calcul du site de Meyrin du CERN¹⁵⁹

Cependant, il y a une quinzaine d'années, un employé du CERN, qui travaillait dans la section gérant les centres de données et engagé à titre personnel sur les questions environnementales, a souhaité rendre le centre de données le plus efficace possible sur le plan énergétique. Cette démarche ne s'inscrivait pas dans une volonté interne de l'Organisation ni d'une contrainte extérieure mais de la seule initiative de cet employé. Celui-ci a obtenu l'appui de son équipe malgré les coûts financiers que cette démarche impliquait mais les résultats ont été probants. En plus d'économies financières, l'optimisation de l'infrastructure est telle que le Power Usage Effectiveness (PUE), indice de référence pour quantifier l'efficacité énergétique des centres de données, est passé de 2,5 à 1,4. L'indice 1,0 représente le score idéal, signifiant que toute l'énergie du centre de données est dédiée exclusivement aux

¹⁵⁸ Wayne Salter et Anna Cook (CERN), entretien avec l'auteur, 25 mars 2025.

¹⁵⁹ Tom Barthélémy, Photographie des baies de stockage du centre de calcul du site de Meyrin du CERN, photographie numérique, 2024.

équipements informatiques. Ce résultat est impressionnant compte tenu des ressources allouées à ce projet et surtout pour une infrastructure qui n'était pas adaptée à accueillir des serveurs, contrairement au nouveau centre de données de Prévessin-Moëns. Ce dernier présente des innovations en matière d'efficacité énergétique qui s'inscrivent non plus dans une démarche individuelle mais dans une stratégie organisationnelle¹⁶⁰.

Pour l'entreprise Infomaniak, l'engagement en matière d'efficacité énergétique de ses centres de données repose principalement sur la volonté de son fondateur Boris Siegenthaler. Elle est marquée par l'adoption d'une charte environnementale dès 2007 qui se veut précurseur pour l'époque. Cet engagement ne se limite pas aux centres de données, il s'inscrit dans une stratégie de démarche environnementale qui englobe d'autres initiatives portant par exemple sur la mobilité, sur les achats de matériel ou sur la gestion des déchets. « C'est un cheval de bataille avec toutes les conséquences que cela implique en termes de ressources financières, humaines et matérielles¹⁶¹. »

Le centre de données D4 récemment inauguré, tout comme le précédent D3, ont été conçus en interne avec l'appui de bureaux d'ingénieurs afin de satisfaire aux exigences d'Infomaniak. D'autres centres de données sont actuellement en développement. Les mesures d'efficacité énergétique mises en œuvre seront similaires, mais des efforts spécifiques seront engagés pour réutiliser des infrastructures existantes plutôt que de construire de nouveaux bâtiments¹⁶².

Pour revenir à l'initiative du CERN, la construction du nouveau centre de données situé sur le site de Prévessin-Moëns répond à deux impératifs : d'une part, les besoins informatiques croissants de l'Organisation, d'autre part sa démarche environnementale.

La gestion de l'environnement fait partie des objectifs stratégiques du CERN et couvre différents domaines environnementaux tels que la protection de l'air, de l'eau et du sol, la gestion des déchets ou encore la gestion de l'énergie¹⁶³. L'organe

¹⁶⁰ Wayne Salter et Anna Cook (CERN), entretien avec l'auteur, 25 mars 2025.

¹⁶¹ Dimitri Picasso (Infomaniak), entretien avec l'auteur, 28 avril 2025.

¹⁶² *Ibid.*

¹⁶³ Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), « *Recherche respectueuse de l'environnement* ». Consulté le 25 août 2025, <https://home.cern/fr/about/what-we-do/environmentally-responsible-research>.

directeur de cette gestion de l'énergie est le Comité pour la gestion de l'énergie, créé en 2015, lui-même supervisé par le Directeur du secteur des accélérateurs et de la technologie du CERN. Le Comité pour la gestion de l'énergie « a pour mission de surveiller la consommation d'énergie du [CERN], de définir des mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique et d'encourager la réutilisation de l'énergie¹⁶⁴ ». Ces mesures vont alors influencer la construction du nouveau centre de données.

Cette construction est nécessaire pour répondre aux besoins informatiques croissants de l'Organisation, qui sont intrinsèquement liés aux expériences scientifiques qu'elle mène. L'étude de la matière à l'aide des accélérateurs et des détecteurs de particules génère d'importants volumes de données, qu'il faut traiter et, pour moins d'un pour cent d'entre elles, conserver. Le fonctionnement des accélérateurs alterne entre des phases actives, durant lesquelles les expériences sont réalisées, et des phases inactives, au cours desquelles les installations scientifiques sont arrêtées et font l'objet d'opérations de maintenance. Ces interruptions peuvent être courtes, de quelques mois en fin de chaque année, ou plus longues, de plusieurs années entre chaque mise à jour majeure. La prochaine mise à jour du LHC, appelée LHC à haute-luminosité (HL-LHC), entraînera une augmentation des besoins informatiques auxquels le centre de données du site de Meyrin actuel ne pourra pas répondre. En effet, elle permettra des collisions des particules de meilleure qualité que les précédentes, et donc toujours plus de données à traiter et conserver. Le HL-LHC devrait être opérationnel vers 2030¹⁶⁵.

Il est donc nécessaire de construire un nouveau centre de données pour répondre aux besoins de la communauté scientifique mondiale, tout en s'alignant sur la politique de gestion de l'environnement de l'Organisation. L'équipe *Fabric* a mené une revue de marché afin d'analyser l'existant en matière de centres de données, dans le but de concevoir une nouvelle infrastructure avec un coût raisonnable dans l'objectif d'un PUE de 1,15, voire 1,10. La finalité première de ce centre est de répondre aux

¹⁶⁴ Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), « *Approche managériale* », *Rapport sur l'environnement 2021-2022*. Consulté le 25 août 2025, <https://hse.cern/fr/rapport-environnement-2021-2022/approche-managériale>.

¹⁶⁵ Wayne Salter et Anna Cook (CERN), entretien avec l'auteur, 25 mars 2025.

besoins informatiques de l'Organisation qui évoluent sans cesse et non d'avoir un centre de données le plus efficace possible sur le plan énergétique¹⁶⁶.

Pourtant, l'innovation principale de ce nouveau centre de données réside dans la réutilisation de la chaleur émise par les serveurs afin de chauffer les bâtiments du CERN du site de Prévessin-Moëns. Cette technique de valorisation énergétique sera détaillée dans la troisième partie de ce mémoire de recherche. Initialement, cette facette du centre de données n'était pas prévue dans sa conception. C'est le Comité pour la gestion de l'énergie qui a fortement recommandé cette mesure dans le cadre de la démarche environnementale du CERN. Cette mesure a d'abord été vue comme une contrainte par l'équipe *Fabric* car le but premier de ce centre de données est de répondre aux besoins informatiques de l'Organisation qui évoluent sans cesse. Le design prévu doit être aussi ouvert et flexible que possible afin de s'adapter aux évolutions futures. Bien que le gros œuvre soit achevé, la réalisation du projet s'étale sur quatre phases successives. Le bâtiment a été dimensionné pour fournir, à terme, une puissance électrique de 12 MW. La première phase, actuellement achevée, permet l'exploitation d'équipements jusqu'à 4 MW, avec une capacité de récupération de 3 MW de chaleur destinée à être réutilisée pour le chauffage des installations du site de Prévessin-Moëns. Les deux phases suivantes porteront cette capacité d'équipement à 8 MW, avec une valorisation énergétique accrue atteignant 6 MW. Enfin, la quatrième phase permettra finalement d'exploiter la totalité de la puissance prévue, soit 12 MW. Néanmoins, malgré les défis rencontrés, les difficultés ont été surmontées et cette mesure est désormais reconnue comme stratégique¹⁶⁷.

2.3 LA CRISE ENERGETIQUE

Nous avons également formulé l'hypothèse que la crise énergétique de 2022, consécutive à la guerre en Ukraine, a eu un impact important sur l'activité des centres de données sur le court et long terme en raison de la fluctuation importante des prix de l'énergie, notamment électrique. En conséquence, cette situation aurait

¹⁶⁶ Wayne Salter et Anna Cook (CERN), entretien avec l'auteur, 25 mars 2025.

¹⁶⁷ *Ibid.*

contraint les centres de données à investir davantage dans l'efficacité énergétique pour faire des économies d'énergie afin de prévenir de futurs risques et d'assurer la disponibilité de leurs services.

À ce propos, nous avons rencontré Benoit Delaunay, Directeur-adjoint de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3). C'est un institut du Centre national de la recherche scientifique (CNRS) qui travaille sur « l'infiniment grand avec l'étude de la cosmologie et des astroparticules, et l'infiniment petit, avec la physique nucléaire et la physique des particules élémentaires¹⁶⁸ ». Son centre de calcul, le CC-IN2P3, met à disposition des chercheurs des capacités de stockage et de calcul dédiées aux recherches scientifiques de l'IN2P3, d'organismes partenaires du CNRS voire des acteurs privés¹⁶⁹.

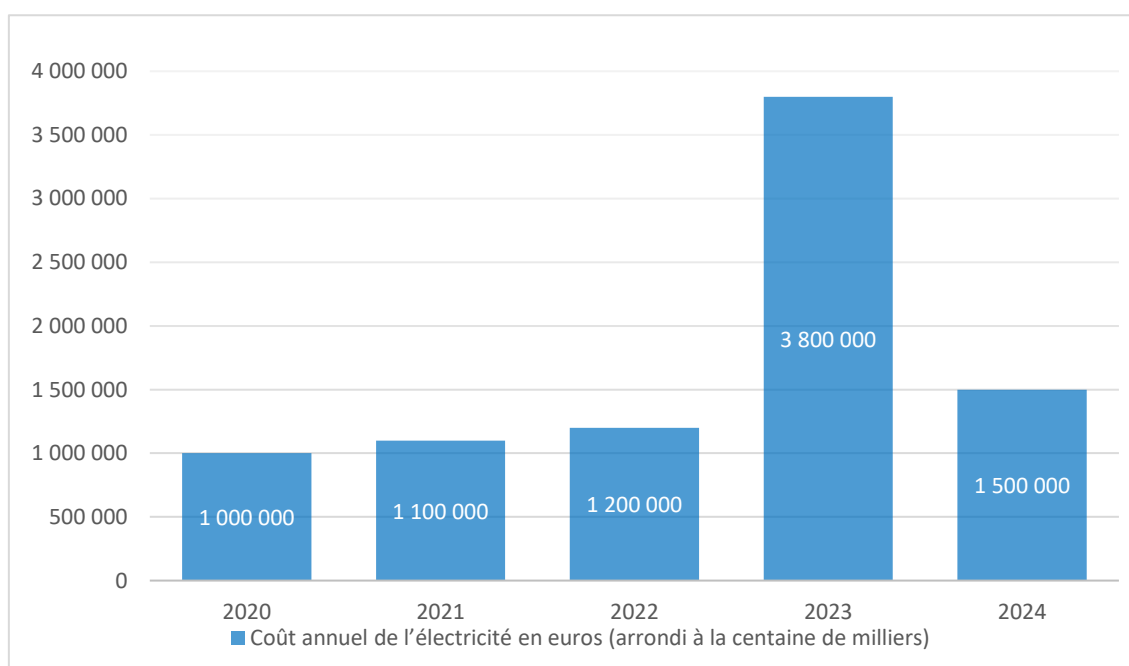


Figure 5 : Graphique comparatif des prix de l'électricité au CC-IN2P3 entre 2020 et 2024¹⁷⁰

¹⁶⁸ Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3), « IN2P3 ». Consulté le 25 août 2025, <https://www.in2p3.cnrs.fr/fr/in2p3>.

¹⁶⁹ Centre de Calcul de l'IN2P3, « Le CC-IN2P3 ». Consulté le 25 août 2025, <https://cc.in2p3.fr/qui-sommes-nous/le-cc-in2p3>.

¹⁷⁰ Benoit Delaunay (CC-IN2P3), entretien avec l'auteur, 5 juin 2024.

Entre 2020 et 2022, les prix de l'électricité du CC-IN2P3 sont restés stables. Le kWh coûte 11 centimes d'euros, ce qui représente un coût annuel d'environ 1 million d'euros. Cependant, en raison de la crise énergétique en Europe et des difficultés rencontrées entre l'IN2P3 et ses fournisseurs d'énergie, les prix ont fortement augmenté pour l'année 2023 pour atteindre 31 centimes d'euros par kWh et un coût annuel s'approchant des 4 millions d'euros. En 2024, les prix reviennent à la normale avec un prix du kWh estimé à 14 centimes d'euros pour un coût annuel estimé à 1,5 million d'euros¹⁷¹.

Cette situation n'a pas conduit à la mise en œuvre de mesures fortes sur le court terme comme l'arrêt de serveurs car le maintien des services informatiques aux usagers était nécessaire. Le CC-IN2P3 poursuit toujours ses efforts en matière d'efficacité énergétique en continuant ses actions comme l'optimisation du matériel informatique et la virtualisation. Ces mesures n'ont pas été renforcées à la suite de la crise énergétique. Cependant, un plan d'action a été adopté au sein de l'Institut afin de prendre des mesures fortes si le centre de calcul n'était plus en mesure de payer l'électricité indispensable à ses activités. Bien que cette hausse des prix ait pu être absorbée cette fois-ci grâce au budget de l'IN2P3 et du CNRS, cela doit rester une exception et le CC-IN2P3 serait en grande difficulté si la situation venait à se reproduire¹⁷².

Le CERN, en tant que consommateur énergétique d'importance, a également été affecté par la crise énergétique. Il faut noter que sa consommation électrique varie grandement selon les phases actives et inactives de ses expériences scientifiques, notamment le LHC. Lors des phases actives, la consommation électrique annuelle dépasse 1 térawattheure (TWh), soit 1 million de mégawattheures (MWh), ce qui correspond environ à la moitié de la consommation électrique annuelle du canton de Genève¹⁷³. Lors des phases inactives, la consommation électrique est réduite à environ 0,5 TWh. La part de l'énergie destinée aux expériences scientifiques représente 95 % de l'énergie totale consommée par le CERN. Le reste, 5 %, permet

¹⁷¹ Benoît Delaunay (CC-IN2P3), entretien avec l'auteur, 5 juin 2024.

¹⁷² *Ibid.*

¹⁷³ Renilde Vanden Broeck, « *L'alimentation et la consommation électrique du CERN* », Poster-2019-761, CERN Document Server, 2019. Consulté le 25 août 2025, <https://cds.cern.ch/record/2692402>.

d'alimenter de ses infrastructures, y compris les besoins énergétiques de ses centres de données¹⁷⁴.

En 2022 lors de la crise énergétique, des mesures à court terme ont été mises en œuvre, comme la prolongation de l'arrêt technique hivernal du LHC. Au centre de données du site de Meyrin, certains serveurs ont été temporairement arrêtés pendant la crise. D'autres actions ont également été mises en œuvre et continuent d'être appliquées, comme la réduction du chauffage des bâtiments ou le remplacement des luminaires par des modèles à basse consommation, le tout sous la supervision du Comité pour la gestion de l'énergie. Cependant, la crise énergétique n'a pas influencé la conception du nouveau centre de données¹⁷⁵.

En ce qui concerne Infomaniak, la crise énergétique n'a pas eu de répercussions majeures sur le fonctionnement de ses activités. Malgré la hausse des prix de l'électricité, dans la mesure où Infomaniak doit répondre aux besoins informatiques de ses clients, l'entreprise n'a pas eu d'autre choix que de payer un tarif plus élevé pour l'électricité fournie par son partenaire Swiss Electricity afin de faire fonctionner ses serveurs et de garantir la disponibilité de ses services. Cependant, la crise n'a pas eu d'impact sur le long terme sur l'exploitation de ses centres de données actuels et sur la conception de ceux à venir¹⁷⁶.

2.4 LA RECHERCHE ET LE DEVELOPPEMENT

Au CERN, la construction du nouveau centre de données de Prévessin-Moëns ne s'inscrivait pas spécifiquement dans une stratégie de recherche et développement. L'objectif principal de ce centre est de répondre aux besoins informatiques de l'Organisation tout en atteignant un niveau d'efficacité énergétique satisfaisant. Naturellement, le CERN, de par sa nature et ses missions, partage volontiers des informations publiques sur ses activités à autrui et apporte son expertise à tout éventuel acteur qui souhaite développer un centre de données similaire. Cependant,

¹⁷⁴ Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), « *Gestion de l'énergie* ». Consulté le 25 août 2025, <https://hse.cern/content/energy-management>.

¹⁷⁵ Wayne Salter et Anna Cook (CERN), entretien avec l'auteur, 25 mars 2025.

¹⁷⁶ Dimitri Picasso (Infomaniak), entretien avec l'auteur, 28 avril 2025.

la construction du centre a été menée conjointement avec des partenaires privés comme Equans, une entreprise française dans le domaine de l'énergie. Par conséquent, certaines informations comme la conception de l'infrastructure du centre sont confidentielles et ne peuvent pas être partagées¹⁷⁷.

Infomaniak, de son côté, a rendu publique la documentation technique de son dernier centre de données D4. Elle est disponible sur un site Web dédié¹⁷⁸. Cette documentation rassemble des informations détaillées sur certains éléments de l'infrastructure comme le système de refroidissement des serveurs et la valorisation de la chaleur de ces derniers afin de chauffer des habitations. Elle comprend également des informations sur les systèmes d'urgence et de redondance ainsi que des diagrammes techniques. L'objectif de cette initiative s'inscrit dans la démarche environnementale d'Infomaniak. Elle a voulu rendre ce projet *open source* afin que tout acteur du secteur puisse s'en inspirer voire le copier en intégralité afin de construire des centres de données similaires au D4 à la pointe de l'efficacité énergétique. L'objectif premier est la cause environnementale, même si cela peut revenir à avantager des concurrents et à perdre des parts de marché¹⁷⁹.

2.5 LES ENJEUX REPUTATIONNELS

Les centres de données sont confrontés à des enjeux réputationnels croissants dans un contexte mondial marqué par une crise climatique qui exige une transition vers une plus grande efficacité énergétique. Pour le CERN, cette évolution s'inscrit dans une stratégie de responsabilité environnementale à long terme, portée par des attentes sociétales et par les orientations définies collectivement avec les États membres. Financée par des fonds publics, l'Organisation est tenue à un devoir de transparence et d'exemplarité. Son financement s'élève, en incluant les contributions des États membres ainsi que celles des États membres associés, à plus de 1,82 milliard de francs suisses, soit plus de 1,93 milliard d'euros. La France y

¹⁷⁷ Wayne Salter et Anna Cook (CERN), entretien avec l'auteur, 25 mars 2025.

¹⁷⁸ Enterprise for Society Center, « Home ». Consulté le 25 août 2025, <https://d4project.org/>.

¹⁷⁹ Dimitri Picasso (Infomaniak), entretien avec l'auteur, 28 avril 2025.

participe à hauteur d'environ 13 %, ce qui représente 177 millions de francs suisses, soit plus de 188 millions d'euros¹⁸⁰.

Il convient de rappeler que le cadre légal ne contraint pas directement le CERN à investir dans l'efficacité énergétique. L'Organisation pourrait très bien répondre à ses besoins informatiques en utilisant de l'électricité à partir d'énergies fossiles pour alimenter ses centres de données au lieu d'investir dans les énergies renouvelables, ou encore en rejetant la chaleur des serveurs dans l'atmosphère au lieu de la capter pour chauffer des bâtiments. Cependant, un tel choix serait, d'une part contraire à la stratégie de l'Organisation, et d'autre part entraînerait un coût réputationnel élevé¹⁸¹. Dans un contexte où le CERN fait l'objet de critiques pour sa consommation énergétique, notamment en lien avec le projet du futur collisionneur circulaire¹⁸², ce choix risquerait de nuire à son image auprès du public à l'instar d'Amazon. Ainsi, en 2012, Greenpeace avait dénoncé l'empreinte écologique des services cloud d'Amazon en déployant une banderole sur son siège à Seattle, interrogeant : « Il est propre comment, votre nuage ?¹⁸³ » Concernant les certifications, le CERN est certifié ISO 50001:2018 depuis 2023 pour sa gestion de l'énergie¹⁸⁴.

Infomaniak adopte une posture transparente en matière de stratégie environnementale. Sur la page Écologie de son site Web, l'entreprise affiche de manière explicite le message « Nous polluons¹⁸⁵ ». C'est une stratégie de communication affirmée qui lui permet de convertir des clients soucieux de l'impact environnemental de leur usage numérique. Cette stratégie lui permet aussi de se distinguer des GAFAM. Toutefois, ce qui constitue son principal atout pour

¹⁸⁰ Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), « *Échelle des contributions au titre de 2025 des États membres et États membres associés* ». Conseil du CERN, 10 juin 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://cds.cern.ch/record/2908193/files/French.pdf>.

¹⁸¹ Wayne Salter et Anna Cook (CERN), entretien avec l'auteur, 25 mars 2025.

¹⁸² Julien Culet. « *Protection de l'environnement : les Verts tentent de limiter le CERN en énergie* ». Tribune de Genève, 15 octobre 2023. Consulté le 25 août 2025, <https://www.tdg.ch/protection-de-l-environnement-les-verts-tendent-de-limiter-le-cern-en-energie-831793151487>.

¹⁸³ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

¹⁸⁴ Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN). « *CERN is awarded ISO 50001 energy certification* ». 8 février 2023. Consulté le 25 août 2025, <https://home.cern/fr/news/news/cern/cern-awarded-iso-50001-energy-certification>

¹⁸⁵ Infomaniak Network SA, « *Écologie – Découvrez pourquoi nous polluons* ». Infomaniak, Consulté le 25 août 2025, <https://www.infomaniak.com/fr/ecologie>.

convertir des clients reste la souveraineté numérique, c'est-à-dire que les données soient gérées sur le territoire suisse et donc soumises à la législation suisse¹⁸⁶.

Afin d'attester de ses engagements, Infomaniak met en avant ses certifications et ses distinctions. En 2021, l'entreprise a obtenu les certifications ISO 14001:2015 sur le système de management environnemental et ISO 50001:2018 sur la gestion de l'énergie pour s'être conformée aux exigences des normes. L'entreprise a aussi reçu des prix d'acteurs locaux comme le Prix cantonal du développement durable du canton de Genève en 2023 pour le projet de centre de données D4 détaillé dans la troisième partie du mémoire de recherche ainsi que le Prix suisse de l'éthique 2023 pour sa stratégie environnementale¹⁸⁷.

2.6 CONCLUSION DE L'ENQUETE

L'enquête qualitative menée auprès de centres de données investissant dans l'efficacité énergétique met en lumière plusieurs éléments. D'une part, le cadre juridique apparaît peu contraignant dans les organisations étudiées car le CERN bénéficie d'un statut juridique particulier lui permettant d'établir sa propre réglementation, tandis qu'Infomaniak anticipe largement les exigences réglementaires suisses. Dans les deux cas, on relève avant tout l'importance de l'initiative autonome qui découle d'une volonté interne dans l'objectif premier de limiter l'impact environnemental. Nous relevons également que la crise énergétique de 2022 a eu un faible impact sur les activités à court terme et n'influera pas sur le long terme, notamment sur les futurs centres de données. Si la recherche et le développement sont perçus comme un atout, ils ne constituent pas l'objectif principal de ces démarches. Enfin, l'enquête souligne l'importance des enjeux réputationnels, des questions de responsabilité sociétale et du rôle des certifications.

¹⁸⁶ Dimitri Picasso (Infomaniak), entretien avec l'auteur, 28 avril 2025.

¹⁸⁷ Infomaniak Network SA, « *Certificats et récompenses – Écologie* », Infomaniak. Consulté le 25 août 2025, <https://www.infomaniak.com/fr/ecologie/certificats-recompenses>.

III. STRATEGIES D'EFFICIENCE ENERGETIQUE DES CENTRES DE DONNEES

Après avoir étudié dans les deux parties précédentes le concept de centre de données ainsi que les différents facteurs les incitant à investir dans l'efficacité énergétique, cette troisième partie a pour but d'explorer les stratégies mises en œuvre pour atteindre cet objectif. Celles-ci regroupent des mesures visant à réduire la consommation énergétique de ces infrastructures tout en maintenant leurs performances pour répondre à leurs besoins croissants. La mise en œuvre de ces stratégies s'organise autour de trois axes principaux : la production d'énergie, l'optimisation de la consommation énergétique et la valorisation de l'énergie consommée.

Avant d'explorer ces axes, nous devons apporter quelques éléments de contexte sur l'approvisionnement énergétique des centres de données qui est indispensable pour garantir la disponibilité et la continuité de leurs services. En effet, une interruption, même de quelques secondes, peut avoir des conséquences importantes sur le fonctionnement d'un centre de données et sur sa capacité à offrir des services. Afin de prévenir ces risques, ces infrastructures sont alors équipées d'installations électriques robustes ainsi que de systèmes de redondance permettant d'assurer une alimentation en énergie continue même en cas d'interruption de l'approvisionnement.

L'installation électrique principale d'un centre de données se branche généralement sur un poste de transformation électrique capable de fournir une puissance pouvant atteindre 40 mégawatts (MW). Cette connexion peut même être directement branchée sur le réseau de transport de haute tension, comme c'est le cas pour des *hyperscales* qui requièrent une puissance élevée¹⁸⁸. La variation de la tension électrique doit être limitée à environ 2 % car des surtensions ou sous-tensions peuvent endommager les équipements. La mise en place d'un système d'alimentation sans interruption à l'aide d'onduleurs permet d'éviter ces risques. Ceux-ci sont des équipements indispensables à l'infrastructure d'un centre de

¹⁸⁸ Fanny Lopez, *À bout de flux* (Paris: Éditions Divergences, 2022). ISBN 979-1097088507.

données. Désignés sous l'acronyme anglais UPS, signifiant *Uninterruptible Power Supplies*, ces dispositifs possèdent des batteries qui fournissent au centre de données une alimentation de secours de manière temporaire et instantanée lorsque le système d'alimentation électrique principal est inopérable¹⁸⁹. Les onduleurs ont un rôle crucial pour maintenir le fonctionnement des équipements critiques du centre de données pendant quelques minutes, afin d'arrêter les serveurs sans perte de données et assurer le rétablissement du système d'alimentation électrique principal¹⁹⁰.

Toutefois, la capacité des onduleurs est limitée dans le temps et ne permet pas de garantir un approvisionnement énergétique prolongé. Dans ce cas, un dispositif supplémentaire prend le relais : les générateurs de secours. Ceux-ci fonctionnent grâce à des réserves d'hydrocarbures comme du diesel, un combustible qui est brûlé afin de convertir la chaleur générée en électricité. Ces générateurs permettent au centre de données de fonctionner plusieurs heures voire plusieurs jours tant qu'ils sont approvisionnés en hydrocarbures. Ils assurent le fonctionnement du centre de données aussi longtemps que nécessaire avant que le système d'alimentation électrique principal soit rétabli¹⁹¹.

3.1 LA PRODUCTION ET L'APPROVISIONNEMENT EN ENERGIE

3.1.1 L'intégration des énergies renouvelables

Les centres de données s'orientent de plus en plus vers l'utilisation d'énergies renouvelables pour répondre aux différents enjeux étudiés dans la deuxième partie. Elles peuvent être définies comme des sources d'énergies « inépuisables à l'échelle du temps humain [et qui] n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes¹⁹² ». Elles se distinguent ainsi des énergies fossiles qui sont non

¹⁸⁹ Hwaiyu Geng, *Data Center Handbook* (Hoboken, NJ: Wiley, 2015). ISBN 978-1118436639.

¹⁹⁰ *Ibid.*

¹⁹¹ *Ibid.*

¹⁹² Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et du Développement durable, « *Les énergies renouvelables* », 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/energies-renouvelables>.

seulement polluantes, mais aussi dont les stocks diminuent progressivement au fil du temps¹⁹³. Il existe 5 grandes familles d'énergies renouvelables : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, l'énergie hydraulique et la géothermie¹⁹⁴.

Énergie solaire

L'énergie solaire permet de produire de la chaleur ou de l'électricité en s'appuyant sur différentes techniques. La plus commune d'entre elles est le solaire photovoltaïque, qui consiste à capter la lumière du soleil afin de la convertir en électricité à l'aide de panneaux solaires¹⁹⁵. Certains centres de données ont fait le choix d'installer des panneaux solaires directement sur le toit de leur infrastructure. Toutefois, l'approvisionnement en électricité est minime et ne répond pas aux besoins énergétiques importants des centres de données, elle « permet tout juste d'alimenter la machine à café¹⁹⁶ ».

D'autres centres de données optent pour une autre approche en installant des panneaux solaires à de plus grandes échelles. Par exemple, pour améliorer l'efficacité énergétique de son centre de données de Saint-Ghislain situé en Belgique, Google a investi en 2017 dans l'autoproduction d'énergie grâce à sa propre centrale solaire. Composée de plus de 10 000 panneaux photovoltaïques et d'une puissance de 2,8 MW, cette centrale permet de « remplacer une partie de l'électricité, issue du réseau, utilisée chaque année dans le centre de données¹⁹⁷ ». En complément d'autres mesures visant à optimiser la consommation énergétique de l'infrastructure, cette initiative a permis d'atteindre un PUE faible de 1,09¹⁹⁸.

Infomaniak investit également dans l'énergie solaire dans l'objectif de couvrir d'ici 2030 la moitié de sa consommation électrique grâce à des panneaux solaires.

¹⁹³ Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et du Développement durable, « *Les énergies renouvelables* », 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/energies-renouvelables>.

¹⁹⁴ *Ibid.*

¹⁹⁵ *Ibid.*

¹⁹⁶ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

¹⁹⁷ Google, « *Positive Energy: Belgian Site Becomes First Google Data Center to Add On-Site Solar* ». Google Sustainability (blog), 2018. Consulté le 25 août 2025, https://sustainability.google/intl/fr_fr/operating-sustainably/stories/belgium-solar/.

¹⁹⁸ *Ibid.*

Actuellement, cette production représente 7 % de sa consommation totale. Cette électricité sert avant tout à alimenter en énergie ses centres de données et peut également être revendue à son partenaire Swiss Electricity. On peut également noter que ses panneaux solaires sont fabriqués en Allemagne et non en Chine. Cette électricité est garantie d'origine, c'est-à-dire que l'électricité achetée fait l'objet d'une certification qui atteste de son origine renouvelable¹⁹⁹.

Le CERN investit également dans l'énergie solaire afin de répondre aux objectifs qu'il s'est fixés. L'Organisation a conclu en 2024 des contrats avec des fournisseurs d'énergie situés dans le sud de la France afin d'être approvisionnée en électricité issue d'énergie solaire. Cette énergie est produite grâce à des centrales solaires composées de panneaux photovoltaïques réparties sur une surface totale de 900 000 mètres carrés. À l'horizon 2027, cette énergie permettra de couvrir environ 10 % de la consommation annuelle d'électricité du CERN, soit 140 GWh par an. En période de long arrêt de ses expériences scientifiques, cette part pourrait s'élever jusqu'à 25 %. Il convient de préciser que cette électricité n'est pas spécifiquement destinée à ses centres de données, mais alimente l'ensemble des infrastructures de l'Organisation²⁰⁰.

Bien que les centrales solaires apparaissent comme une solution pertinente pour améliorer l'efficacité énergétique des centres de données, plusieurs éléments doivent être pris en considération. La localisation d'un centre de données n'est pas toujours propice à l'installation d'une centrale solaire adjacente qui nécessite une grande surface. De plus, l'énergie solaire est une énergie intermittente qui ne peut produire de l'électricité qu'en journée et lorsque l'ensoleillement est suffisant. Cela constitue un inconvénient majeur pour les centres de données qui nécessitent une alimentation énergétique constante et stable pour assurer la disponibilité de leurs services²⁰¹.

L'énergie produite par la centrale solaire de Google permet en réalité seulement d'alimenter en énergie la station d'épuration du centre de données. Google doit ainsi

¹⁹⁹ Dimitri Picasso (Infomaniak), entretien avec l'auteur, 28 avril 2025.

²⁰⁰ Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), « CERN Signs Long-Term Solar Power Agreements, » 29 novembre 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://home.cern/fr/news/news/engineering/cern-signs-long-term-solar-power-agreements>.

²⁰¹ Google, « *Positive Energy: Belgian Site Becomes First Google Data Center to Add On-Site Solar* ». Google Sustainability (blog), 2018. Consulté le 25 août 2025, https://sustainability.google/intl/fr_fr/operating-sustainably/stories/belgium-solar/.

recourir à d'autres moyens pour alimenter les serveurs de son centre qui sont les équipements les plus énergivores. Pour atteindre son objectif de 100 % d'énergie renouvelable, Google recourt principalement à des contrats d'achat d'électricité pour se procurer « de l'énergie renouvelable directement auprès des producteurs des nouveaux parcs éoliens et fermes solaires²⁰² ». Il faut noter que l'énergie en réalité consommée n'est pas nécessairement renouvelable dans la mesure où le fonctionnement du réseau électrique ne permet pas de tracer le courant électrique et encore moins de consommer une énergie provenant directement d'un lieu de production spécifique²⁰³.

Énergie éolienne

Outre l'énergie solaire, les possibilités d'alimenter en électricité les centres de données à l'aide de l'énergie éolienne sont également exploitées. Cette énergie renouvelable convertit l'énergie du vent en électricité, notamment grâce à des éoliennes. Le fonctionnement d'une éolienne repose sur la rotation de ses pales mises en mouvement par le vent. Le rotor, généralement composé de trois pales et installé au sommet d'un mât pouvant atteindre 100 mètres, capte l'énergie cinétique du vent. Cette rotation entraîne un arbre situé dans la nacelle, relié à un alternateur, qui transforme l'énergie mécanique en courant électrique²⁰⁴. Les éoliennes peuvent être installées aussi bien sur terre qu'en mer. Celles en mer génèrent davantage d'électricité, avec une capacité de 8 à 12 MW contre 3 à 4 MW pour celles situées sur terre. Cela s'explique par le fait que les zones en mer et en altitude laissent le vent circuler plus librement avec moins de friction²⁰⁵.

Les géants du numérique ont recours à des partenariats avec des entreprises spécialisées pour acheter de l'électricité issue d'énergies éoliennes. Google, par

²⁰² Google, « *Positive Energy: Belgian Site Becomes First Google Data Center to Add On-Site Solar* ». Google Sustainability (blog), 2018. Consulté le 25 août 2025, https://sustainability.google/intl/fr_fr/operating-sustainably/stories/belgium-solar/.

²⁰³ Magarantiedorigine.com, « *Le guide complet sur les Garanties d'Origine* ». 2023. Consulté le 25 août 2025, <https://magarantiedorigine.com/guide-complet-sur-les-garanties-d-origine/>.

²⁰⁴ E EDF, « *Le fonctionnement d'une éolienne* ». 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.edf.fr/groupe-edf/comprendre/production/eolien/fonctionnement-eolienne>.

²⁰⁵ Julia Borgini, « *How to Use Data Center Wind Turbines for Sustainable Energy* ». *TechTarget*, 13 février 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/tip/How-to-use-data-center-wind-turbines-for-sustainable-energy>.

exemple, a des accords avec les Pays-Bas pour permettre à des éoliennes en mer d'alimenter en électricité les centres de données situées dans le pays. L'acteur suédois EcoDataCenter alimente ses centres de données exclusivement à partir d'énergies renouvelables, dont un quart provient de l'énergie éolienne²⁰⁶. Cependant, « *[the] wind power alone may not be sufficient to meet the large energy demands of modern data centers, especially those powering AI workloads*²⁰⁷ » ([l']énergie éolienne à elle seule pourrait ne pas suffire à répondre aux besoins énergétiques importants des centres de données modernes, en particulier ceux qui alimentent les charges de travail de l'intelligence artificielle [traduction libre]).

Sur un autre plan, l'entreprise allemande WestfalenWIND expérimente une approche innovante en implémentant des centres de données au sein même d'éoliennes. L'énergie produite alimente directement les serveurs installés dans les tours des éoliennes, des espaces initialement vides et inutilisés. L'initiative de ce projet est née du constat que le réseau électrique n'est pas en mesure d'absorber la grande quantité d'électricité produite par les éoliennes lors de vent fort, alors que cette énergie perdue pourrait alimenter un tiers de tous les centres de données allemands²⁰⁸. Ainsi, les centres de données sont alimentés de 85 à 92 % par les éoliennes lorsque la production est suffisante. Le reste du temps, ils sont alimentés par d'autres énergies renouvelables via le réseau électrique. Toutefois, cette approche ne peut pas répondre à tous les types de charges de travail et, d'après l'aveu même de l'entreprise, « *in 10 to 15 years, our concept won't have the pull effect anymore because everything is sustainable*²⁰⁹ » (dans 10 à 15 ans, notre concept n'aura plus d'effet d'attraction, car tout sera durable [traduction libre]).

²⁰⁶ Julia Borgini, « *How to Use Data Center Wind Turbines for Sustainable Energy* ». TechTarget, 13 février 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/tip/How-to-use-data-center-wind-turbines-for-sustainable-energy>.

²⁰⁷ Ibid.

²⁰⁸ CNN, « *Wind Turbines Could Power the Data Centers of the Future* ». 2023. Consulté le 25 août 2025, <https://edition.cnn.com/world/windcores-data-center-wind-turbines-climate-scen-spc-c2e/index.html>.

²⁰⁹ Ibid.

Énergie hydroélectrique

Les centres de données exploitent également l'énergie hydroélectrique, une énergie renouvelable produite dans les centrales hydrauliques. Celles-ci utilisent l'eau stockée dans un lac de retenue, formé en amont par un barrage, pour produire de l'électricité. L'eau est ensuite libérée dans des conduits, où la force du courant entraîne la rotation d'une turbine. Celle-ci entraîne un alternateur qui génère ainsi de l'électricité²¹⁰. Contrairement aux énergies solaires et éoliennes, l'hydroélectricité n'est pas une énergie intermittente²¹¹.

Les centrales hydrauliques sont utilisées dans certaines régions du monde telles que la Suède. « [Une] quinzaine de barrages hydroélectriques qui [...] jalonnent [le fleuve Luleälven] produisent une électricité abondante, bon marché et décarbonée pour les dizaines de [centres de données] établis dans la région²¹². » Celui de Facebook à Luleå est exclusivement alimenté par de l'énergie hydroélectrique²¹³. La province du Québec, au Canada, est également une région convoitée par les [centres de données] car « 97 % de l'électricité y est produite par des barrages hydroélectriques²¹⁴ ».

Stockage d'énergie par batterie

Les énergies solaires et éoliennes ne fournissent donc pas l'approvisionnement énergétique nécessaire aux activités des centres de données à cause de leur caractère intermittent. Il est alors possible de coupler l'usage de ces énergies renouvelables avec des systèmes de stockage d'énergie par batterie (BESS). Ceux-ci sont des dispositifs, comme leur nom l'indique, qui permettent de stocker de l'énergie sur des batteries afin de pouvoir la restituer ultérieurement. Ce système a l'avantage de pouvoir absorber l'excès d'électricité produit par les sources d'énergies

²¹⁰ EDF, « *Le fonctionnement d'un barrage hydroélectrique* ». 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.edf.fr/groupe-edf/comprendre/production/hydraulique/fonctionnement-barrage>.

²¹¹ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

²¹² *Ibid.*

²¹³ Meta Careers, « *Welcome to Facebook Luleå, Sweden* ». Meta Careers (blog), 2017. Consulté le 25 août 2025, <https://www.metacareers.com/blog/welcome-to-facebook-lulea-sweden/>.

²¹⁴ Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris : Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

renouvelables en cas de pic de production et dépassant la consommation du centre de données. Inversement, un approvisionnement énergétique insuffisant des centres de données par des énergies renouvelables sera compensé par le stock des BESS. De plus, les BESS contribuent à réduire la dépendance des centres de données aux UPS, ces batteries de secours temporaires étudiées précédemment. Elles peuvent apporter plusieurs heures d'approvisionnement en énergie en plus des UPS, ce qui permet de réduire également leur dépendance aux générateurs alimentés en hydrocarbures lorsque les UPS n'assurent plus le relais²¹⁵.

3.1.2 L'autoproduction d'énergie nucléaire

En complément des énergies renouvelables, les géants du numérique investissent dans leur propre production d'énergie nucléaire pour satisfaire les besoins énergétiques toujours plus grands de leurs centres de données²¹⁶. L'énergie nucléaire est la source d'énergie la plus abondante et la deuxième plus grande source d'électricité à faible émission de dioxyde de carbone, après l'hydroélectricité²¹⁷. Son rendement énergétique élevé ainsi que sa capacité à produire de l'énergie en continu en font une solution stratégique aux énergies fossiles et renouvelables intermittentes.

Un autre avantage indéniable de l'énergie nucléaire est la sécurité de l'approvisionnement énergétique. Les réacteurs nucléaires sont sous la responsabilité et la gestion des géants du Web. Ces derniers peuvent alors répondre à leurs propres besoins énergétiques. Ils réduisent leur dépendance aux réseaux électriques traditionnels sur lesquels ils n'ont pas de marge de manœuvre au niveau de l'approvisionnement²¹⁸.

²¹⁵ Schneider Electric, « *Understanding BESS: Battery Energy Storage Systems for Data Centers* », White Paper 185, 2024. Consulté le 25 août 2025, https://www.se.com/ww/en/download/document/SPD_WP185_EN.

²¹⁶ Alexandre Piquard, « *Les géants du numérique se convertissent au nucléaire* ». *Le Monde*, 23 septembre 2024. Consulté le 25 août 2025, https://www.lemonde.fr/economie/article/2024/09/23/les-geants-du-numerique-se-convertissent-au-nucleaire_6329378_3234.html.

²¹⁷ Schneider Electric, « *Small Modular Nuclear Reactors Suitability for Data Centers* », White Paper 186, 2024. Consulté le 25 août 2025, https://www.se.com/ww/en/download/document/SPD_WP186_EN/.

²¹⁸ *Ibid.*

L'énergie nucléaire présente un bilan carbone avantageux avec des émissions inférieures à 50 grammes de dioxyde de carbone par kWh. Ce niveau est plus faible que celui de l'électricité produite à partir du gaz, qui atteint environ 450 grammes de dioxyde de carbone par kWh, et du charbon, avec environ 1050 grammes de dioxyde de carbone par kWh²¹⁹. Une centrale nucléaire d'une capacité d'1 GW génère 0,03 kg de déchets par MWh. En comparaison, les centrales au charbon produisent près de 90 kg de cendres par MWh, en plus des importantes émissions de dioxyde de carbone. L'énergie éolienne est plus favorable que l'énergie nucléaire sur ce plan avec 0,16 kg de déchets par MWh, tandis que l'énergie photovoltaïque en produit 1,67 kg²²⁰.

Les petits réacteurs nucléaires modulaires, en anglais *Small Modular Reactors* (SMR), sont une solution prometteuse pour les géants du Web. Le principe est similaire à celui des réacteurs nucléaires traditionnels. Le combustible nucléaire, comme l'uranium enrichi, dégage de la chaleur dans le cœur du réacteur, laquelle est transmise à un fluide tel qu'un métal liquide ou un gaz. Celui-ci va à son tour faire bouillir de l'eau qui sera transformée en vapeur d'eau sous haute pression. Cette vapeur est acheminée vers des turbines qui tournent sous l'effet de la pression et génèrent ainsi de l'électricité. En plus d'un rejet de dioxyde de carbone et de déchets moindres, le terrain nécessaire à un SMR est plus petit. Il nécessite 360 fois moins de surface que l'éolien et 75 fois moins que le solaire pour la même production électrique. Un ensemble modulaire complet peut tenir sur une surface équivalente à celle d'un terrain de football²²¹.

Dans le même temps, les annonces de géants du Web se multiplient en faveur de l'exploitation de réacteurs nucléaires. Microsoft a annoncé en septembre 2024 le redémarrage d'un réacteur de la centrale nucléaire de Three Mile Island, en Pennsylvanie, aux Etats-Unis. Il pourra produire à partir de 2028 environ 837 mégawatts (MW), soit l'équivalent de la consommation de 800 000 foyers²²². Un autre acteur, Oracle, se lance dans la conception d'un nouveau centre de données

²¹⁹ *Ibid.*

²²⁰ *Ibid.*

²²¹ *Ibid.*

²²² Alexandre Piquard. « Les géants du numérique se convertissent au nucléaire ». *Le Monde*, 23 septembre 2024. Consulté le 25 août 2025, https://www.lemonde.fr/economie/article/2024/09/23/les-geants-du-numerique-se-convertissent-au-nucleaire_6329378_3234.html.

de plus d'un gigawatt de puissance électrique afin de répondre à ses besoins de calcul pour l'entraînement de modèles d'intelligence artificielle. L'alimentation électrique sera assurée par trois petits réacteurs nucléaires modulaires²²³. Google a mandaté une start-up pour le développement de sept mini-réacteurs nucléaires de nouvelle génération pour alimenter en électricité des centres de données dédiés à l'intelligence artificielle. Ils pourront produire une puissance de 500 MW, soit les besoins nécessaires d'un seul centre de données²²⁴.

Le directeur d'OpenAI, Sam Altman, considère que les besoins en énergie de l'intelligence artificielle ne pourront pas être satisfaits avec le modèle nucléaire actuel et investit dans le développement de la fusion nucléaire. Celle-ci constituerait une avancée scientifique permettant de libérer bien plus d'énergie que la fission nucléaire des centrales actuelles²²⁵.

3.2 L'OPTIMISATION DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE

Outre les stratégies des centres de données en matière de production d'électricité, les efforts portent également sur l'optimisation de leur consommation énergétique. Ces infrastructures recourent à différentes techniques comme le refroidissement des serveurs tout en consommant le moins d'énergie possible. Avant d'aborder ces techniques, il est essentiel de comprendre ce qu'est le PUE.

L'indicateur d'efficacité énergétique, communément appelé PUE (tiré de l'anglais *Power Usage Effectiveness*), est largement utilisé pour évaluer l'efficacité énergétique des centres de données. Introduit en 2007 par le consortium The Green Grid, le PUE se calcule en divisant la consommation totale d'énergie du centre de données par l'énergie consommée uniquement par les équipements informatiques comme les serveurs et le réseau LAN. Plus la valeur se rapproche de 1, plus le centre de données dédie une part importante de son énergie aux équipements informatiques et non au reste de

²²³ *Ibid.*

²²⁴ Le Courrier International, « Énergie : Google s'offre sept mini-réacteurs nucléaires pour alimenter ses centres de données ». *Le Courrier International*, 2024. Consulté le 25 août 2025, https://www.courrierinternational.com/article/energie-google-s-offre-sept-minireacteurs-nucleaires-pour-alimenter-ses-centres-de-donnees_223407.

²²⁵ Alexandre Piquard. « Les géants du numérique se convertissent au nucléaire ». *Le Monde*, 23 septembre 2024. Consulté le 25 août 2025, https://www.lemonde.fr/economie/article/2024/09/23/les-geants-du-numerique-se-convertissent-au-nucleaire_6329378_3234.html.

l'infrastructure comme le système de refroidissement²²⁶. Un PUE de 2, par exemple, signifie que le centre de données consomme autant d'énergie pour ses équipements informatiques que pour le reste de l'infrastructure.

Toutefois, même si le PUE est devenu un standard, cette métrique présente toutefois des limites. Bien qu'il soit fréquemment utilisé comme un argument marketing, ce n'est pas sa vocation. Le PUE devrait rester un indicateur à usage interne, pour évaluer la performance énergétique d'un centre de données et pour l'améliorer. Par ailleurs, sa précision est souvent remise en question : certaines données utilisées dans son calcul sont basées sur des estimations, ce qui affecte son exactitude²²⁷.

En complément du PUE, il existe d'autres indicateurs pour évaluer les performances des centres de données. En 2011, The Green Grid a introduit le WUE (*Water Usage Effectiveness*), un indicateur mesurant l'efficacité en matière de consommation d'eau. Il se calcule en divisant la quantité d'eau utilisée par l'énergie électrique consommée pour alimenter les équipements informatiques²²⁸. Un autre indicateur, le CUE (*Carbon Usage Effectiveness*), vient enrichir cette évaluation en intégrant les impacts environnementaux. Il représente le rapport entre les émissions totales de dioxyde de carbone et la consommation électrique des équipements informatiques. Le CUE peut être obtenu simplement en multipliant le PUE par le facteur d'émission de dioxyde de carbone correspondant à la source d'électricité utilisée²²⁹.

3.2.1 Le refroidissement des serveurs

Le refroidissement est essentiel au bon fonctionnement des serveurs, mais il représente aussi l'un des plus grands postes de consommation d'énergie. En effet, ce processus peut mobiliser jusqu'à 40 % de l'électricité allouée à un centre de données. Pour répondre à ces enjeux d'efficacité, des techniques d'optimisation existent que

²²⁶ Margerie Guilliot, Raphaël Lemaire, et Sylvain Reverault, *Green IT* (Saint-Herblain: Éditions ENI, 2024).

²²⁷ A. G. Fleitas, « *What Is Data Center PUE? Defining Power Usage Effectiveness* ». *Data Center Knowledge*, 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.datacenterknowledge.com/sustainability/what-is-data-center-pue-defining-power-usage-effectiveness#Issues%20with%20Power%20Usage%20Effectiveness>.

²²⁸ Hwaiyu Geng, *Data Center Handbook* (Hoboken, NJ: Wiley, 2015). ISBN 978-1118436639.

²²⁹ *Ibid.*

l'on peut classer en deux grandes catégories : le refroidissement par l'air et le refroidissement par eau.

3.2.1.1 Le refroidissement par air

Le principe des allées chaudes et froides

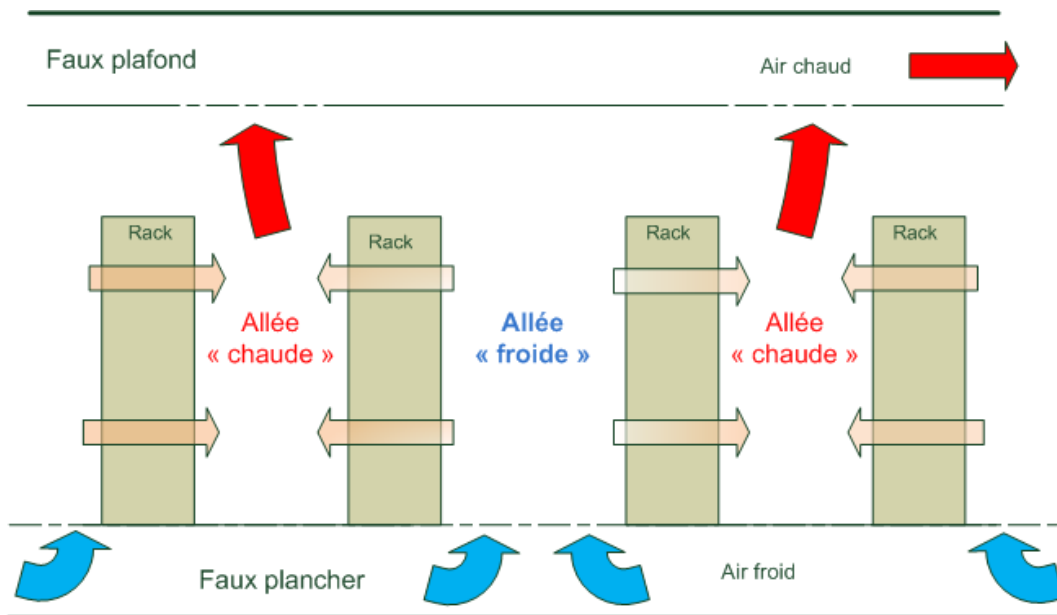


Figure 6 : Schéma du fonctionnement des allées chaudes et froides²³⁰

La séparation des flux d'air est un principe que l'on retrouve dans les techniques de refroidissement par air. En effet, le système d'allées chaudes et froides est une solution largement répandue dans les centres de données pour optimiser le refroidissement des serveurs. Ce système fonctionne grâce à une circulation de l'air prédéfinie et à l'agencement spécifique des baies de serveurs. Les baies sont placées en rangées parallèles et sont séparées par des espaces vides appelés allées entre chaque rangée où l'air circule. Les faces avant des baies, où l'air froid entre, sont orientées face à face pour créer les allées froides. Inversement, les faces arrière des baies, par lesquelles l'air chaud est expulsé, sont également orientées face à face pour former les allées chaudes. L'air froid est acheminé depuis la centrale de

²³⁰ Wikimedia Commons, *Datacenter Cooling*, illustration numérique, consulté le 20 août 2025, https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Datacenter_cooling.png.

traitement de l'air dans les allées froides via le plancher. Les baies aspirent cet air froid pour se refroidir, puis rejettent l'air réchauffé dans les allées chaudes. L'air est ensuite, soit rejeté à l'extérieur de l'infrastructure, soit capté dans un système de récupération de chaleur pour être réutilisé²³¹.

Le refroidissement par air de manière directe

Le refroidissement des centres de données, comme celui de Facebook à Luleå en Suède²³², peut être réalisé grâce à de l'air froid extérieur. Celui-ci est capté par des prises d'air extérieures équipées de grilles de protection pour permettre seulement à l'air d'entrer. L'air extérieur est acheminé dans une centrale de traitement de l'air. Elle permet, dans un premier temps, de filtrer l'air extérieur par plusieurs niveaux de filtres successifs afin de capturer les particules indésirables et néfastes pour les composants du centre de données à refroidir tels que de la poussière, du pollen ou des particules fines. Une fois l'air extérieur filtré, il est acheminé dans une autre section de la centrale de traitement de l'air où sa température et son humidité sont régulées. Le débit d'air est également contrôlé pour assurer un flux d'air homogène. L'air ainsi filtré et conditionné est ensuite acheminé vers le système de confinement des allées chaudes et froides du centre de données²³³. Grâce à cette méthode d'une grande efficacité, Facebook consacre très peu d'électricité au refroidissement de son centre de données suédois. 90 % de l'électricité consommée sert à alimenter les serveurs, ce qui correspond à un PUE d'environ 1,1²³⁴.

Le refroidissement par air de manière indirecte

Infomaniak a récemment installé un nouveau centre de données près de Genève, à Plan-les-Ouates, en Suisse. Il a été conçu pour soutenir les activités de l'entreprise,

²³¹ Hwaiyu Geng, *Data Center Handbook* (Hoboken, NJ: Wiley, 2015). ISBN 978-1118436639.

²³² Yves Eudes, « *Les datas du grand froid* ». *Le Monde*, 3 juin 2016. Consulté le 25 août 2025, https://www.lemonde.fr/pixels/article/2016/06/03/les-datas-du-grand-froid_4932566_4408996.html.

²³³ Hwaiyu Geng, *Data Center Handbook* (Hoboken, NJ: Wiley, 2015). ISBN 978-1118436639.

²³⁴ Yves Eudes, « *Les datas du grand froid* ». *Le Monde*, 3 juin 2016. Consulté le 25 août 2025, https://www.lemonde.fr/pixels/article/2016/06/03/les-datas-du-grand-froid_4932566_4408996.html.

notamment les services cloud délivrés à ses clients, qu'il s'agisse de stockage de données ou de capacité de calcul. Le D4 se distingue grâce à son approche novatrice en matière de refroidissement et de valorisation d'énergie. Il est implanté sous terre dans un écoquartier dont le chauffage est assuré par la récupération de la chaleur fatale générée par les serveurs²³⁵. Le fonctionnement de ce système novateur repose sur trois boucles fermées partant des serveurs jusqu'à l'échangeur air-eau, puis jusqu'aux pompes à chaleur et enfin au chauffage urbain.

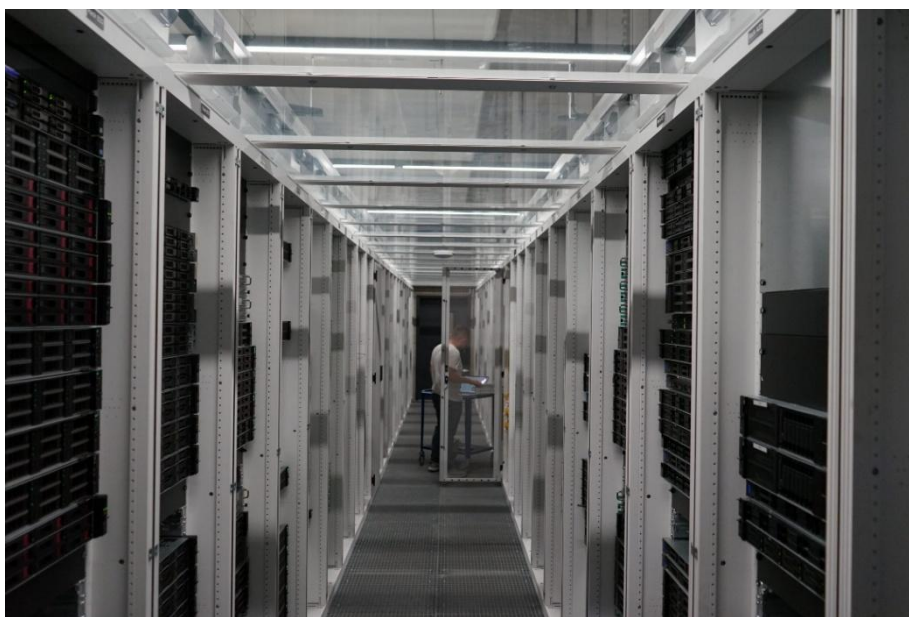


Figure 7 : Photographie des allées chaudes du D4²³⁶

Dans un premier temps, de nombreux composants du D4, notamment les serveurs, consomment de l'électricité et rejettent une grande quantité de chaleur sous forme d'air chaud à environ 45 °C. Contrairement à de nombreux centres de données où cette chaleur est simplement rejetée dans l'atmosphère, cet air chaud est conservé au sein du centre de données et est acheminé par des ventilateurs vers un échangeur air-eau, qui transfère l'énergie thermique de l'air vers l'eau. L'air est ainsi refroidi

²³⁵ Clubic, « *Un data center construit sous des habitations revalorise 100 % de son énergie : visite guidée d'une installation hors norme* ». 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.clubic.com/actualite-528513-un-data-center-construit-sous-des-habitations-revalorise-100-de-son-energie-visite-guidee-d-une-installation-hors-norme.html>.

²³⁶ Enterprise for Society Center, *Photographie des allées chaudes du D4*, photographie numérique. <https://d4project.org/technical-guide/>.

à 28 °C, une température optimale pour permettre le refroidissement des serveurs. L'air est renvoyé dans les allées froides du système de circulation de l'air et va se réchauffer en traversant les serveurs afin de les refroidir. La récupération de la chaleur ne se limite pas aux serveurs mais inclut également des composants tels que les onduleurs, les caméras de sécurité ou encore les tableaux électriques. Ce processus forme une première boucle fermée²³⁷. Les deux boucles suivantes portent sur la valorisation de l'énergie et seront détaillées dans la partie 3.3.1 du mémoire de recherche.

Le refroidissement adiabatique

Il existe également une technique de refroidissement exploitant le principe naturel d'évaporation : le refroidissement adiabatique. Ce procédé repose sur le transfert de chaleur généré lors du passage d'un liquide à l'état gazeux, ce qui entraîne une baisse de température. Dans les centres de données, cette technique consiste à aspirer de l'air extérieur et à le refroidir en y faisant s'évaporer de l'eau à l'aide de tampons de refroidissement et de ventilateurs. Soit cet air refroidi est envoyé directement vers les serveurs, ce qui correspond au refroidissement adiabatique direct, soit, dans le cas du refroidissement indirect privilégié par les infrastructures critiques qui ne peuvent tolérer d'humidité, cet air est envoyé vers un échangeur thermique. Il y croise un second circuit d'air fermé qui a capté la chaleur des serveurs. L'échange thermique qui s'opère refroidit l'air de ce circuit interne, qui est ensuite renvoyé vers les serveurs²³⁸. Cette technique est utilisée dans le nouveau centre de données du CERN sur le site de Prévessin-Moëns²³⁹.

²³⁷ Enterprise for Society Center, « *D4 Project: Technical Guide* ». Consulté le 25 août 2025, <https://d4project.org/technical-guide/>.

²³⁸ Engie, « *Climatisation adiabatique : définition, avantages et inconvénients* ». ENGIE Particuliers. Consulté le 25 août 2025, <https://particuliers.engie.fr/depannages-services/conseils-equipements-chauffage/conseils-installation-climatisation/climatisation-adiabatique-maison.html>.

²³⁹ Équans, « *Un Data Center éco-responsable au service des besoins scientifiques* ». 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.equans.fr/nous-decouvrir/nos-realisations/un-data-center-eco-responsable-au-service-des-besoins-scientifiques>.

3.2.1.2 Le refroidissement par eau

Le refroidissement par eau froide naturelle



Figure 8 : Réseau de tuyauterie des pompes à chaleur de la centrale thermique de l'École polytechnique fédérale de Lausanne²⁴⁰

Afin d'approfondir notre compréhension des stratégies mises en place par des centres de données pour optimiser leur consommation énergétique, nous nous sommes rendus à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), en Suisse, en février 2025. L'EPFL est une université technique reconnue dans le domaine des sciences et de la technologie²⁴¹. Une visite de la centrale thermique a permis de comprendre le fonctionnement de cette infrastructure récemment rénovée qui a la particularité de fonctionner en synergie avec un centre de données présent dans le même bâtiment.

La centrale thermique de l'EPFL repose sur l'utilisation de pompes à chaleur qui permettent à la fois de refroidir et de chauffer les bâtiments du campus universitaire,

²⁴⁰ Tom Barthélémy. Réseau de tuyauterie des pompes à chaleur de la centrale thermique de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, photographie numérique, 2025.

²⁴¹ École polytechnique fédérale de Lausanne, « À propos », EPFL. Consulté le 25 août 2025, <https://www.epfl.ch/about/fr/>.

mais aussi de refroidir les serveurs du centre de données. Ce système exploite l'eau froide du Lac Léman avoisinant prélevée à une profondeur de 75 mètres, où sa température est stable à 7 °C²⁴². Cette eau transite ensuite jusqu'au centre de données où elle est filtrée afin de devenir une eau industrielle. Elle circule au niveau des portes des allées de serveurs sur une surface de 1 000 mètres carrés afin de refroidir les serveurs. Une fois l'opération effectuée, l'eau sortante atteint une température variant entre 24 et 28 °C. Elle est ensuite redirigée vers les pompes à chaleur de la centrale thermique. « Grâce au processus thermodynamique de compression, condensation, détente et évaporation²⁴³ », l'eau est élevée à une température de 67 °C afin de chauffer les installations de l'EPFL. Ces efforts permettent au centre de données d'afficher un PUE de 1,15 qui devrait prochainement atteindre 1,1 tout en proposant des services de stockage et de calcul consommant 4 MW.

Cette initiative permet une optimisation énergétique importante, avec une réduction de 60 % de la consommation électrique par rapport à un système conventionnel grâce à la valorisation de la chaleur issue du centre de données²⁴⁴. Au-delà de ce dernier, la centrale thermique rénovée permet à l'EPFL de se passer complètement de mazout pour son chauffage et le refroidissement de son centre de données ainsi que d'atteindre une part de 85 % d'énergies renouvelables. Des chaudières à gaz sont également toujours installées et ne serviront qu'en cas de panne du système principal.

L'immersion de centre de données dans l'eau

Dans le cadre du projet Natick, Microsoft a immergé un centre de données dans l'eau à des fins de recherche. Une première phase du projet a été menée en 2015 pendant trois mois au large de la côte Pacifique des États-Unis, ce qui a permis de prouver la faisabilité du concept. Fort de ces résultats, une seconde phase s'est déroulée de 2018 à 2020 au large des îles Orcades en Écosse. Le centre de données était immergé dans une zone d'expérimentation du Centre Européen des Énergies Marines qui

²⁴² École polytechnique fédérale de Lausanne, « Une centrale de chauffe qui cumule les énergies », EPFL, 2022. Consulté le 25 août 2025, <https://actu.epfl.ch/news/une-centrale-de-chauffe-qui-cumule-les-energies--3/>.

²⁴³ *Ibid.*

²⁴⁴ *Ibid.*

étudie la production d'énergie renouvelable en exploitant la force des vagues et des courants marins. Cette seconde phase a permis d'évaluer les performances et la durabilité de cette approche²⁴⁵.

Prenant la forme d'un cylindre de 12 mètres de long et de 2 mètres de large, le centre de données contient 12 baies de stockage qui regroupent un total de 864 serveurs d'une capacité de stockage de 27,6 pétaoctets, soit près de 28 millions de gigaoctets. Sa consommation électrique s'élève à 240 kW²⁴⁶. L'un des principaux avantages du projet Natick réside dans son optimisation de l'efficacité énergétique. Le système fonctionne grâce à un échangeur thermique. Le centre de données est refroidi grâce à l'eau de mer présente dans son environnement immédiat. Elle est aspirée dans le centre de données, un échangeur air-eau convertit l'eau en air froid qui va traverser les serveurs pour les refroidir. L'air chaud est converti en eau chaude qui est rejetée dans la mer²⁴⁷. Ce système permet d'atteindre un PUE bas de 1,07.

En plus du refroidissement, le centre de données sous-marin a l'avantage de pouvoir être déployé rapidement, en moins de 90 jours, alors que ce processus sur terre ferme peut prendre plusieurs années²⁴⁸. Il permet également de diminuer la latence de la transmission des données dans une stratégie d'*edge computing* en étant installé au plus près des utilisateurs vivant près des côtes²⁴⁹.

Les dysfonctionnements des serveurs sous-marins ont été moindres que sur la terre ferme. Les 864 serveurs ont été comparés à 135 autres serveurs similaires et fonctionnant avec la même charge de travail. Sur les 864 serveurs immergés dans l'eau, 6 sont tombés en panne. Alors que sur les 135 serveurs situés sur la terre ferme, 8 d'entre eux ont cessé de fonctionner, soit un taux de panne 8 fois plus élevé

²⁴⁵ Microsoft, « *Microsoft's Underwater Datacenter: Project Natick* ». Microsoft Source (blog), 2016. Consulté le 25 août 2025, <https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/project-natick-underwater-datacenter/>.

²⁴⁶ Peter Judge, « *Project Natick: Microsoft's Underwater Voyage of Discovery* ». *Data Center Dynamics*, 2021. Consulté le 25 août 2025, <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/project-natick-microsofts-underwater-voyage-discovery/>.

²⁴⁷ *Ibid.*

²⁴⁸ Fanny Lopez, *À bout de flux* (Paris: Éditions Divergences, 2022). ISBN 979-1097088507.

²⁴⁹ Microsoft, « *Microsoft's Underwater Datacenter: Project Natick* ». Microsoft Source (blog), 2016. Consulté le 25 août 2025, <https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/project-natick-underwater-datacenter/>.

que les serveurs sous-marins²⁵⁰. Contrairement aux centres de données terrestres, l'intérieur du centre n'est pas rempli d'oxygène mais d'azote. Il s'avère que l'utilisation de ce gaz moins corrosif que l'oxygène a permis de réduire les dysfonctionnements des serveurs²⁵¹.

Bien que l'utilisation d'énergies renouvelables ne soit pas un des objectifs de ce projet, le centre de données sous-marin a bénéficié du réseau électrique des îles Orcades. Celles-ci produisent assez d'énergie pour couvrir leurs propres besoins, y compris pour le centre de données sous-marin. Cette énergie est exclusivement issue de ressources renouvelables et le surplus de production est réinjecté dans le réseau électrique écossais²⁵².

En 2024, Microsoft a annoncé la fin du projet Natick. Les données obtenues lors des deux phases d'expérimentation permettront d'améliorer les centres de données existants et futurs. Microsoft ne compte pas investir davantage dans cette approche et préfère concentrer ses recherches sur l'alimentation de centres de données terrestres par des mini-réacteurs nucléaires comme évoqué précédemment²⁵³.

3.2.2 La virtualisation

La virtualisation est une technique permettant d'optimiser l'énergie consommée par un centre de données. Auparavant, chaque serveur physique était dédié à une seule tâche, ce qui entraînait une prolifération de serveurs sous-utilisés et une consommation énergétique inefficace. Grâce à la virtualisation, il est possible de faire cohabiter plusieurs tâches sur un même serveur physique grâce à des machines virtuelles. Ce fonctionnement permet d'optimiser l'utilisation des ressources et de réduire le nombre de serveurs nécessaires²⁵⁴. Par exemple, au CC-IN2P3, une

²⁵⁰ Peter Judge, « *Project Natick: Microsoft's Underwater Voyage of Discovery* ». *Data Center Dynamics*, 2021. Consulté le 25 août 2025, <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/project-natick-microsofts-underwater-voyage-discovery/>.

²⁵¹ Microsoft, « Microsoft's Underwater Datacenter: Project Natick, » Microsoft Source (blog), 2016, <https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/project-natick-underwater-datacenter/>.

²⁵² *Ibid.*

²⁵³ Jacques Cheminat, « *Microsoft abandonne son projet de datacenter sous-marin* ». *Le Monde Informatique*, 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-microsoft-abandonne-son-projet-de-datacenter-sous-marin-94098.html>.

²⁵⁴ Margerie Guilliot, Raphaël Lemaire, et Sylvain Reverault, *Green IT* (Saint-Herblain : Éditions ENI, 2024).

cinquantaine de serveurs physiques permettent de faire fonctionner environ 3 000 serveurs virtuels²⁵⁵. Les fournisseurs de services cloud poussent davantage la virtualisation en hébergeant les machines virtuelles de plusieurs clients sur un même serveur, en déployant des réseaux virtuels partagés ou en stockant plusieurs volumes de disques virtuels sur un même support de stockage de données. Cela permet d'optimiser les équipements physiques et de créer une virtualisation bien plus poussée que ce qu'une entreprise peut réaliser seule²⁵⁶.

3.2.3 Les supports de stockage

Au-delà de la virtualisation qui optimise l'usage des serveurs, le choix des supports de stockage est important pour maîtriser l'efficacité énergétique d'un centre de données. La stratégie mise en œuvre par des centres de données comme le CC-IN2P3 consiste en la hiérarchisation du stockage afin d'utiliser au mieux les performances des différents supports de stockage²⁵⁷.

Les SSD sont utilisés comme une mémoire cache afin de capter rapidement les données entrantes dans le centre de calcul grâce à leur capacité d'écriture élevée. Les données captées sont ensuite migrées plus bas dans la hiérarchie, sur des HDD pour le stockage chaud ou vers des bandes magnétiques pour le stockage froid²⁵⁸.

Au CC-IN2P3, la consommation énergétique des supports de stockage ne représente qu'un tiers de l'énergie allouée aux équipements informatiques, les deux tiers restants étant consacrés au calcul, beaucoup plus énergivore en raison des processeurs. Ce tiers de l'énergie consommée attribué au stockage reste relativement faible, notamment parce que les bandes magnétiques, bien moins consommatrices d'énergie, représentent à elles seules une capacité de stockage quatre fois supérieure à celle des HDD et des SSD combinés. Actuellement, les bandes magnétiques Jaguar Serie E de 20 téraoctets de la marque IBM sont utilisées car elles présentent le meilleur coût total de possession, c'est-à-dire qu'elles possèdent le meilleur

²⁵⁵ Benoit Delaunay (CC-IN2P3), entretien avec l'auteur, 5 juin 2024.

²⁵⁶ Margerie Guilliot, Raphaël Lemaire, et Sylvain Reverault, *Green IT* (Saint-Herblain : Éditions ENI, 2024).

²⁵⁷ Benoit Delaunay (CC-IN2P3), entretien avec l'auteur, 5 juin 2024.

²⁵⁸ *Ibid.*

compromis entre le coût, la performance et la consommation énergétique sur 5 ans²⁵⁹.

3.3 LA VALORISATION DE L'ÉNERGIE THERMIQUE

En complément des différentes mesures mises en œuvre pour la production d'énergie et pour l'optimisation de la consommation énergétique, les centres de données s'orientent également dans une nouvelle démarche : celle de la valorisation de l'énergie thermique produite par le fonctionnement de leurs équipements informatiques. Cette initiative permet principalement de répondre à des motivations réputationnelles et à des volontés internes. Autrefois considérée comme un déchet destiné à être rejeté dans l'atmosphère, la chaleur dégagée par les serveurs des centres de données, également appelée chaleur fatale, devient aujourd'hui une ressource précieuse. Cette valorisation permet de chauffer des infrastructures, comme des habitations, des bâtiments industriels ou des équipements publics notamment des piscines. En parallèle, des projets de recherche sont actuellement menés afin d'identifier de nouvelles manières d'exploiter cette chaleur.

3.3.1 Le chauffage urbain

Nous allons poursuivre l'exemple du centre de données d'Infomaniak D4 en nous intéressant de manière technique au fonctionnement du système de récupération de la chaleur. Dans le paragraphe 3.2.1 consacré aux différentes techniques de refroidissement, nous avons expliqué la manière dont les serveurs sont maintenus à une température stable et optimale. Ce système de récupération de la chaleur s'appuie sur cette technique, formant une première boucle qui est elle-même complétée par deux autres boucles.

Dans la première boucle qui assure le refroidissement des serveurs, l'échangeur air-eau capte la chaleur dégagée par les serveurs et la transfère à un circuit d'eau à une température de 45 °C. Cependant, cette température n'est pas assez élevée pour

²⁵⁹ Benoit Delaunay (CC-IN2P3), entretien avec l'auteur, 5 juin 2024.

permettre directement de chauffer des habitations. Sa température doit encore être augmentée avant de la rendre exploitable²⁶⁰.

Afin d'élever la température de l'eau, le système comprend une deuxième boucle qui repose sur l'utilisation de pompes à chaleur. Cette boucle intermédiaire assure le lien entre la première et la troisième boucle. L'eau chauffée à 45 °C par l'échangeur air-eau est alors acheminée dans des pompes à chaleur. Cette eau va dilater un gaz en transférant son énergie thermique et va donc se refroidir à 28 °C. L'eau refroidie est alors renvoyée en direction de l'échangeur air-eau et sera à nouveau chauffée par la chaleur produite par les serveurs du centre de données²⁶¹.

Dans la troisième et dernière boucle du système, le gaz dilaté par l'eau chaude sortant de l'échangeur air-eau est alors comprimé, ce qui va augmenter sa température. Cette énergie produite est ensuite transférée à un dernier circuit d'eau destiné au chauffage des bâtiments. Cette eau atteint alors 67 voire 82 °C en fonction de la saison²⁶².

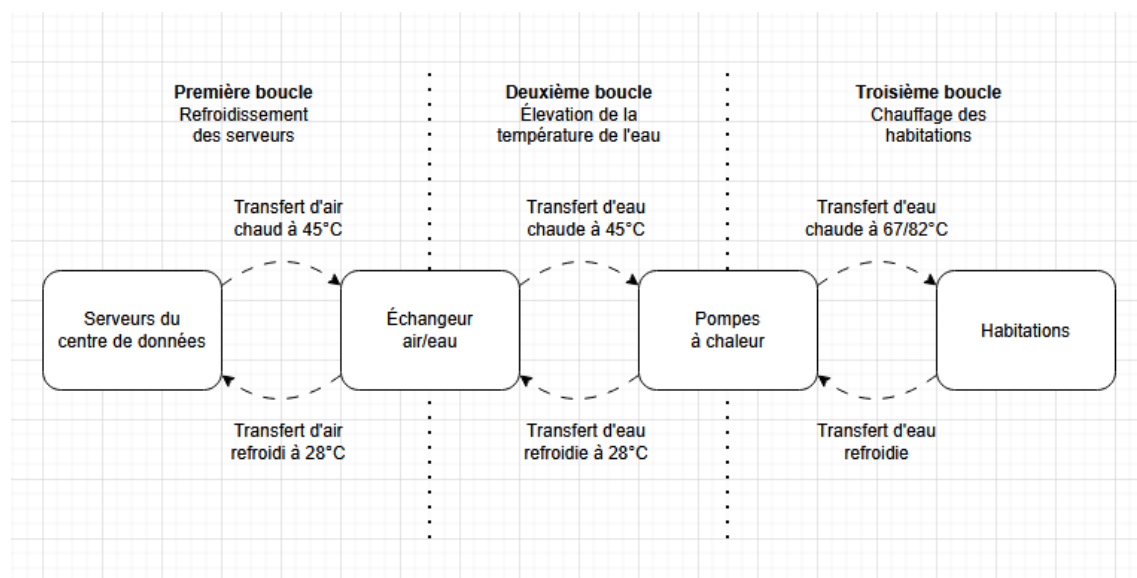


Figure 9 : Schéma de la valorisation de l'énergie thermique du centre de données D4 d'Infomaniak²⁶³

²⁶⁰ Enterprise for Society Center, « D4 Project: Technical Guide ». Consulté le 20 août 2025, <https://d4project.org/technical-guide/>.

²⁶¹ *Ibid.*

²⁶² *Ibid.*

²⁶³ *Ibid.*

Ce procédé permet de chauffer environ 6 000 logements durant la période hivernale ou de fournir de l'eau chaude à environ 20 000 personnes. Ce système fonctionne en circuit fermé et permet une valorisation quasi-totale de l'énergie consommée par le centre de données. « À pleine capacité, le [centre de données] consommera 1,25 MWh d'électricité, qui sera transformée en 1,25 MWh d'air chaud à 45 °C²⁶⁴. »

Le centre de données fonctionne en continu afin d'assurer une disponibilité permanente des services qu'il héberge. Toutefois, dans certaines situations, la chaleur excédentaire produite par les serveurs peut ne pas pouvoir être envoyée vers les habitations pour être valorisée. Cela peut se produire par exemple en cas de défaillance du système de transfert thermique, d'une demande énergétique insuffisante du réseau de chauffage urbain ou encore lors d'opérations de maintenance. Un mode de secours est prévu afin de garantir la dissipation de cette chaleur, l'air chaud est alors directement rejeté dans l'atmosphère. Cela permet d'éviter toute surchauffe des installations internes et assure ainsi la continuité du fonctionnement du centre de données²⁶⁵.

3.3.2 Les projets de recherche

Il convient également de mentionner le projet d'Eco Cloud de l'École polytechnique fédérale de Lausanne qui explore de nouvelles méthodes pour valoriser la chaleur fatale dégagée par les centres de données. L'un des axes de recherche consiste à convertir la chaleur des processeurs, composants indispensables des serveurs, en électricité afin d'être réinjectée dans le réseau électrique du centre de données. Ce système fonctionne grâce à des cycles organiques de Rankine²⁶⁶. Ce procédé thermodynamique fonctionne à l'inverse d'une pompe à chaleur. La chaleur résiduelle issue des processeurs alimente un évaporateur, qui transforme un fluide

²⁶⁴ Clubic, « *Un data center construit sous des habitations revalorise 100 % de son énergie : visite guidée d'une installation hors norme* ». 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.clubic.com/actualite-528513-un-data-center-construit-sous-des-habitations-revalorise-100-de-son-energie-visite-guidee-d-une-installation-hors-norme.html>.

²⁶⁵ *Ibid.*

²⁶⁶ École polytechnique fédérale de Lausanne, « *Waste heat to electricity – Heating Bits* ». *Heating Bits*. Consulté le 25 août 2025, <https://heatingbits.epfl.ch/research/waste-heat-to-electricity/>.

organique en vapeur. Cette vapeur entraîne ensuite une turbine qui génère de l'électricité²⁶⁷. Selon les données de l'EPFL, un processeur dissipant une puissance thermique de 50 kW permet de produire une puissance électrique nette de 4 à 5 kW, qui est directement injectée dans le réseau électrique du centre de données²⁶⁸.

²⁶⁷ Alfa Laval, « *Récupérer la chaleur fatale basse température par machine ORC (Cycle organique de Rankine)* ». Consulté le 25 août 2025, <https://www.alfalaval.fr/industries/energies-et-des-utiles/sustainable-solutions/solutions-durables/efficacite-energetique/recuperation-chaleur-residuelle/orc-cycle-organique-de-rankine>.

²⁶⁸ École polytechnique fédérale de Lausanne, « *Waste heat to electricity – Heating Bits* ». *Heating Bits*. Consulté le 25 août 2025, <https://heatingbits.epfl.ch/research/waste-heat-to-electricity/>.

CONCLUSION

Tout au long de ce mémoire de recherche, nous nous sommes intéressés aux rapports qu'entretiennent les centres de données, infrastructures cruciales pour le traitement, la circulation et le stockage de données dans le réseau informatique, avec l'efficacité énergétique, définie comme étant les mesures visant à optimiser leur consommation énergétique importante. L'objectif de ce travail était d'étudier les facteurs motivant les responsables de centres de données à investir dans des stratégies d'efficacité énergétique.

Dans la première partie, nous avons mobilisé différents concepts afin de nous faire une représentation concrète de ce qu'est un centre de données. Nous avons retracé leur historique, depuis les *mainframes* développés par des organismes publics et l'armée américaine dans le contexte de la Seconde Guerre mondiale, jusqu'aux gigantesques *hyperscales* détenus par des acteurs privés tels que les géants du numérique. Nous avons mis en évidence leur importance pour gérer tous les pans de notre société moderne. Nous avons également apporté des éléments géopolitiques pour souligner certaines de leurs caractéristiques inhérentes comme leur logique d'implantation qui ne doit rien au hasard. Leur architecture a été détaillée, notamment la manière dont les informations binaires sont imprégnées dans la matière afin de contredire le mythe de la dématérialisation. Enfin, nous avons dressé un bref constat de leur impact environnemental pour montrer leur grande consommation énergétique, notamment électrique. Ce travail de mise en perspective, principalement fondé sur la littérature existante, a été enrichi par deux visites de centres de données.

Dans la deuxième partie, nous avons exploré les motivations à l'origine des stratégies d'efficacité énergétique dans les centres de données. Pour cela, nous avons mis en place une méthodologie de recherche qui repose sur une enquête qualitative. Elle a permis d'interroger des professionnels spécialisés sur ces questions lors d'entretiens individuels. Cette enquête a pu mettre en lumière que le cadre juridique apparaît peu contraignant dans les organisations étudiées. On relève avant tout l'importance de la démarche individuelle qui découle d'une volonté interne dans l'objectif premier de limiter l'impact environnemental. Nous relevons également que la crise énergétique de 2022 a eu un impact faible sur les activités à

court terme et n'influera pas sur le long terme, notamment sur les projets de futurs centres de données. Si la recherche et le développement sont perçus comme des atouts, ils ne constituent pas l'objectif principal de ces démarches. Enfin, l'enquête souligne l'importance des enjeux réputationnels et des questions de responsabilité sociétale.

Dans la troisième et dernière partie, nous avons détaillé les stratégies mises en place par les centres de données pour atteindre l'efficacité énergétique. Notre analyse s'est organisée autour de trois axes principaux. Le premier axe, la production d'énergie, a mis en évidence l'intégration des énergies renouvelables pour s'alimenter en électricité, même si les centres de données restent dépendants de l'énergie nucléaire. Le deuxième axe, l'optimisation de la consommation énergétique, s'est concentré sur les techniques de refroidissement qui visent à maîtriser la consommation énergétique des serveurs. Enfin, le troisième axe, la valorisation de l'énergie thermique, a présenté des projets de chauffage urbains permettant la valorisation de la chaleur rejetée par les serveurs et des projets de recherche.

Le centre de données est un objet d'étude qui peut être examiné sous une multitude de facettes. Nous aurions ainsi pu envisager une approche différente, centrée sur les risques d'une rupture de l'alimentation électrique, vitale au bon fonctionnement de ces infrastructures. En effet, une coupure prolongée peut entraîner des conséquences graves, telles que l'interruption des services, la perte ou la corruption des données, ainsi que des répercussions sur tous les pans de notre société moderne. La panne d'électricité majeure survenue en Espagne et au Portugal le 28 avril 2025 a directement touché les centres de données, contraints d'activer leurs systèmes de secours et à se préparer à une interruption de l'alimentation électrique sur plusieurs jours.

SOURCES

Définitions

Hwaiyu Geng, *Data Center Handbook* (Hoboken, NJ: Wiley, 2015). ISBN 978-1118436639.

Guillaume Pitron, *L'enfer numérique : Voyage au bout d'un like* (Paris: Les Liens qui Libèrent, 2021). ISBN 979-1020909961.

Miyuru Dayarathna, Yonggang Wen, et Rui Fan, « Data Center Energy Consumption Modeling: A Survey », *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18, no. 1 (2016): 733. Consulté le 25 août 2025, <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2481183>.

Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, *Directive 2012/27/UE du Parlement européen et du Conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique*, Journal officiel de l'Union européenne L 315 (14 novembre 2012). Consulté le 25 août 2025, <http://data.europa.eu/eli/dir/2012/27/oj>.

Entretiens

Benoit Delaunay (CC-IN2P3), entretien avec l'auteur, 5 juin 2024.

Wayne Salter et Anna Cook (CERN), entretien avec l'auteur, 25 mars 2025.

Dimitri Picasso (Infomaniak), entretien avec l'auteur, 28 avril 2025.

Visites

Visite du centre de calcul de l'IN2P3, novembre 2023.

Visite du centre de calcul du site de Meyrin du CERN, juillet 2024.

Visite de la centrale thermique de l'EPFL, février 2025.

BIBLIOGRAPHIE

Introduction

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, « *Avis d'experts - Les data centers ou centres de données* ». ADEME, 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://librairie.ademe.fr/ged/9341/Avis-Data-Centers-Centre-de-Donnees-2024.pdf>.

Damien Licata Caruso, « *Intelligence artificielle : Stargate, l'intrigant projet pharaonique des États-Unis à 500 milliards de dollars* ». *Le Parisien*, 22 janvier 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.leparisien.fr/high-tech/stargate-le-nouveau-projet-fou-des-etats-unis-quatre-questions-pour-tout-comprendre-22-01-2025-C3EKYARKLRDHTNHIZAK7NCETUM.php>.

Damien Licata Caruso, « *Sommet de l'IA : Macron appelle à un sursaut européen et à une stratégie d'action à Notre-Dame de Paris* ». *Le Parisien*, 10 février 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.leparisien.fr/high-tech/sommet-de-lia-macron-appelle-a-un-sursaut-europeen-et-a-une-strategie-daction-a-la-notre-dame-de-paris-10-02-2025-QCR6LLSX5BFKVILQR5CZXVCKKM.php>.

Peter Huber et Mark Mills, « *Dig more coal—the PCs are coming* ». *Forbes*, 31 mai 1999. Consulté le 25 août 2025, <https://www.forbes.com/forbes/1999/0531/6311070a.html>.

I. Comprendre les centres de données

Anne-Marie Brouet, « *Énergivore, l'IA fera-t-elle baisser notre consommation d'énergie ?* ». *Dimensions*, no. 16 (2025). Consulté le 25 août 2025, <https://actu.epfl.ch/news/energivore-l-ia-fera-t-elle-baisser-notre-consom-3>.

Anouch Seydtaghia, « *Cyberattaques russes : la Suisse retient son souffle* ». *Le Temps*, 4 mars 2022. Consulté le 25 août 2025, <https://www.letemps.ch/cyber/cyberattaques-russes-suisse-retient-souffle>.

Anouch Seydtaghia, « *La Suisse a abandonné sa souveraineté numérique* ». *Le Temps*, 12 juillet 2021. Consulté le 25 août 2025, <https://www.letemps.ch/cyber/suisse-abandonne-souverainete-numerique-alerte-infomaniak>.

Bruce Jacob, Spencer W. Ng, et David T. Wang, *Memory Systems: Cache, DRAM, Disk* (Burlington, MA: Morgan Kaufmann, 2008).

Claude Weisbuch, « *Microélectronique* ». *Encyclopædia Universalis*. Consulté le 25 août 2025, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/microelectronique/>.

Claudia Glover, « *CloudNordic, AzeroCloud Lose All Data in Huge Ransomware Attack* ». *Tech Monitor*, 25 août 2023. Consulté le 25 août 2025

<https://www.techmonitor.ai/technology/cybersecurity/ransomware-attack-on-cloudnordic-azerocloud-loses-all-data>.

Comité européen de la protection des données, « *Quelle est la différence entre un responsable du traitement et un sous-traitant ?* ». Consulté le 25 août 2025, https://www.edpb.europa.eu/sme-data-protection-guide/faq-frequently-asked-questions/answer/what-difference-between_fr.

Commission nationale de l'informatique et des libertés, « *Donnée sensible* ». CNIL.fr. Consulté le 25 août 2025, <https://www.cnil.fr/fr/definition/donnee-sensible>.

Dominique Filippone, « *Incendie SGB2 Strasbourg : OVH condamné à verser plus de 100 000 €* », *Le Monde Informatique*, 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-incendie-sgb2-strasbourg-ovh-condamne-a-verser-plus-de-100-000-eteuro-89434.html>.

Duke Robertson, « *Data Center History and Evolution* ». Enconnex (blog), 22 mars 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://blog.enconnex.com/data-center-history-and-evolution>.

Enterprise for Society Center, « *D4 Project: Technical Guide* ». Consulté le 25 août 2025, <https://d4project.org/technical-guide/>.

Fanny Lopez, *À bout de flux* (Paris: Éditions Divergences, 2022). ISBN 979-1097088507.

Fluke Networks, « *Data Centers* ». Consulté le 25 août 2025, <https://fr.flukenetworks.com/expertise/learn-about/data-centers>.

Frédéric Bordage, « *Empreinte environnementale du numérique mondial* ». Green IT, 2019. Consulté le 25 août 2025, <https://www.greenit.fr/etude-empreinte-environnementale-du-numerique-mondial/>.

Ingrid Vergara, « *Données de santé des Français : l'hébergement chez Microsoft fait polémique* ». *Le Figaro*, 8 février 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.lefigaro.fr/secteur/high-tech/donnees-de-sante-des-francais-l-hebergement-chez-microsoft-fait-polemique-20240207>.

Jean-Michel Mur, *Les centres de données : notions fondamentales, normes, fibres optiques, connectique, émetteurs-récepteurs, protocoles* (Saint-Herblain : Éditions ENI, 2020). Consulté le 25 août 2025, <https://www.editions-eni.fr/livre/les-centres-de-donnees-notions-fondamentales-normes-fibres-optiques-connectique-emetteurs-recepteurs-protocoles-9782409027062>.

Jessica Traynor, « *Power Grab: The Hidden Costs of Ireland's Datacentre Boom* ». *The Guardian*, 15 février 2024. Consulté le 25 août 2025,

<https://www.theguardian.com/world/2024/feb/15/power-grab-hidden-costs-of-ireland-datacentre-boom>.

Louise Merzeau, « *Faire mémoire de nos traces numériques* », HAL SHS (archive ouverte), 2012. Consulté le 25 août 2025, <https://shs.hal.science/halshs-00727308>.

Bruce Jacob, David T. Wang et Spencer W. Ng. *Memory Systems: Cache, DRAM, Disk*. (Burlington, MA : Morgan Kaufmann, 2008). ISBN 978-0123797513.

Margerie Guilliot, Raphaël Lemaire, et Sylvain Reverault, *Green IT* (Saint-Herblain: Éditions ENI, 2024).

Olivier Lavoisy, « E.N.I.A.C. ». *Encyclopædia Universalis*. Consulté le 25 août 2025, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/e-n-i-a-c/>.

Pascal Robert, « *Critique de la dématérialisation* ». *Communication & langages*, no. 140 (2004): 55. Consulté le 25 août 2025, https://www.persee.fr/doc/colan_0336-1500_2004_num_140_1_3268.

Pascal Robert, *Le numérique-monde : Histoire et géopolitique de la logistique informationnelle, du télégraphe à l'IA* (Paris: FYP Éditions, 2025). ISBN 978-2364052536.

Philippe Moreau Defarges, « *Géopolitique* ». *Encyclopædia Universalis*. Consulté le 25 août 2025, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/geopolitique>.

Pierre-Alexandre Sallier, « *Surveillance : le géant des mails cryptés Proton prêt à quitter Genève* ». *Tribune de Genève*, 14 avril 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.tdg.ch/surveillance-le-geant-des-mails-cryptes-proton-pret-a-quitter-geneve-947402188210>.

Richard H. Dee, « *Magnetic Tape for Data Storage: An Enduring Technology* ». *Proceedings of the IEEE* 96, no. 11 (2008): 1775. Consulté le 25 août 2025, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2004311>.

Rihards Balodis and Inara Opmane, « *History of Data Centre Development* » in *Reflections on the History of Computing*. ed. A. Tatnall (Berlin, Heidelberg: Springer, 2012), 180. Consulté le 25 août 2025, https://doi.org/10.1007/978-3-642-33899-1_13.

Sebastian Moss, « *Right Wing Terrorist Gets 10 Years for Plotting to Blow Up AWS Data Center* ». *Data Center Dynamics*, 2021. Consulté le 25 août 2025, <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/right-wing-terrorist-gets-10-years-for-plotting-to-blow-up-aws-data-center>.

Serge Leblal, « *Face à la croissance des datacenters IA, Gartner prédit des pénuries d'électricité* ». *Le Monde Informatique*, 2024. Consulté le 25 août 2025,

<https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-face-a-la-croissance-des-datacenters-ia-gartner-predit-des-penuries-d-electricite-95225.html>.

Synology, « *Qu'est-ce que le RAID ?* ». *Synology Knowledge Base*. Consulté le 25 août 2025, https://kb.synology.com/fr-fr/DSM/help/DSM/StorageManager/storage_pool_what_is RAID.

Thane Moore, « *6 Types of Data Centers* ». *Enconnex* (blog), 2023, Consulté le 25 août 2025, <https://blog.enconnex.com/6-types-of-data-centers>.

The Economist, « *The World's Most Valuable Resource Is No Longer Oil, but Data* ». *The Economist*, 6 mai 2017. Consulté le 25 août 2025, <https://www.economist.com/leaders/2017/05/06/the-worlds-most-valuable-resource-is-no-longer-oil-but-data>.

Wikipédia, « *Incendie du centre de données d'OVHcloud à Strasbourg* », dernière modification le 2 juin 2025. Consulté le 25 août 2025, https://fr.wikipedia.org/wiki/Incendie_du_centre_de_donn%C3%A9es_d'OVHcloud_%C3%A0_Strasbourg.

Yves Eudes, « *Les datas du grand froid* ». *Le Monde*, 3 juin 2016. Consulté le 25 août 2025, https://www.lemonde.fr/pixels/article/2016/06/03/les-datas-du-grand-froid_4932566_4408996.html.

Yves Grandmontagne, « *CloudNordic : le datacenter qui a perdu toutes les données de ses clients lors d'une attaque par ransomware* ». *DC Mag*, 2023. Consulté le 25 août 2025, <https://dcmag.fr/cloudnordic-le-datacenter-qui-a-perdu-toutes-les-donnees-de-ses-clients-lors-dune-attaque-par-ransomware>.

II. Enjeux et motivations des centres de données en matière d'efficacité énergétique

Centre de Calcul de l'IN2P3, « *Le CC-IN2P3* ». Consulté le 25 août 2025, <https://cc.in2p3.fr/qui-sommes-nous/le-cc-in2p3>.

Commission européenne, Centre commun de recherche, « *European Code of Conduct for Energy Efficiency in Data Centres* ». Consulté le 25 août 2025, https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/energy-efficiency/energy-efficiency-products/code-conduct-ict/european-code-conduct-energy-efficiency-data-centres_en.

Darra L. Hofman, « *Extraterritoriality and International Organizations* ». *Recordkeeping in International Organizations* (New York: Routledge, 2021), 91.

Direction générale des entreprises, « *Responsabilité sociétale des entreprises (RSE)* », Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique. Consulté le 25 août 2025, <https://www.economie.gouv.fr/entreprises/responsabilite-societale-entreprises-rse>.

Enterprise for Society Center, « Home ». Consulté le 25 août 2025, <https://d4project.org/>.

Infomaniak Network SA, « *Certificats et récompenses – Écologie* », Infomaniak. Consulté le 25 août 2025, <https://www.infomaniak.com/fr/ecologie/certificats-recompenses>.

Infomaniak Network SA, « *Écologie – Découvrez pourquoi nous polluons* ». Infomaniak, Consulté le 25 août 2025, <https://www.infomaniak.com/fr/ecologie>.

Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3), « *IN2P3* ». Consulté le 25 août 2025, <https://www.in2p3.cnrs.fr/fr/in2p3>.

IONOS, « *Qu'est-ce qu'une norme ISO ?* ». The Digital Guide, 2022. Consulté le 25 août 2025, <https://www.ionos.fr/digitalguide/serveur/know-how/quest-ce-quune-norme-iso/>.

Journée du Datacenter, « *Les normes et les réglementations pour les datacenters (Partie I)* ». 2023. Consulté le 25 août 2025, <https://journeeedudatacenter.com/wp-content/uploads/2023/05/fiche-normes-partie-1.pdf>.

Julien Culet. « *Protection de l'environnement : les Verts tentent de limiter le CERN en énergie* ». Tribune de Genève, 15 octobre 2023. Consulté le 25 août 2025, <https://www.tdg.ch/protection-de-l-environnement-les-verts-tendent-de-limiter-le-cern-en-energie-831793151487>.

Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), « *Approche managériale* », *Rapport sur l'environnement 2021-2022*. Consulté le 25 août 2025, <https://hse.cern/fr/rapport-environnement-2021-2022/approche-manageriale>.

Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), « *Échelle des contributions au titre de 2025 des États membres et États membres associés* ». Conseil du CERN, 10 juin 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://cds.cern.ch/record/2908193/files/French.pdf>.

Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN). « *CERN is awarded ISO 50001 energy certification* ». 8 février 2023. Consulté le 25 août 2025, <https://home.cern/fr/news/news/cern/cern-awarded-iso-50001-energy-certification>

Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), « *Gestion de l'énergie* ». Consulté le 25 août 2025, <https://hse.cern/content/energy-management>.

Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), « *Grid Computing* ». Consulté le 25 août 2025, <https://home.cern/fr/science/computing/grid>.

Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), « *Recherche respectueuse de l'environnement* ». Consulté le 25 août 2025, <https://home.cern/fr/about/what-we-do/environmentally-responsible-research>.

Organisation internationale de normalisation, « *ISO 14001 : management environnemental* », ISO. Consulté le 25 août 2025, <https://www.iso.org/fr/iso-14001-environmental-management.html>.

Organisation internationale de normalisation, « *ISO 50001 : management de l'énergie* », ISO. Consulté le 25 août 2025, <https://www.iso.org/fr/iso-50001-energy-management.html>.

Organisation internationale de normalisation, « *Les normes dans le monde d'aujourd'hui* », ISO. Consulté le 25 août 2025, https://www.iso.org/sites/ConsumersStandards/fr/1_standards.html.

Renilde Vanden Broeck, « *L'alimentation et la consommation électrique du CERN* », Poster-2019-761, CERN Document Server, 2019. Consulté le 25 août 2025, <https://cds.cern.ch/record/2692402>.

Union européenne, *Directive (UE) 2023/1791 du Parlement européen et du Conseil du 13 septembre 2023 sur l'efficacité énergétique*, Journal officiel de l'Union européenne L (13 septembre 2023). Consulté le 25 août 2025, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj/eng>.

III. Stratégies d'efficacité énergétique dans les centres de données

A. G. Fleitas, « *What Is Data Center PUE? Defining Power Usage Effectiveness* ». *Data Center Knowledge*, 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.datacenterknowledge.com/sustainability/what-is-data-center-pue-defining-power-usage-effectiveness#Issues%20with%20Power%20Usage%20Effectiveness>.

Alexandre Piquard. « *Les géants du numérique se convertissent au nucléaire* ». *Le Monde*, 23 septembre 2024. Consulté le 25 août 2025, https://www.lemonde.fr/economie/article/2024/09/23/les-geants-du-numerique-se-convertissent-au-nucleaire_6329378_3234.html.

Alfa Laval, « *Récupérer la chaleur fatale basse température par machine ORC (Cycle organique de Rankine)* ». Consulté le 25 août 2025, <https://www.alfalaval.fr/industries/energies-et-des-utiles/sustainable-solutions/solutions-durables/efficacite-energetique/recuperation-chaleur-residuelle/orc-cycle-organique-de-rankine>.

Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), « *CERN Signs Long-Term Solar Power Agreements*. » 29 novembre 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://home.cern/fr/news/news/engineering/cern-signs-long-term-solar-power-agreements>.

Clubic, « *Un data center construit sous des habitations revalorise 100 % de son énergie : visite guidée d'une installation hors norme* ». 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.clubic.com/actualite-528513-un-data-center-construit-sous-des-habitations-revalorise-100-de-son-energie-visite-guidee-d-une-installation-hors-norme.html>.

CNN, « *Wind Turbines Could Power the Data Centers of the Future* ». 2023. Consulté le 25 août 2025, <https://edition.cnn.com/world/windcores-data-center-wind-turbines-climate-scen-spc-c2e/index.html>.

École polytechnique fédérale de Lausanne, « *À propos* », EPFL. Consulté le 25 août 2025, <https://www.epfl.ch/about/fr/>.

École polytechnique fédérale de Lausanne, « *Une centrale de chauffe qui cumule les énergies* », EPFL, 2022. Consulté le 25 août 2025, <https://actu.epfl.ch/news/une-centrale-de-chauffe-qui-cumule-les-energies--3/>.

École polytechnique fédérale de Lausanne, « *Waste heat to electricity – Heating Bits* ». *Heating Bits*. Consulté le 25 août 2025, <https://heatingbits.epfl.ch/research/waste-heat-to-electricity/>.

EDF, « *Le fonctionnement d'un barrage hydroélectrique* ». 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.edf.fr/groupe-edf/comprendre/production/hydraulique/fonctionnement-barrage>.

EDF, « *Le fonctionnement d'une éolienne* ». 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.edf.fr/groupe-edf/comprendre/production/eolien/fonctionnement-eolienne>.

Engie, « *Climatisation adiabatique : définition, avantages et inconvénients* ». ENGIE Particuliers. Consulté le 25 août 2025, <https://particuliers.engie.fr/depannages-services/conseils-equipements-chauffage/conseils-installation-climatisation/climatisation-adiabatique-maison.html>.

Équans, « *Un Data Center éco-responsable au service des besoins scientifiques* ». 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.equans.fr/nous-decouvrir/nos-realisations/un-data-center-eco-responsable-au-service-des-besoins-scientifiques>.

Google, « *Positive Energy: Belgian Site Becomes First Google Data Center to Add On-Site Solar* ». Google Sustainability (blog), 2018. Consulté le 25 août 2025, https://sustainability.google/intl/fr_fr/operating-sustainably/stories/belgium-solar/.

Jacques Cheminat, « *Microsoft abandonne son projet de datacenter sous-marin* ». *Le Monde Informatique*, 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-microsoft-abandonne-son-projet-de-datacenter-sous-marin-94098.html>.

Julia Borgini, « *How to Use Data Center Wind Turbines for Sustainable Energy* ». *TechTarget*, 13 février 2025. Consulté le 25 août 2025, <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/tip/How-to-use-data-center-wind-turbines-for-sustainable-energy>.

Le Courrier International, « *Énergie : Google s'offre sept mini-réacteurs nucléaires pour alimenter ses centres de données* ». *Le Courrier International*, 2024. Consulté le 25 août 2025, https://www.courrierinternational.com/article/energie-google-s-offre-sept-minireacteurs-nucleaires-pour-alimenter-ses-centres-de-donnees_223407.

Magarantiedorigine.com, « *Le guide complet sur les Garanties d'Origine* ». 2023. Consulté le 25 août 2025, <https://magarantiedorigine.com/guide-complet-sur-les-garanties-d-origine/>.

Meta Careers, « *Welcome to Facebook Luleå, Sweden* ». Meta Careers (blog), 2017. Consulté le 25 août 2025, <https://www.metacareers.com/blog/welcome-to-facebook-lulea-sweden/>.

Microsoft, « *Microsoft's Underwater Datacenter: Project Natick* ». Microsoft Source (blog), 2016. Consulté le 25 août 2025, <https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/project-natick-underwater-datacenter/>.

Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et du Développement durable, « *Les énergies renouvelables* », 2024. Consulté le 25 août 2025, <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/energies-renouvelables>.

Peter Judge, « *Project Natick: Microsoft's Underwater Voyage of Discovery* ». *Data Center Dynamics*, 2021. Consulté le 25 août 2025, <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/project-natick-microsofts-underwater-voyage-discovery/>.

Schneider Electric, « *Small Modular Nuclear Reactors Suitability for Data Centers* », White Paper 186, 2024. Consulté le 25 août 2025, https://www.se.com/ww/en/download/document/SPD_WP186_EN/.

Schneider Electric, « *Understanding BESS: Battery Energy Storage Systems for Data Centers* », White Paper 185, 2024. Consulté le 25 août 2025, https://www.se.com/ww/en/download/document/SPD_WP185_EN.

ANNEXES

**ANNEXE 1 : GRILLE D'ENTRETIEN SEMI-DIRECTIF POUR
L'ENTRETIEN AVEC L'IN2P3**

**ANNEXE 2 : GRILLE D'ENTRETIEN SEMI-DIRECTIF POUR LES
ENTRETIENS AVEC LE CERN ET INFOMANIAK**

**ANNEXE 3 : AUTORISATIONS DE TRAITEMENT DE DONNEES
PERSONNELLES COLLECTEES LORS DES ENTRETIENS**

ANNEXE 1 : GRILLE D'ENTRETIEN SEMI-DIRECTIF POUR L'ENTRETIEN AVEC L'IN2P3

I. Fonctionnement d'un centre de données

- Structure et équipements
- Redondance
- Consommation électrique (coût annuel des 5 dernières années + prédictions)
- Quels défis opérationnels ?

II. Supports de stockage

- Quels supports de stockage utilisés ? Leur nombre
- Quels critères de sélection ?
- Quid des nouvelles technologies ? (Ex : ADN, Quartz, technologie quantique)
- Quelle capacité de stockage totale ?

III. Stratégies pour assurer le stockage

- Quelles actions pour améliorer l'efficacité énergétique ?
- Qui influence ces actions ? Le cadre légal ?
- Quel contrat d'électricité, quel prestataire ?

ANNEXE 2 : GRILLE D'ENTRETIEN SEMI-DIRECTIF POUR LES ENTRETIENS AVEC LE CERN ET INFOMANIAK

I. Questions générales

- Pouvez-vous présenter votre organisation ainsi que votre rôle au sein de celle-ci ?
- Pouvez-vous présenter brièvement le centre de données ? (Taille, objectif, capacité de stockage, puissance électrique, statistiques, etc.)
- Pourquoi construire un nouveau centre de données ?
- Quelles sont les stratégies mises en place ?
- Quel rôle joue l'efficacité énergétique dans votre stratégie globale ?

II. Motivations

- Pourquoi investir autant dans l'efficacité énergétique en tant qu'acteur privé ?
Quelle est la source de cet engagement ?
- Quelles ont été les principales raisons qui ont poussé votre organisation à investir dans l'efficacité énergétique du centre de données ?
 - Contraintes réglementaires, internes ou externes
 - Obtention de subventions
 - Communication / Amélioration de l'image de l'organisation
 - Pression des clients ou des parties prenantes
 - Réduction des coûts énergétiques
 - Recherche et développement
 - Stratégie de réduction de l'impact environnemental
- Parmi ces raisons, lesquelles ont été les plus importantes ?
- Quels sont les bénéfices apportés par ces mesures ? (Par exemple : réduction des risques juridiques, amélioration de la communication, économies réinvesties, etc.)

III. Futur

- Quelles initiatives envisagez-vous pour améliorer encore davantage l'efficacité énergétique ?
- À votre avis, quelles tendances influenceront l'efficacité énergétique des centres de données dans les années à venir ? (Par exemple : mini-réacteurs nucléaires)

ANNEXE 3 : AUTORISATIONS DE TRAITEMENT DE DONNEES PERSONNELLES COLLECTEES LORS DES ENTRETIENS

Pour des raisons de confidentialité, les autorisations de traitement de données personnelles signées par les personnes interviewées ont été retirées de la version publique du mémoire de recherche.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1 : ILLUSTRATION D’UN DISQUE DUR.....	26
FIGURE 2 : ILLUSTRATION D’UN SSD	28
FIGURE 3 : ILLUSTRATION D’UNE BANDE MAGNETIQUE SANS LE HAUT DE LA CARTOUCHE	29
FIGURE 4 : PHOTOGRAPHIE DES BAIES DE STOCKAGE DU CENTRE DE CALCUL DU SITE DE MEYRIN DU CERN	43
FIGURE 5 : GRAPHIQUE COMPARATIF DES PRIX DE L’ELECTRICITE AU CC-IN2P3 ENTRE 2020 ET 2024	47
FIGURE 6 : SCHEMA DU FONCTIONNEMENT DES ALLEES CHAUDES ET FROIDES.....	64
FIGURE 7 : PHOTOGRAPHIE DES ALLEES CHAUDES DU D4	66
FIGURE 8 : RESEAU DE TUYAUTERIE DES POMPES A CHALEUR DE LA CENTRALE THERMIQUE DE L’ÉCOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE.....	68
FIGURE 9 : SCHEMA DE LA VALORISATION DE L’ENERGIE THERMIQUE DU CENTRE DE DONNEES D4 D’INFOMANIAK.....	74

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	
SOMMAIRE	
SIGLES ET ABREVIATIONS	
INTRODUCTION.....	1
I. COMPRENDRE LES CENTRES DE DONNEES	5
1.1 Introduction aux centres de données	5
<i>1.1.1. Histoire et évolution</i>	<i>5</i>
<i>1.1.2. Rôle et importance dans le réseau informatique</i>	<i>8</i>
<i>1.1.3. Typologies et classification</i>	<i>10</i>
Les types de centres de données	10
La classification Tier	12
Les services associés aux centres de données	13
1.2 La dimension géopolitique	15
<i>1.2.1 Les logiques d'implantation</i>	<i>15</i>
Régions urbaines	15
Latence.....	16
Risques naturels et sociétaux.....	16
Conditions climatiques	17
Personnel qualifié	18
Fiscalité.....	18
<i>1.2.2 Les acteurs</i>	<i>19</i>
<i>1.2.3 Les conflits</i>	<i>22</i>
1.3 La gestion de données.....	23
<i>1.3.1 Le stockage de données.....</i>	<i>24</i>
Les serveurs	24

Stockage de données	26
Disque dur	26
Solid-State Drive	27
Bandes magnétiques	28
1.3.2 Le réseau interne	29
1.4 L'impact environnemental	31
1.4.1 Le cycle de vie	31
1.4.2 Les principaux impacts	32
Empreinte carbone	32
Consommation électrique	33
Consommation en eau	33
Prévisions	34
II. ENJEUX ET MOTIVATIONS DES CENTRES DE DONNEES EN	
MATIERE D'EFFICIENCE ENERGETIQUE	35
2.1 Le cadre réglementaire.....	37
2.1.1 Le cadre juridique	38
2.1.2 Le cadre normatif	39
2.1.3 Son application dans les organisations étudiées	40
2.2 Les initiatives autonomes	42
2.3 La crise énergétique	46
2.4 La recherche et le développement	49
2.5 Les enjeux réputationnels	50
2.6 Conclusion de l'enquête	52
III. STRATEGIES D'EFFICIENCE ENERGETIQUE DES CENTRES DE	
DONNEES	53
3.1 La production et l'approvisionnement en énergie	54
3.1.1 L'intégration des énergies renouvelables	54
Énergie solaire.....	55

Énergie éolienne	57
Énergie hydroélectrique	59
Stockage d'énergie par batterie	59
3.1.2 L'autoproduction d'énergie nucléaire	60
3.2 L'optimisation de la consommation énergétique	62
3.2.1 Le refroidissement des serveurs	63
3.2.1.1 Le refroidissement par air.....	64
Le principe des allées chaudes et froides.....	64
Le refroidissement par air de manière directe.....	65
Le refroidissement par air de manière indirecte.....	65
Le refroidissement adiabatique	67
3.2.1.2 Le refroidissement par eau.....	68
Le refroidissement par eau froide naturelle	68
L'immersion de centre de données dans l'eau	69
3.2.2 La virtualisation	71
3.2.3 Les supports de stockage.....	72
3.3 La valorisation de l'énergie thermique	73
3.3.1 Le chauffage urbain.....	73
3.3.2 Les projets de recherche	75
CONCLUSION	77
SOURCES.....	
BIBLIOGRAPHIE.....	
ANNEXES.....	
TABLE DES ILLUSTRATIONS	
TABLE DES MATIERES.....	