

FEV.
2019

L'IMPACT SPATIAL ET ENERGETIQUE DES *DATA* *CENTERS* SUR LES TERRITOIRES.

Cécile Diguët et Fanny Lopez

Avec Laurent Lefevre

Projet ENERNUM

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

En partenariat avec :



îledeFrance

Éa
v&t

Inria
inventeurs du monde numérique

CITATION DE CE RAPPORT

Cécile Diguët et Fanny Lopez (dir.), *L'impact spatial et énergétique des data centers sur les territoires*, Rapport Ademe, 2019.

En ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1717C00015

Étude dirigée et réalisée par Cécile DIGUËT, IAU et Fanny LOPEZ Eavt.
cecile.diguët@iau-idf.fr
fanny.lopez@mamelavallee.archi.fr

Avec Laurent LEVEVRE (Inria, Université de Lyon) et Rémi LOUVENCOURT (Eavt).

Appel à projet de recherche : APR Energie Durable 2017

Ce projet a été cofinancé par l'ADEME, l'Institut de Recherche CDC et la Fondation Tuck.

Coordination technique - ADEME : Solène MARRY

TABLE DES MATIERES

Résumé	5
Abstract.....	5
Introduction : l'illusion de l'infini et la finitude des ressources	6
1. L'infrastructure numérique : une empreinte grandissante sur les territoires.....	8
1.1 Un impact environnemental majeur.....	9
1.2 Angles morts environnementaux et risques	14
1.3 La croissance effrénée du stockage de données et de leur traitement.....	17
2. Territoires du numérique : concentration et dispersion.....	24
2.1 Stratégies d'implantation, échelles, typologies.....	24
2.2 Formes architecturales	27
2.3 Concentration urbaine des flux et décentralisation géographique des stocks	31
2.4 Camouflés dans l'existant et les centres villes	32
2.5 Les périphéries métropolitaines du numérique	36
2.6 A l'assaut du monde rural.....	47
3. Jeux d'acteurs et gouvernance des territoires numériques	54
3.1 L'écosystème des acteurs des <i>data centers</i>	54
3.2 La construction d'une expertise côté collectivités locales	56
3.3 Des collectivités locales face à l'opacité.....	58
3.4 Opérateurs énergétiques et télécoms : dépendances et disruptions	59
3.5 Gouvernance collective : des structures pour avancer vers une meilleure intégration des <i>data centers</i>	62
4. Les <i>data centers</i> , nouvelle pièce du puzzle énergétique	64
4.1 Des réserves infrastructurelles inédites.....	64
4.2 La difficile récupération de chaleur.....	66
4.3 Les <i>data centers</i> dans les smart grids et micro grids	71
5. Des initiatives citoyennes, publiques et des infrastructures numériques alternatives	74
5.1 La réappropriation citoyenne de l'infrastructure numérique de réseau	74
5.2 Guifi.net : une infrastructure, un commun	77
5.3 Prolonger la dynamique low tech et citoyenne des réseaux vers le stockage de données ? ..	79
5.4 Projet de labellisation des <i>data centers</i> de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.....	84
6. Des approches intégrées	89
6.1 Les <i>data center parks</i> de Stockholm: articuler foncier, numérique et énergie	89
6.2 Red Hook: de la résilience numérique au micro réseau énergétique	93
7. Une prospective énergie, numérique, territoires	96
7.1 Grandes tendances de fond identifiées	97
7.2 Tendances émergentes.....	101
7.3 Prospective : 3 mondes numériques possibles	104

8. Recommandations	110
8.1 Recommandations gouvernance et acteurs.....	110
8.2 Recommandations urbanisme / environnement.....	112
8.3 Recommandations énergie.....	118
8.4 Recommandations recherche et connaissances.....	122
Conclusion	123
ANNEXES.....	125
Bibliographie sélective.....	135
Table des figures	139

Résumé

Face à la croissance massive des échanges de données et des besoins de stockage, l'impact spatial et énergétique des *data centers* va être de plus en plus structurant pour les territoires. Leur diversité d'usages, d'acteurs, de tailles et d'implantations rend aujourd'hui complexe la lecture de leurs dynamiques et de leurs effets spatiaux.

Le présent rapport s'attache donc à donner une image du paysage des *data centers* en Ile-de-France et dans trois territoires des États-Unis, représentant chacun des situations spatiales et énergétiques différentes (ville dense, espace périphérique, rural). Facteur potentiel de déséquilibre des systèmes énergétiques locaux, objets dont l'accumulation urbaine et la dispersion rurale questionnent, les *data centers* font ici l'objet d'une analyse approfondie pour mieux appréhender les nouveaux territoires numériques en construction, les solidarités énergétiques à construire et les alliances d'acteurs à mettre en place.

Un focus est également réalisé sur les infrastructures numériques alternatives et citoyennes, qui se développent aussi bien en Afrique, Amérique du Sud, que dans les territoires mal couverts en Europe ou aux États-Unis. Dédiées à l'accès à Internet et de plus en plus, aux services d'hébergement et de *cloud*, elles peuvent constituer une réponse distribuée et pair-à-pair, dont l'impact écologique pourrait finalement se révéler plus limité que les infrastructures centralisées de grande échelle car calibrées au plus près des besoins locaux, mais aussi plus résilientes car moins centralisées techniquement et moins concentrées spatialement. Elles constituent ainsi une option à considérer, soutenir mais aussi à mieux évaluer, pour réduire les impacts spatiaux et énergétiques des *data centers*.

Le rapport propose également des visions prospectives qui combinent des tendances de fond et des signaux faibles pour imaginer les mondes numériques de demain, dont trois possibles sont décrits : « Croissance et ultracentralisation numérique » ; « Stabilisation du Système Technique Numérique et diversité infrastructurelle : quête d'une difficile résilience » ; « Ultradécentralisation numérique : la fin des *data centers* ? ». Enfin, des recommandations sont proposées autour de 3 axes : les acteurs et la gouvernance ; l'urbanisme et l'environnement ; l'énergie. Des pistes d'approfondissement et d'études sont également présentées.

Abstract

Faced with the massive growth in data exchanges and storage needs, the spatial and energy impact of data centers will be increasingly structuring for territories. Their diversity of uses, actors, sizes and locations makes it difficult to read their dynamics and spatial effects.

This report therefore aims to provide an image of the data center landscape in Ile-de-France and in three territories of the United States, each representing different spatial and energy situations (dense city, peripheral space, rural). As a potential factor in the imbalance of local energy systems, objects whose urban accumulation and rural dispersion raise questions, data centers are the subject of an in-depth analysis to better understand the new digital territories under construction, the energy solidarity to be built and the alliances of actors to be set up.

A focus is also placed on alternative and citizen-based digital infrastructures, which are developing in Africa, South America, as well as in poorly covered territories in Europe and the United States. Dedicated to Internet access and, increasingly, hosting and cloud services, they can provide a distributed and peer-to-peer response, whose ecological impact may ultimately be more limited than large-scale centralised infrastructures because they are tailored to local needs, but also more resilient because they are less technically centralised and less spatially concentrated. They are therefore an option to be considered, supported and also better evaluated, in order to reduce the spatial and energy impacts of data centers.

The report also proposes forward-looking visions that combine underlying trends and weak signals to imagine the digital worlds of tomorrow, three of which are described: "Growth and digital ultra-centralization"; "Stabilization of the Digital Technical System and infrastructural diversity: quest for difficult resilience"; and "Digital ultra-decentralization: the end of data centers". ». Finally, recommendations are proposed around 3 axes: actors and governance; urban planning and environment; energy. Suggestions for further investigation and studies are also presented.

Introduction : l'illusion de l'infini et la finitude des ressources

La production croissante de données numériques suppose le déploiement d'une infrastructure dédiée pour le traitement, le stockage et l'aiguillage des flux. Ce sont les centres de données ou *data centers*. Cette infrastructure est elle-même soutenue par l'infrastructure électrique qui est au cœur de son modèle d'affaire et de son fonctionnement. Portés par l'explosion des échanges de données, du cloud et des objets connectés, les *data centers* seront parmi les plus importants postes de consommation électrique du XXI^e siècle.

Nouvelle étape de l'urbanisme des réseaux, la *smart city*¹ est souvent analysée en termes d'usages et de pratiques, de services et d'évènements, laissant au deuxième plan la physicalité et l'impact énergétique de ses infrastructures. En effet, les urbanistes et aménageurs n'intègrent que très peu cette question dans leurs réflexions. De leur côté, les promoteurs et opérateurs de *data centers* développent un large panel typologique : des « boîtes » sécurisées, standardisées et flexibles ; des architectures signal sur des campus high-tech ; des bâtiments transformés tels d'anciens hôtels télécom, bunkers, bureaux ou des sites industriels. Ils sont présents partout en centre-ville, en zone périphérique, dans les territoires ruraux. Qu'ils soient complètement autonomes énergétiquement ou intégrés dans des cercles d'échanges de périmètres variables (flot, quartier, ville, territoire), ils redéfinissent à chaque fois le projet énergétique des lieux dans lesquels ils s'implantent.

La proposition de *data centers* efficaces en consommation énergétique est étudiée depuis plus d'une dizaine d'années, après les premiers travaux des chercheurs de Virginia Tech sur le cluster GreenDestiny. De nombreux défis sont à relever sur des dispositifs de refroidissement plus efficaces (refroidissement à eau froide ou tempérée, *free cooling*...), sur des infrastructures numériques plus efficaces (serveurs, baies de stockage, équipements réseaux). Il convient aussi de concevoir des équipements numériques capables d'afficher une consommation électrique proportionnelle à leur charge de travail. Enfin, en parallèle à ces avancées matérielles, la conception de services logiciels améliorant leur empreinte énergétique (écoconception logicielle) est un grand chantier en cours d'exploration dans la recherche académique et industrielle. En France, la recherche académique menée par l'Inria, le CNRS, le CEA et différentes universités, permet d'aborder certains de ces domaines. Les *data centers* sont relativement encadrés en tant qu'objets industriels : autorisations ICPE ; certains sont des Opérateurs d'Importance Vitale (OIV) ; il y a des injonctions sur l'efficacité énergétique via le Code conduite européen sur les *data centers* ; il existe des standards américains ASHRAE 90.4 (voir Annexes pour plus de détails). Mais si l'efficacité énergétique à l'échelle du bâtiment est un domaine étudié et partiellement appliqué, les questions sur l'intégration urbaine et les potentialités architecturales de ces objets restent peu analysées, voire sous-estimées, tout comme une réflexion plus écosystémique qui permettrait de mieux intégrer les *data centers* dans les systèmes énergétiques locaux.

Aucun document de planification urbaine et numérique (SCORAN, SDAN, SDUS, SCOT...) ne propose une appréhension globale du phénomène spatial et programmatique, même si l'on trouve des éléments de prise en compte du phénomène dans le Schéma Régional Climat Air Energie (SRCAE) d'Ile-de-France ou le Plan Climat Air Energie Métropolitain (PCAEM) de la Métropole du Grand Paris (MGP). Comment analyser l'intégration de ces nouvelles usines dans des scénarios de fournitures électriques intermittentes à base d'énergies renouvelables en lien éventuel avec des *smart cities* ? Une intégration plus écosystémique de ces objets dont la gouvernance et les modalités de régulation échappent majoritairement aux acteurs de la planification urbaine est-elle possible ?

¹ Voir les travaux d'Antoine Picon sur le sujet, notamment : Picon Antoine, 2015, *Smart Cities A Spatialised Intelligence*.

A l'aune d'une industrie numérique américaine pionnière et florissante, mais au système énergétique fragilisé, des études de terrains sur la côte Ouest (Oregon, Silicon Valley) et côte Est (New York), nous ont permis d'éclairer l'enjeu de l'intégration des *data centers* dans des écosystèmes énergétiques territoriaux. Nous avons complété ces terrains par la rencontre à Barcelone des acteurs associatifs des infrastructures numériques (notamment Guifinet), et à Stockholm, pour approfondir notre connaissance de la stratégie combinée « foncier, énergie, *data centers* » de la ville.

En Ile-de-France, nous nous sommes penchées en particulier sur les cas de Plaine Commune, territoire historique d'implantation des *data centers* de colocation, et le plateau de Saclay, cluster de recherche et développement dont le traitement des données est au cœur du fonctionnement.

Les enjeux abordés à travers cette recherche sont de trois ordres, et dialoguent ensemble :

- La sobriété énergétique et l'utilisation des énergies renouvelables ;
- L'intégration des *data centers* dans des systèmes locaux via des mutualisations, des échanges, des connexions et moins de redondance infrastructurelle ;
- L'architecture et l'intégration spatiale de ces infrastructures dans les villes et dans les territoires ;

La recherche propose ici des éléments pour comprendre, connaître, décoder à la fois l'objet *data center*, mais aussi ses interactions avec les environnements dans lesquels il s'insère dans ses dimensions architecturales et urbaines, en lien avec les problématiques énergétiques, économiques et de gouvernance. Elle décrit les situations territoriales et énergétiques complexes dans lesquels s'inscrivent les *data centers*, et fait le point sur la diversité de l'objet *data center*, sur les dynamiques que leurs installations posent dans les zones urbaines, rurales ou périphériques, sur les bonnes pratiques en matière de mutualisation énergétique, d'intégration urbaine et architecturale, de gouvernance, tout en pointant les limites et les freins à une intégration des *data centers* dans un fonctionnement plus écosystémique.

Le rapport explore les potentiels des infrastructures numériques citoyennes et pair-à-pair et des approches intégrées originales pour les *data centers*, à Red Hook (New York) et Stockholm (Suède). Il s'oriente ensuite vers des horizons plus prospectifs pour illustrer les futurs numériques possibles en lien avec les grandes tendances de fond : crise climatique et énergétique, surconsommation numérique, urbanisation du monde et géopolitique du stockage.

Enfin, des pistes de travail, d'organisation, d'innovation, des recommandations pour améliorer l'intégration de ces infrastructures numériques stratégiques, en lien avec les mutations rapides de cette industrie, sont proposées.

1. L'infrastructure numérique : une empreinte grandissante sur les territoires

Internet est une infrastructure qui se décompose en trois éléments principaux :

- les réseaux (fibres optiques, réseaux cuivre, réseaux sans fil) ;
- les centres de stockage de données (*data centers*) ;
- les terminaux utilisateurs (smartphones, ordinateurs, tablettes, objets connectés...).

Le réseau est constitué de fibres optiques et de câbles en cuivre, passant en tranchées sous les trottoirs, sous les chaussées, le long des lignes à haute tension, ou encore, le long des rails des métros, des trains, sur les bas-côtés des autoroutes et au fond des mers. Le réseau est aussi basé sur du matériel télécom dédié comme les routeurs et les commutateurs (*switches*), des espaces physiques comme les *meet-me-rooms* et les Points d'échange Internet.

Ces espaces sont fortement imbriqués à l'autre infrastructure stratégique d'Internet, les centres de données, dont la continuité de service est centrale pour le fonctionnement du monde numérique puisqu'ils stockent, traitent et distribuent les données numériques. La redondance est au cœur de leur organisation : copie des données sur plusieurs sites, duplication des infrastructures électriques en cas de panne, réservoirs d'eau en cas de coupure pour la climatisation...

Les *data centers* se développent depuis les années 1990 sous l'effet de plusieurs facteurs, notamment :

- l'explosion du web commercial ;
- la dérégulation du marché des télécoms ;
- l'abandon des systèmes « mainframes » vers les systèmes serveurs.

Un *data center* se définit comme un bâtiment d'hébergement qui accueille un ensemble d'infrastructures numériques (équipements de calculs, de stockage, de transport de données). Le *data center* est doté de systèmes de refroidissement, de récupération de chaleur ainsi que des équipements de secours : batteries, UPS, groupes électrogènes. Un *data center* peut contenir différentes technologies en fonction des besoins applicatifs, par exemple des serveurs de calculs pour des centres de calcul haute performance, des baies de stockage pour des *data centers* ou des équipements réseaux pour des centres d'opérateurs télécoms (comme des *meet-me-room* où se connectent tous les opérateurs télécoms).

Il y a différents types de *data centers* et les usages peuvent varier.

- Les *data centers* d'exploitation, d'entreprises ou de ministères par exemple, hébergent et gèrent leurs propres serveurs de données dans un bâtiment qui leur est réservé.
- Dans les *data centers* d'infrastructure ou de colocation, différents usages sont possibles :
 - Hébergement des équipements numériques d'entreprises clientes (l'opérateur fournit l'espace et l'électricité, ce que l'on appelle *power and shell*).
 - Mise à disposition de serveurs et équipements informatiques de l'hébergeur pour ses clients, aussi appelé *bare-metal provisioning*. Les clients peuvent réaliser des réservations temporaires physiques de serveur, de baies de disques, d'équipements réseau afin de bénéficier d'un usage garanti et non partagé des infrastructures.
 - Réservation en mode *Cloud* : les clients peuvent réserver des machines virtuelles sur les serveurs des *data centers*.

L'accélération numérique actuellement en cours, notamment avec le développement très important des services de *Cloud*, suscite la création continue de nouveaux *data centers* dans le monde entier. Le Natural Resource Defense Council estimait que, en 2014, 12 millions de serveurs étaient nécessaires dans les *data centers* américains pour supporter l'ensemble des activités numériques². Le nombre de *data centers* de très grande échelle devrait augmenter de 338 en 2016 à 628 en 2021³. Néanmoins, on

² Cisco, 2018, *Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016-2021*. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.html> [consulté en ligne le 10 janvier 2018].

³ Whitney Josh / Anthesis et Delforge Pierre /NRDC, 2018, *Data center Efficiency Assessment*. <https://www.nrdc.org/sites/default/files/data-center-efficiency-assessment-IP.pdf> [consulté en ligne le 10 mars 2018].

observe par exemple aux États-Unis que la consommation électrique des *data centers* a eu tendance à augmenter plus légèrement sur la période 2010-2014 (contrairement au 24% d'augmentation sur la période 2005-2010). Une augmentation de l'ordre de 4% est attendue sur la période 2015-2020⁴. L'histoire de la prise en compte de l'impact environnemental du numérique éclaire la situation actuelle.

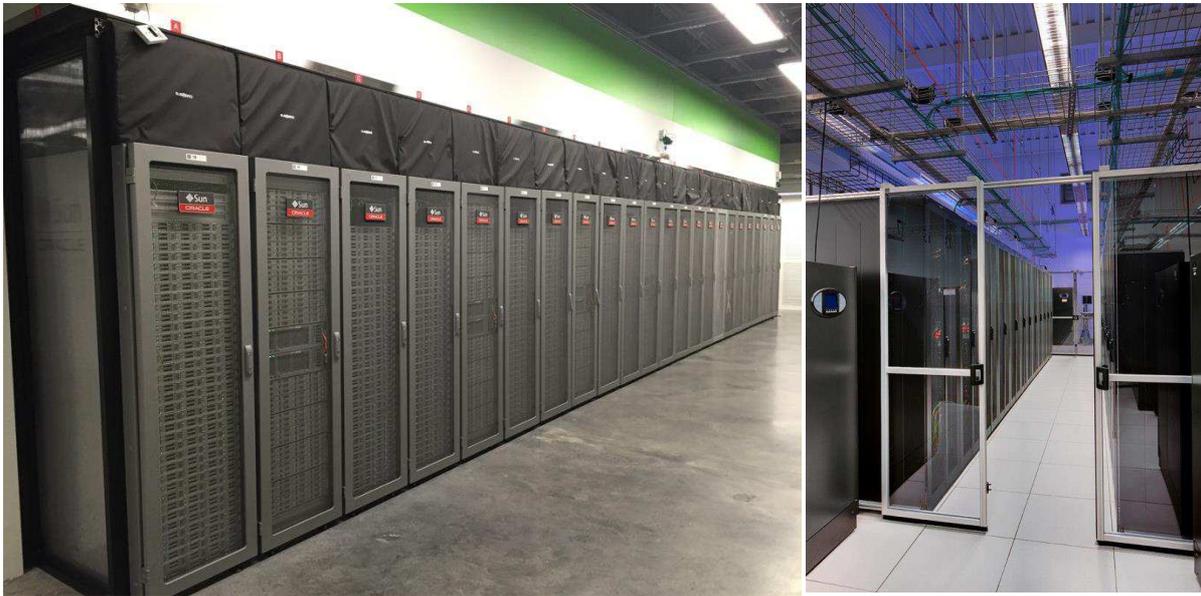


Figure 1. Intérieur d'un *data center* Oracle et celui de la clinique de Cleveland réalisé par l'agence Gensler, Crédits=© 2016.

1.1 Un impact environnemental majeur

Numérique et environnement au regard de l'histoire

Les premiers travaux sur l'impact environnemental et énergétique des technologies de l'information et de la communication apparaissent au tout début des années 2000. On peut faire l'hypothèse que le monde de la cybernétique n'avait pas prévu l'impact énergétique de l'Internet naissant parce que leur informatique n'était pas forcément basée sur une massification de la production et de l'exploitation des données personnelles (avec toute la dimension consumériste que cela suppose désormais). Mais aussi à cause d'un enthousiasme technologique qui leur permettait de croire que la technologie réglerait également ce problème.

Au début des années 2000, l'émergence et le développement de l'Internet grand public, des premiers réseaux sociaux et de la *smart city*, vont participer à un changement de paradigme. La massification de la production de données et de leur exploitation à des fins commerciales va nécessiter une nouvelle gestion de grande échelle remettant en question les coûts et la performance de l'infrastructure qui existait jusqu'alors. La notion de *smart city* est ensuite créée par les industriels et les ingénieurs de Cisco et IBM, entre 2004 et 2008, via un programme de recherche et de marketing aussi puissant qu'efficace. Alors que la crise économique touchait les États-Unis, les géants de l'informatique ont lancé un produit infrastructurel global qui n'a depuis cessé de dominer la prospective économique et urbaine. L'utopie de l'« environnement réactif » qui trouve ses origines dans les années 1970 propose ainsi de s'appuyer sur des machines pour optimiser et augmenter, calibrer et régler le projet urbain dans ses dimensions systémiques. Mais cet emballement a largement sous-estimé la physicalité, la matérialité et l'impact énergétique du phénomène.

⁴ Shehabi Arman, Josephine Sarah, Sartor Dale A, Brown Richard E, Herrlin Magnus, G Koomey Jonathan, Masanet Eric R, Nathaniel Horner, Inês Lima Azevedo, William Lintner, 2016, *United States Data center Energy Usage Report*, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-1005775.

Depuis le début de l'histoire de l'informatique, la focalisation sur la vitesse comme mesure centrale de la performance s'est faite au détriment d'autres mesures comme l'efficacité énergétique, tant qu'elle n'impactait pas les coûts. La communauté des *data centers* a réalisé le besoin d'une efficacité énergétique pour le calcul de haute performance, au moment où, en 2008, les coûts annuels de l'énergie pour un *data center* ont dépassé le coût d'achat annuel des serveurs.

Le problème de l'énergie et des ressources dans les data centers

Les composants des *data centers* ainsi que l'énergie nécessaire à leur fonctionnement posent des questions en termes d'efficacité énergétique et de sobriété :

- Métaux rares et cycle de vie
Comme tous les produits industriels, les équipements numériques suivent un cycle de vie en 5 étapes : l'extraction des ressources (métaux et terres rares⁵, silice) nécessaires à leur production, la conception des équipements (souvent en Asie), leur transport vers les usagers (par bateau, par avion ou camion), la phase d'usage et la fin de vie des équipements (réparation, recyclage, enfouissement). Chacune de ces phases génère des impacts environnementaux divers avec entre autres la consommation d'énergie primaire, consommation d'eau, toxicité et pollution (de l'air, des eaux et des sols), génération de gaz à effet de serre...
- Des infrastructures de refroidissement très consommatrices
Le système de refroidissement représente souvent 50% de la consommation électrique d'un *data center*. Il constitue donc un poste de R&D majeur, et un vecteur de performance énergétique via le *freecooling*, *watercooling* ou encore *geocooling*.
- Une redondance d'équipements de reprise sur problème (ou de secours)
Les salles de batteries, comme les générateurs de secours, occupent un espace non négligeable dans un *data center*, pour une utilisation très rare (hors tests mensuels). Ce sont donc avant tout des infrastructures dormantes. Les générateurs de secours sont alimentés au fioul, et génèrent des pollutions de l'air et sonores. Les sites accueillent de grandes cuves de fioul pour les alimenter.
- Des salles de serveurs suralimentées :
En 2015, l'institut Uptime a mené une étude sur les *data centers* nord-américains qui a révélé que 30% des serveurs de ces salles machines sont comateux (alimentés en électricité mais ne délivrant aucun service utile). De plus, les serveurs de calculs, de stockage et les équipements réseaux n'affichent pas une consommation électrique proportionnelle à leur charge. Cette absence avait été remise en avant par Barroso et al. en 2007⁶, elle est toujours d'actualité en 2018. De nombreux coûts électriques statiques (indépendants de la charge de travail) sont encore très importants.
Il est à noter que la concentration énergétique dans les *data centers* ne cesse d'augmenter : on parle aujourd'hui d'une concentration électrique pour les serveurs de 1,5 kW/m² environ, alors que les premiers *data centers* ne consommaient que 200 W/m²⁷.

Différentes métriques de qualité ont été proposées (notamment par GreenGrid) afin de mesurer et de comparer les impacts des *data centers*. La plus connue, le PUE (Power Usage Effectiveness), permet d'appréhender de manière relative le surcoût énergétique des infrastructures (bâtiments, refroidissement...) par rapport au coût électrique du numérique. Ainsi, un *data center* qui affiche un PUE de 2 injecte autant d'énergie électrique dans l'informatique du *data center* que dans l'infrastructure d'hébergement (refroidissement, éclairage, reprise sur problème...). Par exemple, l'ensemble des *data*

⁵ Guillaume Pitron, 2018, La guerre des métaux rares, la face cachée de la transition énergétique et numérique, Editions : Les liens qui libèrent.

⁶ Luiz André Barroso et Urs Hölzle, 2007, "The Case for Energy-Proportional Computing", *IEEE Computer*, Vol 40, Issue 12, décembre.

⁷ Entretien avec Hervé Mallet, directeur énergie à la Direction technique et SI d'Orange France à Paris.

centers de Google affiche une moyenne d'un PUE de 1.12 : pour chaque watt électrique injecté dans l'informatique, 0.12W additionnels sont nécessaires pour refroidir et distribuer l'électricité.⁸

Depuis le début des années 2000, de nombreux travaux de recherche académiques et industriels ont attaqué le problème de la consommation électrique importante des *data centers* en améliorant en parallèle les infrastructures de refroidissement (par air refroidi, par eau froide ou tempérée, par aération naturelle ou *free cooling*) et les systèmes logiciels composants des *data centers* (virtualisation, ordonnanceurs, gestionnaires de ressources⁹).

Une prise de conscience lente

Les recherches académiques sur la création de *data centers* et centres de calculs économes ont commencé au début des années 2000 avec les travaux de Wu Feng et de son équipe à Virginia Tech (Etats-Unis). Dans le cadre du projet *Super computing in small space*, les chercheurs ont développé Green Destiny Low Power Supercomputer (décembre 2001) qui a réussi à mettre en production des supercalculateurs en réduisant les coûts, la chaleur émise, l'énergie consommée et l'espace nécessaire.

Le terme éco-TIC a été créé en France le 12 juillet 2009 par la Commission Générale de Terminologie et de Néologie de l'informatique et des composants électroniques. Cette commission a publié dans le Journal Officiel le terme « écotecnologie de l'information et de la communication » ou éco-TIC comme équivalent au Green IT (JORF, 2009). Selon la même source, les éco-TIC désignent les « techniques de l'information et de la communication dont la conception ou l'emploi permettent de réduire les effets négatifs des activités humaines sur l'environnement »¹⁰. Malheureusement, cet effet *IT4Green*, où l'usage de l'informatique permet de réduire les impacts de certaines activités humaines, est encore très mal évalué et sujet à controverse. La plupart des études sur ce domaine ne sont pas assez documentées ou sérieuses. Les scénarios évalués montrent des impacts de réduction encore assez négligeables à grande échelle.¹¹

L'initiative Greentouch lancée en janvier 2010 par Alcatel-Lucent/Bell Labs s'est concentrée sur la réduction de la consommation électrique dans les réseaux de communication. Les membres fondateurs de l'initiative GreenTouch comprennent des opérateurs télécoms : AT&T, China Mobile, Portugal Telecom, SwissCom, Telefonica, des laboratoires universitaires de recherche : *Massachusetts Institute of Technology*, *Stanford University Wireless System Labs*, Institut pour une société à haut débit (IBES) de l'Université de Melbourne ; des organismes publics de recherche (CEA-LETI - Grenoble, INRIA, IMEC-Louvain) ; des laboratoires industriels de recherche (Freescale Semiconductor, Samsung Advanced Institute of Technology, Bell Labs). Le consortium a ensuite regroupé une cinquantaine de partenaires industriels, académiques ou institutionnels. Le but de ce projet a été d'explorer et de repenser l'ensemble des composants matériels et logiciels nécessaires pour la construction d'un Internet mondial qui ait une consommation électrique réduite d'un facteur 1000 par rapport à la consommation de 2010 tout en supportant les projections et augmentations de trafic de données prévues pour 2015.

L'efficacité énergétique du numérique en phase d'usage est un sujet de recherche à part entière dans la recherche académique et industrielle. En France, le groupement de services EcoInfo étudie les impacts et effets rebond de ces différentes phases¹². Plusieurs pistes sont étudiées avec des efforts sur l'écoconception du matériel (*hardware*) mais aussi plus récemment du logiciel (*software*) afin d'améliorer leur consommation électrique. La recherche d'efficacité énergétique des grands systèmes distribués (*data centers*, *Clouds*, centres de calcul hautes performances, réseaux) remet en cause la manière dont

⁸ Google *Data centers* : <https://www.google.com/about/datacenters/efficiency/internal/> [consulté en ligne le 12 avril 2017]

⁹ Orgerie Anne-Cécile, Dias de Assunção Marcos et Lefèvre Laurent, 2014, "A Survey on Techniques for Improving the Energy Efficiency of Large Scale Distributed Systems", *ACM Computing Surveys*, Volume 46, Numéro 4.

¹⁰ <http://www.cstic.fr.st/> [consulté en ligne le 5 mars 2017].

¹¹ Tinetti Benoit, Duvernois Pierre-Alexis, Le Guern Yannick., Berthoud Françoise, Charbuillet Carole, Gossart Cédric, Orgerie Anne-Cécile, Lefèvre Laurent, de Jouvenel François, Desauvay Cécile, Hébel Pascale, 2016, *Potentiel de contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux : Etat des lieux et enjeux pour la prospective* – Rapport Final ADEME, 145 pages.

¹² Groupe EcoInfo, 2012, *Impacts écologiques des Technologies de l'Information et de la Communication - Les faces cachées de l'immatérialité*, Editions EDP Sciences.

on doit concevoir ces infrastructures¹³. L'usage coordonné et orchestré de leviers verts (extinction, ralentissement, optimisation, consolidation) doit être étudié et mis en œuvre. En tant qu'infrastructure numérique massive et distribuée internationalement, les *data centers* ont un rôle central à jouer afin de réduire leur impact environnemental. Ils représentent aussi les infrastructures accompagnatrices clefs de la transition numérique en cours.

Dans les conférences internationales pour le climat (en anglais Conference of Parties, COP), le sujet des impacts énergétiques du numérique est arrivé tardivement comme un sujet en soi.

ICT is part of climate change !

Ecolinfo http://ecolinfo.org.fr
 Françoise Berthoud¹³, Laurent Lefèvre¹⁴, Cédric Gossart¹⁴ - Ecolinfo
 13 ENRIS-LPMMC, Comédoc, France - francoise.berthoud@comedoc.fr
 14 Inria - Avion Team - I3P Laboratory - Ecole Normale Supérieure de Lyon, France - laurent.lefevre@inria.fr
 15 Institut Mines-Télécom Télécom École de Management, Evry, France - cedric.gossart@telecom-em.fr

Can we reduce its impact and apply good practices and tools to other society domains ?

Not always !

Open challenges

- Eco Design
- Energy Proportionality, Energy Efficiency, Power Savings, Green Codes
- Reusing - Recycling

Good practices

- Modularity
- On/Off
- Repair

Rebound Effect Planned Obsolescence

Electrical (Smart) Grid, Transport Optimization, E-Gov, e-Health, Smart City

En prélude à la COP21 qui a eu lieu à Paris en 2015, les chercheurs de l'Inria et les membres du GDS Ecolinfo ont alerté la communauté scientifique sur les impacts environnementaux du numérique, lors de la conférence *Our Common Future Under Climate Change*¹⁴. Le numérique, malgré son aspect virtuel, est aussi responsable du changement climatique ! La part d'émission carbone de cette industrie était, semble-t-il, comptabilisée dans le secteur industriel, sans distinguer précisément du phénomène de croissance vertigineuse qu'elle connaissait. Alors que le numérique et les réseaux électriques intelligents (smart grids) ont été au cœur de la Cop21 (dont ERDF - Enedis aujourd'hui - était partenaire), le coût énergétique de l'innovation et de ces systèmes n'a pas fait l'objet de débat, ni d'orientation spécifique.

¹³ Orgerie Anne-Cécile, Dias de Assunção Marcos et Lefèvre Laurent, 2014, *op.cit.*

¹⁴ Berthoud Françoise, Lefèvre Laurent, Gossart Cédric, 2015, "ICT is part of climate change ! Can we reduce its impact and apply good practices and tools to other society domains?", "Our Common Future Under Climate Change" International Conference, Paris.

On note toutefois qu'Orange fait partie des 34 groupes français du CAC40 qui se sont engagés à soutenir et contribuer aux objectifs de la COP21. L'entreprise s'est engagée à réduire de 50 % ses émissions de CO2 par usage client d'ici 2020 (par rapport à 2006) et déployer l'économie circulaire (recyclage des matériaux, mobiles et autre) dans l'ensemble de ses processus d'ici 2020.

La Fondation Internet Nouvelle Génération (FING) a récemment proposé un livre blanc sur le numérique et l'environnement avec une liste de 26 mesures notamment sur la durabilité des équipements numériques et la généralisation de l'éco conception¹⁵.

La France est engagée dans une transition énergétique qui vise à limiter ses impacts environnementaux et à satisfaire ses engagements de réduction de génération de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement climatique. Pourtant les impacts environnementaux du numérique sont encore relativement mal évalués, notamment dans la prospective, à l'exemple du *Scénario négawatt 2017-2050* qui souligne pourtant que « l'explosion des technologies du numérique a accéléré la mutation déjà perceptible vers une approche de plus en plus "servicielle" de la demande énergétique¹⁶ ». Cette transition énergétique s'appuie sur le numérique, il n'est toutefois pas démontré que le numérique contribuera à la réduction des impacts environnementaux, c'est notamment le résultat d'une étude Ademe de 2016¹⁷.

Au-delà du champ de l'informatique, des chercheurs.e.s en écologie industrielle et en sciences sociales ainsi que des historien.n.e.s des techniques¹⁸ se sont intéressé.e.s à l'impact environnemental du numérique, dont les effets peinent à devenir un sujet central des politiques publiques environnementales.

En Ile-de-France, ce sont les rapports de la Direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie (DRIEE) et l'Agence Locale de l'Énergie et du Climat de Plaine Commune (ALEC) dès 2012 qui ont pris la mesure de cette problématique.

Les data centers dans la planification énergétique francilienne

En Ile-de-France, le schéma régional du climat, de l'air et de l'énergie (SRCAE) adopté en décembre 2012, fait apparaître les *data centers* comme un « potentiel nouveau », une « source possible » dans le cadre du développement de filières d'énergies de récupération de chaleur. Concernant la consommation énergétique, le texte précise qu'un « *data center* de 10000 m² a besoin d'une puissance de raccordement au réseau électrique de 20 MW et consomme autant en électricité qu'une ville moyenne de 50 000 habitants¹⁹. La récupération de la chaleur émise par les *data centers* est perçue comme un nouvel enjeu spécifique à la région francilienne mais qui mériterait « d'être mieux évalué en termes de potentiel ». L'installation de récupération de chaleur de Val d'Europe en Seine-et-Marne (alors en construction) est citée en exemple. Il est recommandé aux collectivités territoriales de : « prendre l'attache des opérateurs *data centers* existants pour étudier les possibilités de récupérer et valoriser la chaleur fatale (raccordement à un réseau de chaleur, chauffage d'immeubles, piscines, hôpital) ». ²⁰ Après le SRCAE, en 2013, la DRIEE a réalisé une étude sur les nouvelles consommations du Grand Paris qui annonçait pour l'électricité un appel de puissance supplémentaire de 4 000 MW se répartissant de la façon suivante : 400 MW pour les 72 gares du Grand Paris Express, 800 MW pour les 800 000

¹⁵ Iddri, FING, WWF France, GreenIT.fr, 2018, *Livre blanc Numérique et Environnement*.

http://fing.org/IMG/pdf/Livre_blanc_numerique_environnement_livreblanccolonum.pdf, 2018 [consulté en ligne le 15 avril 2018].

¹⁶ Association Négawatt, 2017, *Scénario négaWatt 2017 – 2050*.

https://www.negawatt.org/IMG/pdf/synthese_scenario-negawatt_2017-2050.pdf, p.8. [consulté en ligne le 15 mai 2018].

¹⁷ Tinetti Benoit, Duvernois Pierre-Alexis, Le Guern Yannick., Berthoud Françoise, Charbuillet Carole, Gossart Cédric, Orgerie Anne-Cécile, Lefèvre Laurent, de Jovenel François, Desaunay Cécile, Hébel Pascale, 2016, *op.cit*.

¹⁸ Citons notamment Florence Rodhain Bernard Fallery, Jean-Luc-Pensel, Fabrice Flipo, Michelle Dobré, Marion Michot. cf. Flipo Fabrice, Dobré Michelle, Michot Marion, 2013, *La face cachée du numérique L'impact environnemental des nouvelles technologies*, L'échappée.

¹⁹ « Les énergies récupérables, ou énergies fatales, désignent les quantités d'énergie inéluctablement présentes ou piégées dans certains processus ou produits, qui parfois - au moins pour partie - peuvent être récupérées et/ou valorisées, et qui, faute de l'être, « se perdent » dans la nature. Elles recouvrent notamment les déperditions d'énergie liées à la méthanisation ou l'incinération des déchets (fraction non - biodégradable), aux processus industriels (sous forme de chaleur), aux *data centers* et plus généralement à tous les processus impliquant de la production de chaleur. » Région Ile-de-France, 2012, *Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Énergie de l'Île-de-France*,

http://www.srcae-idf.fr/IMG/pdf/SRCAE_-_Ile-de-France_version_decembre_2012_vdefinitive_avec_couverture_-_v20-12-2012_cle0b1cdf.pdf [consulté en ligne le 5 mai 2018].

²⁰ *Idem*, p.204.

logements supplémentaires, 1 300 MW pour le million d'emploi dans le tertiaire et l'industrie, 500 MW pour 1 million de véhicules électriques et 1 000 MW pour les *data centers*.

Dans cette étude de 2013, les *data centers* représentent ¼ des besoins électriques supplémentaires à horizon 2030. Cette étude a eu un retentissement important et ces chiffres ont largement été repris dans la presse car elle montrait un accroissement par rapport au tendanciel SRCAE de plus de 2 200 MW, alors même qu'une maîtrise des consommations électriques était préconisée. Une des ambitions de l'étude était de montrer l'immense effort à fournir pour atteindre l'objectif de 20% d'Enr en 2020.

C'est à la même période que l'ALEC de Plaine commune réalise une étude sur les *data centers* de son territoire²¹ qui va connaître un grand succès de presse. Créée entre 2011 et 2013, cette Agence Locale de l'Énergie et du Climat propose (dans une approche systémique au croisement des questions écologiques, économiques et sociales) un accompagnement stratégique et opérationnel sur le territoire et rassemble des acteurs publics et privés comme EDF, Engie, Enedis, Icade, Bouygues. L'étude *Les data centers sur Plaine Commune* est la première étude de l'agence. C'est à la veille des élections municipales de 2014, que le sujet du *data center* est devenu un sujet politique dans le contexte de l'opposition au développement d'un projet de *data center* à La Courneuve. L'agence a été sollicitée par des élus et des habitants et s'est saisie du sujet à un moment où il y avait peu d'études de références sur le sujet. Le document produit permet de comprendre ce qu'est un *data center*, ses impacts et d'envisager des éléments de réflexion pour aller vers une meilleure gestion de ce type d'infrastructure sur le territoire. Il est notamment recommandé dans les dernières pages de travailler sur : une meilleure transparence sur la puissance électrique réellement nécessaire, la question de l'utilisation de sources froides locales (*freecooling* et *water cooling*), la récupération de la chaleur et de sa valorisation.

Au niveau européen, la Commission Européenne s'est saisie du sujet et a publié dès 2008 un Code de Conduite des *Data centers*²² destiné à encourager les opérateurs et parties prenantes des *data centers* à mettre en œuvre des bonnes pratiques pour réduire leur impact environnemental, économique et sur la sécurité de l'approvisionnement en énergie. L'application de techniques efficaces en consommation énergétique des serveurs, la virtualisation de services à grande échelle, une meilleure gestion des serveurs ont contribué à limiter l'augmentation de cette consommation. Mais de nombreux gaspillages sont encore présents à tous les niveaux.

1.2 Angles morts environnementaux et risques

Pollutions et nuisances

Déjà en 2013, l'ALEC Plaine Commune identifiait trois risques et nuisances liés aux grands *data centers* :

- La présence de grande quantité de fioul sur les sites.
- Le bruit provoqué par les installations de refroidissement, voire par les serveurs en fonctionnement.
- Les nuisances électromagnétiques.

Stockage de fioul

Tous les *data centers* sont équipés de cuves de fioul pour produire de l'énergie en cas de coupure électrique. Il y a donc un risque pour l'environnement et les personnes en cas de fuite, voire d'explosions de ces cuves. Par ailleurs, l'utilisation des générateurs de secours peut être un facteur de pollution de l'air pendant les tests et les urgences. Ces équipements sont d'ailleurs soumis à la réglementation ICPE (installation classée pour la protection de l'environnement) et à des contrôles périodiques. Pour donner un ordre de grandeur, le *data center* d'Atos à Saint-Ouen (93) stocke 60 000 litres de fioul pour permettre, avec les groupes électrogènes, une alimentation du site pendant 48 heures. La question de la dépollution de sites, après usage, se posera également dans le futur, comme pour le démantèlement des stations-essence aujourd'hui.

²¹ Alec, 2013, *Les data centers sur Plaine Commune*. <http://www.alec-plaineeco.org/les-data-centers/> [consulté en ligne le 5 décembre 2017].

²² European Commission, 2008, *Code of Conduct on Data Centres Energy Efficiency*.

Nuisances sonores

Un autre point a soulevé de fortes contestations lors de l'implantation de certains *data centers* : le bruit des groupes froids. Comme toute ICPE, les *data centers* doivent respecter la réglementation sur le bruit (arrêté du 23 janvier 1997). Cette réglementation limite l'émergence sonore des installations en fonction de leur activité et du moment de la journée. Il est donc nécessaire de faire une étude d'impact sur le bruit au préalable, avant la construction du *data center*.

- C'est sur ce point que les habitant.e.s de La Courneuve (93) ont attaqué Interxion lors de son implantation rue Rateau. Cette plainte, relayée dans les médias, est même allée jusqu'à la prononciation d'une annulation de l'autorisation d'exploiter du *data center* en octobre 2015.
- Un problème similaire a eu lieu sur un *data center* de l'opérateur Zayo, dans le quartier du Sentier à Paris en 2016. Zayo a été obligé de faire des travaux pour résoudre ce problème.

Champs électromagnétiques

Un autre problème relatif aux *data centers* est le risque de perturbations liées aux champs électromagnétiques (la question de la nocivité de ces champs électromagnétiques ne s'applique évidemment pas qu'aux *data centers*). A l'heure actuelle, le consensus scientifique officiel est que ces ondes électromagnétiques ne représentent pas de danger avéré pour la santé :

- En octobre 2013, l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) publie un rapport d'expertise collective sur la question des radiofréquences (saisine n° « 2011-SA-0150 »). En s'appuyant sur 308 articles scientifiques, l'étude conclue que pour la majorité des effets, le niveau de preuve est insuffisant à ce stade et de nombreux travaux à approfondir, notamment sur les effets concernant la fertilité. Seul le niveau de preuve concernant le gliome (tumeur) est relevé comme « insuffisants en population générale, limitées pour les utilisateurs intensifs ».
- L'Académie nationale de médecine a publié en 2009 un communiqué intitulé « Réduire l'exposition aux ondes des antennes-relais n'est pas justifié scientifiquement ». Cependant, l'OMS a classé en 2011 les champs électromagnétiques émis par les terminaux mobiles connectés comme « potentiellement cancérigène ». L'existence de ce risque pour la santé humaine a été formellement inscrite dans la loi n° 2015-136 du 9 février 2015 qui entend limiter l'exposition aux ondes des personnes les plus vulnérables. Des associations comme Robins des toits défendent par ailleurs le fait qu'il existe un risque à une exposition à ces ondes et mettent en avant le principe de précaution.

Impacts sur l'air, l'eau, les sols

L'impact environnemental spécifique au *data center* ne semble pas ou peu étudié à ce stade concernant :

- les effets d'îlot de chaleur urbain
- les consommations d'eau
- la biodiversité

On peut en effet se demander si les *data centers* ont un impact particulier en ces domaines, différent de celui d'une plateforme logistique ou d'un bâtiment industriel par exemple.

L'effet îlot de chaleur urbain

Lors de nos échanges avec IDEX en mars 2018, son directeur Développement Réseaux de chaleur et de froid, Guillaume Planchot, soulignait ainsi, en parlant du *data center* Global Switch à Clichy, que toute la chaleur des condenseurs est rejetée dans l'atmosphère. Elle contribue au phénomène d'îlot de chaleur urbain, c'est-à-dire le phénomène qui consiste à amplifier la température localement ressentie à proximité de ces tours de refroidissements.

La récupération de chaleur n'est donc pas qu'une question de récupération d'énergie fatale, mais aussi de lutte contre le phénomène d'îlot de chaleur urbain. Rappelons que le département de la Seine Saint-Denis a vu une surmortalité de + 160% du fait de la canicule en 2003, ce qui en a fait le 2nd département le plus touché de France²³. C'est un territoire qui cumule des populations fragiles et des tissus urbains

²³ Institut de Veille Sanitaire, 2003, *Impact sanitaire de la vague de chaleur d'août 2003 en France. Bilan et perspectives*, octobre 2003.

très minéralisés²⁴. Les nombreux *data centers* installés au sud du département viennent donc potentiellement aggraver cette situation.

On peut noter qu'à Aubervilliers, le *data center* d'Equinix (rue Waldeck Rochet) utilise un revêtement clair sur une partie de sa toiture pour favoriser le réfléchissement solaire, et ainsi limiter le réchauffement local²⁵. Cette bonne pratique, commune à de nombreux bâtiments à toiture plate, est rendue parfois difficile pour les *data centers* dont le toit est souvent occupé par des équipements techniques peu visibles depuis le sol, mais très rarement recouverts par une véritable toiture.

Quelques *data centers* développent par ailleurs des toitures végétalisées, ayant également un impact positif sur la température et l'humidité de l'air local, comme l'opérateur Neocenter Ouest à Nantes par exemple.

L'impact sur l'eau

La consommation d'eau par les *data centers* (pour leur refroidissement) est une problématique peu présente en France, mais davantage dans des territoires comme la Californie, sujette chronique à des épisodes de sécheresse. Un *data center* de 15 MW peut utiliser jusqu'à 1,6 million de litres d'eau par jour (ou 1600 m³) selon le vice-président opérationnel d'Infomart, Paul Vaccaro, opérateur américain de *data centers*²⁶.

Si de rares installations comportent des boucles d'eau fermées qui minimisent les consommations, la plupart sont branchées sur les réseaux locaux d'eau potable, ce qui représente un coût important de traitement pour les collectivités locales, mais peut aussi les obliger à redimensionner leurs équipements. Il en a été ainsi de la ville de Prineville (Oregon) à l'arrivée de Facebook et Apple, qui ont, cependant, co-investi à ses côtés dans une nouvelle usine de traitement des eaux usées.

De rares *data centers* ont mis en place des solutions alternatives. C'est le cas du *data center* Infomart à San Jose (Californie), ou de celui de Google à Douglas (Géorgie, Etats-Unis) qui utilisent les eaux grises locales pour leur refroidissement. Cela suppose des investissements que ces acteurs ont jugés pertinents de réaliser pour réduire leur facture d'eau. Les collectivités les ont accompagnés, y trouvant aussi un bénéfice environnemental et économique.

Ce type de projet reste assez peu répandu, mais les villes comme Paris qui disposent d'un réseau d'eau non-potable peuvent ainsi offrir une option très intéressante pour les *data centers* comme pour leur propre réseau d'eau potable, ainsi économisé.

L'impact sur la biodiversité

La configuration des grands *data centers* en particulier, créant de vastes emprises fermées, très clôturées, n'est pas propice aux continuités écologiques. Pour autant, selon les communes et leur PLU / PLUi, il existe des obligations en matière d'espaces de pleine terre ainsi que différents coefficients d'emprise au sol (CES) qui peuvent minimiser l'imperméabilisation des sols et favoriser, à leur mesure, la biodiversité.

Les études ICPE comprennent un volet faune, flore, milieux naturels, incluant notamment les impacts sur des périmètres environnementaux comme les zones Natura 2000 ou les ZNIEF. Elles se positionnent cependant davantage en tant qu'outil pour minimiser les impacts négatifs que pour améliorer la situation existante.

Un point à noter en termes d'occupation des parcelles, et soulevé à plusieurs reprises par les opérateurs de *data centers*, concerne la réglementation en matière de stationnement. Comme ils ne génèrent que peu d'emplois, les normes pourraient souvent être abaissées en termes de places de parking à garantir, libérant potentiellement plus de pleine terre et de surfaces végétales.

²⁴ DGE-CDC-CGET, 2015 *Guide sur le Cloud computing et les datacenters à l'attention des collectivités locales*. https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/secteurs-professionnels/numerique/guide-cloud-computing-et-datacenters-2015.pdf [consulté en ligne le 10 janvier 2018].

²⁵ Visite de site en mars 2018.

²⁶ Entretien avec Paul Vaccaro, septembre 2017 à Hillsboro.

1.3 La croissance effrénée du stockage de données et de leur traitement

Malgré les progrès, les tendances actuelles des pratiques numériques, la croissance continue du *cloud*, le développement du *edge* et de l'internet des objets (IoT), la tendance à la centralisation des données par les GAFAM sont autant de facteurs qui viennent augmenter le nombre, la puissance et les consommations énergétiques des *data centers*.

Selon Cisco, le trafic internet (IP) aura été multiplié par 3 entre 2016 et 2021²⁷. Cette croissance est alimentée par plusieurs phénomènes décrits ici et s'accompagne de toujours plus d'espaces de stockage et de traitement.

Le Cloud et l'externalisation du stockage de données

Depuis le début des années 2010, la poursuite de la numérisation de l'économie a poussé de nombreuses entreprises à externaliser une partie de leurs services informatiques, à abandonner le stockage de leurs données dans leur propre bâtiment, pour le confier à des spécialistes du *Cloud*, dont les acteurs dominants sont Microsoft Azure, Amazon Web Services, Google Cloud, Salesforce mais aussi OVH en France. Le *Cloud* permet d'héberger ses données, ses applications, ses calculs dans un *data center* externe, et d'y avoir accès partout grâce à Internet. L'infrastructure et les services sont gérés par un fournisseur de service prenant en charge l'exploitation, la maintenance et le support. Il y a trois familles de services de *Cloud* :

- IaaS (*Infrastructure as a service*) qui correspond à la location de capacités de calcul et de stockage ;
- PaaS (*Platform as a service*) qui met à disposition des clients des plateformes de développement prêtes à l'emploi, pour développer et déployer leurs propres applications ;
- SaaS (*Software as a Service*), qui est une offre complète d'applications métiers, de logiciels, que les clients paient soient au temps d'utilisation, soit au nombre d'utilisateurs.

Un *Cloud* peut être dit « public », c'est-à-dire partagé entre un nombre illimité de clients ; il peut être dédié à un client spécifique, calibré selon ses besoins, et donc « privé ». Enfin, le *Cloud* peut être « hybride ». Il combine alors l'utilisation d'un *Cloud* public (notamment en période de montée en charge) dans un environnement en cloud privé²⁸.

Les individus ont procédé de même avec leurs données personnelles, de façon parfois subie : stockage de la musique via des services comme Spotify ou Deezer, des photos via Google ou I-Cloud (Apple) ; échanges de fichiers via Dropbox ; hébergement des mails et pièces jointes via Gmail (Google), Yahoo ou Microsoft ; de contenus et d'échanges chez Facebook. En conséquence, les terminaux informatiques ont de moins en moins de mémoire de stockage, de flexibilité (et de « générativité ») et les smartphones prennent peu à peu les pas sur les ordinateurs pour accéder à Internet. Le Baromètre du Numérique France 2017 précise en effet que 73% des Français possèdent désormais un smartphone (+8 points en un an) alors que seuls 17% des Français en possédaient un en 2011. La téléphone fixe (-1 point) et l'ordinateur (-1 point) perdent du terrain, le taux de connexion à l'Internet fixe reste stable (85%).

Le Cloud mondial s'est développé depuis la seconde moitié des années 2000 (Amazon Web Services a été créé en 2006 par exemple), mais plus encore à partir de 2010, date à partir de laquelle le cloud provoque le développement accéléré des *data centers*. Selon Cisco²⁹, toutes les opérations liées au Cloud représentent en 2017, 90% du trafic des *data centers* (et représentera 95% en 2021). En France, le cabinet IDC souligne que le marché du cloud privé a augmenté de 20% entre 2016 et 2017, et de 25% pour le cloud public (en chiffre d'affaire).

²⁷ Cisco, 2017, *Visual Networking Index: Forecast and Methodology*, 2016 - 2021, *op.cit.*

²⁸ Pour en savoir plus, voir DGE-CDC-CGET, *Guide sur le Cloud computing et les datacenters à l'attention des collectivités locales*, juillet 2015, *op.cit.*

²⁹ Cisco, 2017, *Global Cloud Index: Forecast and Methodology*, 2016 – 2021, *op.cit.*

Les opérateurs de *Cloud*, notamment la triade dominante (AWS, Google, Microsoft) développent leurs propres *data centers*, appelés *hyperscale*, car aux dimensions gigantesques, mais utilisent également les *data centers* de colocation où sont hébergés de nombreux autres clients (chez Equinix, Interxion, Data 4 ou Telehouse). Le recours à ces derniers s'explique par leur localisation, souvent bien plus métropolitaines, près des marchés de consommateurs et des entreprises, mais aussi parce que la croissance de la demande pour les clouds dépasse les capacités de construction neuve de ces opérateurs, malgré le rythme pourtant effréné des nouvelles constructions. Les *data centers* de colocation restent ainsi les portes d'entrées du réseau et constituent des points d'échanges stratégiques.

Il faut noter que le mouvement de migration des entreprises vers le *Cloud* se poursuit, et les fournisseurs déploient des campagnes agressives de marketing pour accélérer cette transition. En conséquence, dans le monde comme en France, les différents types de *Cloud* vont continuer à prendre une importance majeure dans l'économie. Selon le même rapport de Cisco, le trafic Internet global lié au *Cloud* va être multiplié par 3,3 entre 2017 et 2021. Les *data centers* auront alors une capacité de stockage 4 fois supérieure à 2017, soit 663 exa-octets.

Pour autant, toutes les entreprises ne migreront pas sur un *Cloud*, ou pas totalement, et ce pour plusieurs raisons :

- Volonté de contrôler leur infrastructure (en fonction de leur activité, histoire, compétences internes...).
- Taille d'entreprise et sensibilité des données suffisantes pour justifier d'avoir son ou ses propres *data centers*.

Certaines entreprises hébergent localement leurs données, et il existe de très nombreux *data centers* d'entreprises, en particulier bancaires mais pas seulement : EDF et Orange à Val-de-Reuil, BNP Paribas et Natixis à Marne-la-Vallée pour des exemples français. Cela concerne avant tout les entreprises du CAC 40.

L'Etat et les collectivités locales ont et peuvent avoir leurs propres *data centers*, notamment pour de l'archivage mais pas uniquement. La question de la souveraineté des données impacte fortement leurs choix et obligations (voir ci-après). On peut citer le *data center* d'Osny dans le Val-d'Oise (800 m²), construit pour les Douanes et utilisé par plusieurs ministères.

La croissance des échanges et du traitement de données, l'explosion des objets connectés

En plus de la migration de données existantes, d'infrastructures internes d'entreprises vers les *data centers*, la création de nouvelles données, toujours en meilleure définition donc prenant plus de place et d'énergie, continue d'exploser et cette tendance se poursuivra dans les prochaines années. Plusieurs phénomènes expliquent cette croissance :

- La numérisation de l'économie continue d'atteindre les entreprises qui n'avaient pas encore engagé ce chantier.
- D'ici 2020, selon Gartner, l'Internet des objets (IoT) atteindra 25 à 30 milliards d'équipements connectés (on parle de 50 à 125 milliards pour 2030), sans compter les tablettes et les PC : on parle ici aussi bien des smartphones, des montres connectées que des appareils domotiques. Selon Intel, le véhicule dit autonome est lui-même un objet connecté qui produira 4 téraoctets de données par jour à traiter et stocker. Entre prophétie auto-réalisatrice et croissance réelle, cette escalade interroge dans un monde où les limites de la croissance ont été largement dépassées.
- La *smart city* est devenue un paradigme dominant de l'urbanisme contemporain, qui suppose la collecte et le traitement de nouvelles données via de multiples capteurs, ainsi que la création de doubles numériques des bâtiments, des villes et des territoires sous la forme du BIM (*Building Information Model*), du CIM (*City Information Model*) et de multiples plateformes 3D.
- Les individus participent aussi de l'explosion des échanges de données via l'échange toujours croissant de vidéos, photos, messages, likes, commentaires, porté notamment par les réseaux sociaux. Cette production exponentielle de données personnelles est largement favorisée par ces mêmes réseaux sociaux, elle est au cœur de l'économie actuelle du web, fondée sur la publicité, donc sur le profilage des internautes et la collecte de leurs données personnelles. Une

économie des données s'est ainsi développée autour des brokers de data comme Datalogix ou Acxiom, dont l'activité est l'exploitation des données personnelles. Acxiom, société américaine, posséderait d'après la Federal Trade Commission près de 700 millions de données sur les consommateurs à travers le monde, lui permettant de dégager un revenu de près de 850 millions d'euros en 2016³⁰.

- La vidéo à la demande (*en streaming*) accélère aussi fortement les besoins : elle représente 63% du trafic global d'Internet en 2015 et devrait atteindre 80% en 2020³¹.

Les chiffres se succèdent, aussi vertigineux du côté consommation énergétique. Ils sont à prendre avec beaucoup de précaution. Ils couvrent une gamme de scénario et d'hypothèses potentiellement très différents et avec des ordres de grandeurs assez variés.

En 2013, les chercheurs du projet GreenTouch³² estimaient que la consommation électrique du monde informatique était de l'ordre d'une centaine de gigawatts de puissance instantanée fournie en permanence à l'échelle mondiale (117.6 GW soit la puissance de plus d'une centaine de réacteurs nucléaires). Les trois grandes familles de consommateurs (équipements terminaux, équipements réseaux et *data centers*) ayant des consommations assez proches.

Encore pire, une étude de 2015 de Anders Andrae et Tomas Edler du centre R&D de Huawei, estimait que le secteur informatique (réseaux, matériels, centres de données, production de ces matériels) consommait 7% de l'électricité mondiale en 2013³³, soit la puissance de 210 réacteurs nucléaires pendant un an. Les centres de données représentaient eux 2% de l'ensemble mondial, soit 420 TWh ou 60 tranches nucléaires. Les prévisions atteignent un maximum de 13% de l'électricité mondiale consommée par les *data centers* en 2030, et 51% pour le secteur informatique dans sa totalité, soit respectivement 1130 et 4400 réacteurs nucléaires. La démesure est chiffrée.

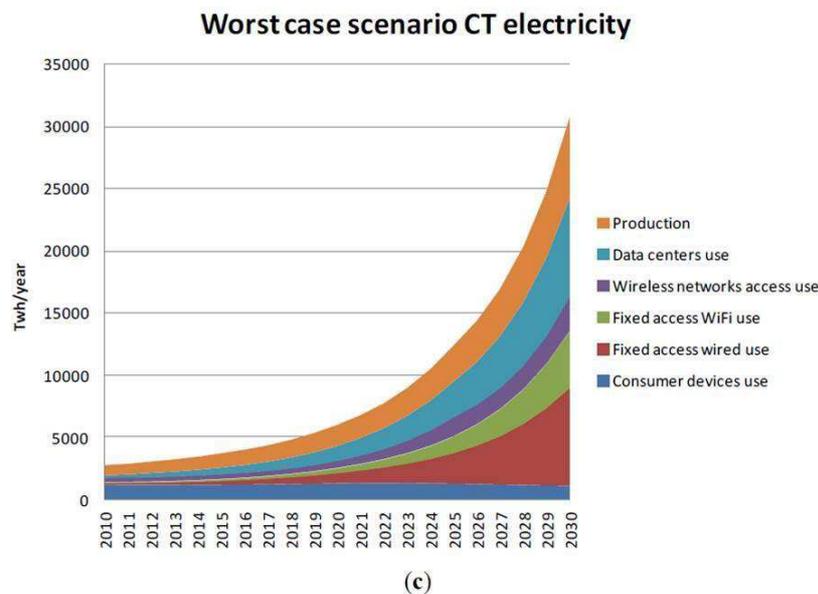


Figure 9. (a) Trends per CT category for best-case global electricity usage 2010–2030. (b) Trends per CT category for expected-case global electricity usage 2010–2030. (c) Trends per CT category for worst-case global electricity usage 2010–2030.

Figure 2. Tendances de consommation électrique 2010-2030 : scénario du pire. Crédits=©Etude Andrae/Edler

³⁰ Pour en savoir plus : <https://atelier.bnpparibas/smart-city/article/data-brokers-commerce-donnees-personnelles>

³¹ Cisco, 2017, *Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016–2021*, op.cit.

³² Projet GreenTouch : Gwatt : <http://alu-greentouch-dev.appspot.com>

³³ Andrae Anders S. G. et Edler Tomas, 2015, "On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030", *Challenges* 6, 2015, pp. 117-157. Dans cette étude, la consommation électrique en 2013 est estimée à 21 000 TWh (7% représentent 1470 TWh) et les projections pour 2030 atteignent 61 000 TWh. On compte une production annuelle de 7 TWh pour un réacteur nucléaire.

L'émergence et le développement du edge

Le *edge computing* se définit comme une architecture informatique distribuée (ou décentralisée) dans laquelle les données client sont traitées à la périphérie du réseau, aussi près que possible de la source générant les données. Ces techniques peuvent être combinées avec des technologies de type Content Delivery Network (CDN) comme, par exemple, l'ensemble des *data centers* de la société Akamai réparti sur de nombreux pays afin de délivrer des contenus publicitaires rapides et personnalisés sur le web. Le *edge* permet aussi de répondre aux futurs enjeux des réseaux mobiles (type 5G, avec des besoins de latence de 10 ms) qui reposent sur une réponse rapide des services du *Cloud* afin de supporter de nouveaux services pour les smartphones et équipements mobiles.

C'est donc aussi une informatique conçue pour accompagner le développement des objets connectés. Les objets peuvent traiter ou stocker les données qui n'ont pas besoin d'être renvoyées à un nœud central, allégeant ainsi le réseau Internet, et améliorant la rapidité des échanges locaux. Ce travail local peut également être effectué par des micro *data centers*. Le cabinet IDC estime ainsi que 40% des données de l'IOT seront traitées, stockées, analysées, exécutées sur le edge d'ici 2020³⁴.

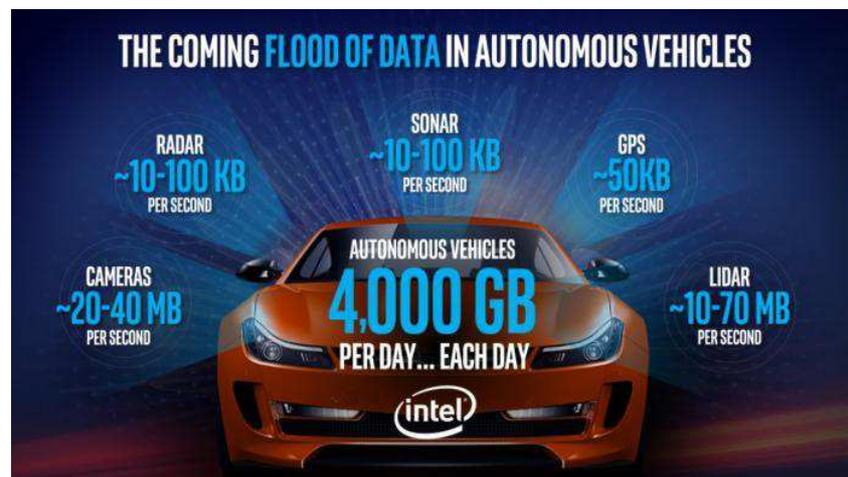


Figure 3. Les données du véhicule dit autonome, 2017. Crédits=© Intel.Corp.

Intel prévoit de son côté que chaque voiture connectée et dite autonome produira 4 téraoctets de données par jour, ce qui équivaut à la quantité de données produite en 1 jour par 30000 personnes, précise l'entreprise. Même si la majorité des données est traitée par les équipements informatiques internes de la voiture, beaucoup de données devront être traitées par les *data centers* externes (en mode *edge* ou centralisé).

Des concepts sont ainsi en cours de développement, pour imaginer ce que sera le micro *data center* de demain : une partie des serveurs dans les *data centers* métropolitains ? Des armoires-*data centers* en milieu dense ou immergés dans les océans comme les *data centers* de Microsoft (Projet Natick) ? Une micro-installation dans des bâtiments tertiaires ou du logement (à l'exemple des chaudières numériques proposées par la société française Stimergy ou des chauffages électriques de la société française Qarnot Computing) ? Des *mini data centers* conteneurs comme le StarDS Marilyn de l'entreprise Céleste ou celui plus *low tech* proposé par le département of Electrical and Computer Engineering de l'Université de Rutgers dans le New-Jersey ? Ce micro *data center* appelé Parasol³⁵ est localisé dans un container sur le toit de l'un des bâtiments de l'université. La partie informatique repose sur deux baies de processeurs et architectures basse consommation et est alimentée partiellement par des panneaux solaires. Il utilise un refroidissement à base de *free cooling*. Des systèmes de bascule automatique favorisent au maximum l'utilisation d'énergie renouvelable. Le système Parasol est un

³⁴ MacGillivray Carrie et Turner Vernon, 2017, « IDC FutureScape: Worldwide Internet of Things 2018 Predictions », Web Conference: Tech Buyer. <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=AP43372517> [consulté en ligne le 7 mars 2018].

³⁵ Micro *data center* Parasol de l'université de Rutgers, New Jersey, USA : <https://www.cs.rutgers.edu/content/parasol-rutgers-green-udatacenter> [consulté en ligne le 11 janvier 2018].

démonstrateur de micro *data center* (type *edge computing*) à faible consommation énergétique ; il sert de validation pour les chercheurs travaillant sur les *data centers* à haute efficacité énergétique.

Cette réorganisation de l'architecture virtualisée de fédérations de *data centers* implique une dissémination de plus petits *data centers*. Comment garantir la même qualité de service, la résistance aux pannes, la sécurité sur ces nouvelles infrastructures hautement distribuées ? Des risques de surdimensionnement de l'infrastructure numérique sont à craindre. Le modèle *edge* n'est pas encore stabilisé comme on le voit dans la fameuse courbe de l'innovation du cabinet Gartner, puisqu'il est dans la phase *innovation trigger*, et considéré comme mûr d'ici 2 à 5 ans.

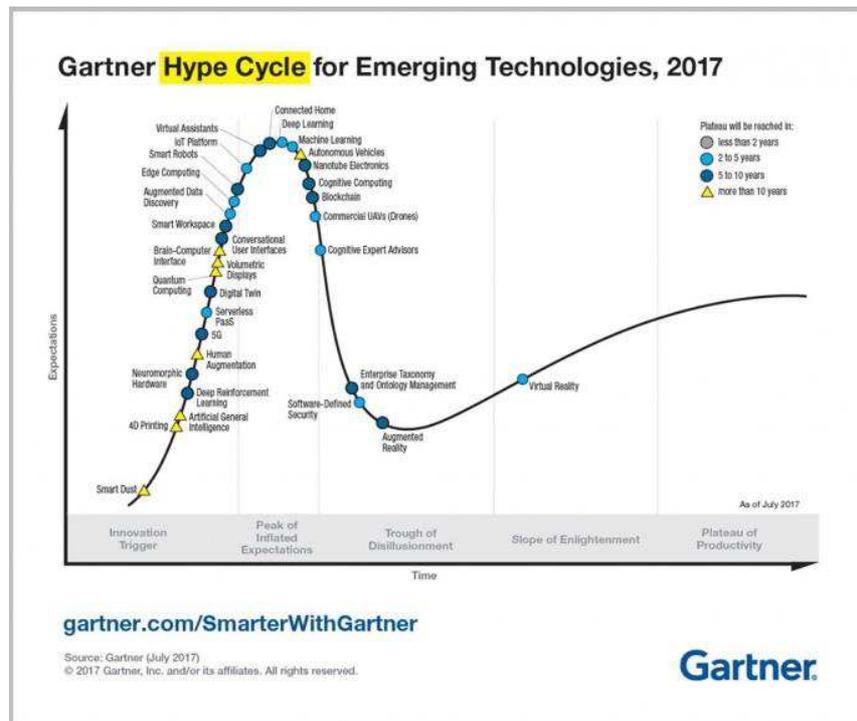


Figure 4. Courbe des technologies émergentes, 2017, Crédits=© Gartner.

Parler de numérique pervasif ou ubiquitaire prend encore plus corps dans l'espace avec le *edge*, puisque tous les objets et infrastructures suivants auront leur rôle à jouer dans le stockage et le traitement des données :

- A la maison : console de jeux, box interne, appareils électro-ménagers, PC personnels, assistant personnel domotique.
- Objets mobiles : smartphones, antennes 5G, montres connectées.
- Immobilier tertiaire, équipements publics, commerces : serveurs *edge*, micro *data center*, wifi local, capteurs.
- Mobilité : feux connectés, véhicules connectés.

Ainsi, aux côtés de la tendance à la massification des centres de données avec les *hyperscale data centers* des GAFAM, le retour à l'échelle locale est aussi une tendance lourde, qui vient a priori compléter le système numérique plutôt qu'amener de la concurrence.

Les GAFAM comme facteur supplémentaire de création, centralisation et stockage des données

Le phénomène des centres de données *hyperscale* - qui est en train d'arriver en France - , est l'illustration la plus spectaculaire de la concentration économique des acteurs du numérique que l'on appelle désormais les *Big Tech* (par analogie aux *Big Oil*, *Big Tobacco*). Leur monopole sur la collecte de données personnelles induit des *data centers* de très grande échelle, mais aussi une concentration spatiale des données, qui malgré la redondance, se situe à l'opposé du modèle pré-web d'Internet, quand le stockage se faisait davantage de pair-à-pair, et quand le caractère distribué était synonyme de résilience.

Cisco³⁶ considère que les centres de données *hyperscale* sont ceux qui sont opérés par des opérateurs de *Cloud* également *hyperscale*. L'entreprise a identifié 24 opérateurs de ce type en 2017, qui doivent correspondre aux critères suivants :

- Plus d'1 milliards \$ annuels de chiffre d'affaire provenant de services IaaS, PaaS ou de services d'hébergement (comme Amazon/ AWS, Rackspace, Google).
- Plus d'2 milliards \$ annuels de chiffre d'affaire provenant de services SaaS (Salesforce, ADP, Google).
- Plus d'4 milliards \$ annuels de chiffre d'affaire provenant d'Internet, moteurs de recherche et réseaux sociaux (Facebook, Apple, Yahoo).
- Plus d'8 milliards \$ annuels de chiffre d'affaire provenant du e-commerce et des paiements en ligne (Amazon, Alibaba, eBay).

Selon le même rapport, ces centres de données *hyperscale* passeront d'un nombre de 338 fin 2016 à 628 dans le monde en 2021, représentant alors 53% de tous les serveurs installés. Le trafic web sur ces sites sera multiplié par 4, passant de 39% du trafic total entre tous les *data centers* à 55%.

Leur croissance se poursuit donc à un rythme très rapide et partout dans le monde.

Souveraineté numérique et protection des données personnelles

Enfin, deux facteurs réglementaires impactent le marché des *data centers* :

- la protection des données personnelles
- la souveraineté numérique

Le Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD)³⁷, est un règlement européen qui est rentré en application le 25 mai 2018, et qui harmonise le cadre juridique à l'échelle de l'UE. Il améliore la protection des données personnelles en exigeant le consentement clair des internautes sur le traitement de leurs données, en permettant un certain droit à l'oubli, la portabilité des données, en renforçant la sécurité physique et informatique, en alertant obligatoirement les usagers d'un vol de leur données ou d'une intrusion. Tous les acteurs manipulant des données personnelles, dont les *data centers*, doivent se mettre en règle avec la RGPD. En cas de non-respect, une amende pouvant aller jusqu'à 4% d'amendes du CA annuel et 20 M € maximum sera exigée. Cette réglementation étant européenne, elle ne va cependant pas contribuer à creuser les différences entre pays d'accueil de *data centers*.

Par ailleurs, une note d'information de la DGCL relative à l'informatique en nuage (avril 2016) fait obligation aux collectivités locales françaises d'héberger leurs données en France par un opérateur qui garantit que l'ensemble des données sont stockées et traitées sur le territoire français, dans un Cloud dit *souverain*. Les données des collectivités publiques étant considérées comme des archives, elle relève du régime des trésors nationaux dès leur création, il est donc illégal de les conserver hors du sol français. Deux Clouds souverains ont ainsi été créés en ce sens dès 2012, avec l'Etat actionnaire via la Caisse Des Dépôts et Consignations (CDC), et en partenariat avec SFR, Orange, Thalès et Bull :

³⁶ Cisco, 2017, Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016–2021.

³⁷ Par données personnelles, la RGPD entend toute information susceptible d'identifier directement ou indirectement une personne physique.

Cloudwatt et Numergy. Ils n'ont finalement pas convaincu les clients potentiels. En 2015, l'État s'en retire et Orange intègre Cloudwatt comme une filiale de son *Cloud*, SFR fait de même avec Numergy. Entretemps, des acteurs français du *Cloud* se développent, comme OVH, Outscale ou Ikoula, et les opérateurs internationaux réussissent à mettre en place des garanties d'hébergement en France, via des filiales locales, même si cela ne remplit pas toutes les conditions de souveraineté puisque la filiale appartient à une holding étrangère. La circulaire de 2016 ne comporte pas de sanctions, son effet n'a donc pas été si impactant qu'il aurait suscité un développement massif de *data centers* 100% français.

2. Territoires du numérique : concentration et dispersion

Dans un article de 2003, le géographe Bruno Moriset soulignait que « les infrastructures immobilières de l'économie numériques continuent à suivre les schémas de localisation traditionnelle, avec une préférence pour des quartiers centraux périphériques en cours de rénovation. »³⁸

Depuis 2003, plusieurs phénomènes sont venus modifier cette géographie :

- A l'écriture de l'article, en 2003, l'économie se remet à peine de l'éclatement de la bulle des dot.com, et depuis, on a pu assister à l'explosion de l'économie numérique, et à la naissance d'acteurs très puissants dans le secteur.
- Le *Cloud* s'est très fortement développé depuis les années 2010.
- Surtout, les *data centers* recouvrent une diversité de services et d'activités, qui induit des stratégies de localisation et de développement différentes.
- Enfin, les risques naturels ne sont pas un critère décourageant dans les marchés très porteurs comme la Silicon Valley par exemple.

Cette complexification suscite ainsi la constitution de territoires aux dimensions numériques contrastées :

- Des concentrations ultra-métropolitaines au plus près des points d'échange Internet.
- Des périphériques métropolitaines ou zones d'activités numériques.
- Des espaces ruraux mités face à la grande échelle du numérique.

Il faut ici noter que si les *data centers hyperscale* sont des objets architecturaux fascinants, les quelques centaines de milliers de m² qu'ils représentent dans l'Oregon par exemple (probablement entre 400 et 500 000 m²) sont à mettre en regard des 400 000 m² (2016) de *data centers* de tous types présents dans la baie de San Francisco³⁹. Il est donc important de se pencher sur toute leur diversité pour mieux comprendre leurs impacts.

2.1 Stratégies d'implantation, échelles, typologies

Des critères de localisation variables en fonction des usages

Deux critères de localisation sont véritablement structurants :

- Se situer à proximité du réseau internet de fibre optique, notamment des axes principaux que sont les *internet backbones* ou dorsales internet, pour se connecter aux Points d'Echange Internet, plateformes où se connectent tous les réseaux qui distribuent les informations dans le monde.
- Disposer d'une puissance électrique suffisante pour son installation et son développement éventuel, de manière stable et fiable, et de préférence bon marché. Cela peut aller avec la présence à proximité d'un poste source. Critère non pondérable jusque-là, ceci pourrait changer dans le futur.⁴⁰

³⁸ Moriset Bruno, 2007, « Les forteresses de l'économie numérique. Des immeubles intelligents aux hôtels de télécommunications », *Géocarrefour*, Vol. 78/4 | 2003, mis en ligne le 21 août 2007.

³⁹ Lasalle Jones Lang, 2016, *Data center Outlook. Strong Demand, Smart Growth*, rapport JLL Americas Research.

⁴⁰ L'expérience imprévue de Microsoft à Clondalkin, à côté de Dublin, montre que les GAFAM peuvent aussi assumer leur propre production d'énergie. Face à l'incapacité du réseau de transmission d'intégrer l'énorme montée en charge des centres de données *hyper scale*, l'entreprise construit actuellement, pour 3 ans, sa propre installation dotée de 16 générateurs au gaz, pour un total de 18 MW de puissance.

Ces critères se pondèrent entre eux, selon le type d'opérateur de *data centers* :

- Par exemple, le foncier peut être cher si l'enjeu d'être dans une zone métropolitaine dense, au plus près des utilisateurs est crucial. Ainsi, les *data centers* de la Silicon Valley comme ceux d'Equinix ou de Vantage par exemple, se développent sur des fonciers onéreux, car la proximité du monde de l'IT et d'utilisateurs très connectés leur rapporte assez en retour. Le prix du foncier est élevé mais le retour sur investissement le justifie. De la même façon, ZAYO possède un *data center* à Vélizy, comme dans le centre de Paris (site les Jeuneurs). Les sites sont complémentaires, celui de Paris est plus contraint mais les prix pratiqués y sont trois fois supérieurs à ceux de Vélizy⁴¹. La proximité pour les utilisateurs se paie.
- Autre exemple, on peut installer un très grand *data center* dans des territoires ruraux, comme l'ont fait Amazon (AWS) à Umatilla (Oregon), en bord de la Columbia River, ou Facebook et Apple dans le cœur de l'Oregon (Prineville), si l'on peut avoir accès à un réseau privé de fibre optique pour se raccorder très vite aux Points d'Echange Internet. Le foncier est vaste et abordable, mais loin des utilisateurs, cependant la fibre permet de s'y connecter rapidement. Les grands *data centers* fonctionnent en complémentarité avec ceux des zones métropolitaines et prennent le relais une fois la connexion établie avec les internautes.

Cependant, on constate que les acteurs des *data centers hyperscale*, comme Microsoft, AWS, Google, ou Facebook, ont des ressources techniques et financières tellement importantes qu'ils sont plus facilement en capacité de pondérer tous ces facteurs que des acteurs de la colocation, des *data centers* de proximité (dit régionaux), des grandes entreprises ou des universités.

Il faut citer également un certain nombre de critères complémentaires de localisation :

- sécurité,
- absence de voisinage habité,
- réactivité de la collectivité d'accueil dans les démarches administratives,
- disponibilité d'énergies renouvelables et de tarifs spécifiques à destination des *data centers*,
- incitations fiscales diverses,
- un foncier abondant et abordable, avec le moins de contraintes et de servitudes possibles.

Nous verrons par la suite que ces critères s'apprécient aussi en fonction des spécificités des *data centers* : taille, besoins, services, clientèle, activités.

Echelles et typologies

Il existe de très nombreuses façons de classer les *data centers*.

- Par type d'opérateurs : (*hyperscale*, colocation, régionaux, entreprises...) ; ce qui différencie les centres de données d'infrastructure (hébergement externalisé par les clients) et d'exploitation (construit par et pour une entreprise).
- Par le degré de connectivité Internet des opérateurs : sur un backbone ou une boucle locale.
- Par taille du bâtiment : *hyperscale*, intermédiaire, petit ...
- Par niveau d'assurance de sécurité de l'information : via une classification par niveau appelé Tier et géré par l'Institut Uptime : Tier 1 étant le moins redondé (disponibilité de 99,67% soit 28h d'arrêt cumulé annuel), Tier 4 le plus fiable (fiabilité à 99,9%)

Il faut noter que selon l'étude d'Enr'cert de 2016⁴², rédigée avec les professionnels du secteur, les *data centers* d'infrastructure (ou de colocation) représenteraient 15 à 20% de la consommation énergétique totale des *data centers* en France, et les *data centers* d'exploitation (entreprise ou *corporate*) 80 à 85%.

⁴¹ Entretien avec Frederick Coeille, directeur général de Zayo France.

⁴² Ener'cert, 2016, *L'efficacité énergétique dans les data centers. Etude gisement du parc français*, Etude ENER'CET réalisée avec l'ATEE, l'ADEME, le CRIP, l'AGIT, le GIMELEC et le CESIT (aujourd'hui France *Data centers*). <http://www.orace.fr/lefficacite-energetique-data-centers-etude-de-gisement-parc-francais/>

Tailles des *data centers*, croisées avec les usages et selon le type d'opérateur.

Usages/taille	petit	moyen	gros	hyperscale
Edge	X (EdgeConnex, Orange)		X (Equinix)	
Cloud			X (chez les acteurs de colocation)	X (GAFAM)
Colocation			X (Interxion, Digital Realty)	X (QTS, OVH)
Hébergement Régional		X (Céleste)		
Exploitation (entreprises, Etat)	X (placards)	X	X (EDF, BNP)	X (SFR, Orange)

Pour André Rouyer du Gimelec (Groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services associés), on compte en France, 30% de *data centers* de colocation sur le total des *data centers*. Il prévoit par ailleurs le développement du *data center* intermédiaire ou locaux « pour des raisons de latence, de proximité, de confidentialité, de politique⁴³. »

Il est important de parler de la taille des *data centers* car il est souvent affirmé que ce sont les petits *data centers*, nombreux et peu performants, qui réduisent l'efficacité énergétique globale du secteur, tandis que la performance énergétique augmenterait avec la taille (économie d'échelle et standardisation) et si le bâtiment est neuf. En effet, les *data centers hyperscale* sont des bâtiments neufs avec des normes environnementales plus exigeantes. Différemment, les petits *data centers* que sont les salles serveurs ou les armoires dispersées dans les entreprises, sont extrêmement difficiles à identifier en France et généralement plus gourmands en énergie.

Une étude a été réalisée par le Lawrence Berkeley Lab en ce sens⁴⁴ pour les Etats-Unis, proposant par ailleurs une classification intéressante des tailles :

- Les petits *data centers* ont des surfaces comprises entre 1 et 100 m² (les placards font moins de 10 m²).
- Les *data centers* intermédiaires entre 100 et 2000 m² (les régionaux entre 100 et 200 m²)
- Les grands *data centers* ont des surfaces au-delà de 2000 m².

Séverine Hanauer, experte de l'entreprise de *data centers* Vertiv, affirmait en décembre 2017⁴⁵ qu'il existait dans le monde:

- 2,8 millions de sites de moins de 500 m², considérés comme des salles et des armoires ;
- 85 000 sites considérés comme moyens, supérieurs à 500 m² avec entre 50 et 100 serveurs par site ;
- 8000 sites de grands *data centers* supérieurs à 500 m² comprenant entre 1000 et 1 million de serveurs par site.

Enfin, pour la France, l'étude Enr'Cert citée ci-dessus a choisi les fourchettes suivantes :

- petit *data center* : entre 1 et 500 m²
- moyen *data center* : entre 500 et 2000 m²
- grand *data center* : entre 2000 et 5000 m²
- *hyperscale* : plus de 10 000 m²

Aucune de ces catégories ne prend vraiment en compte les *data centers* objets que sont :

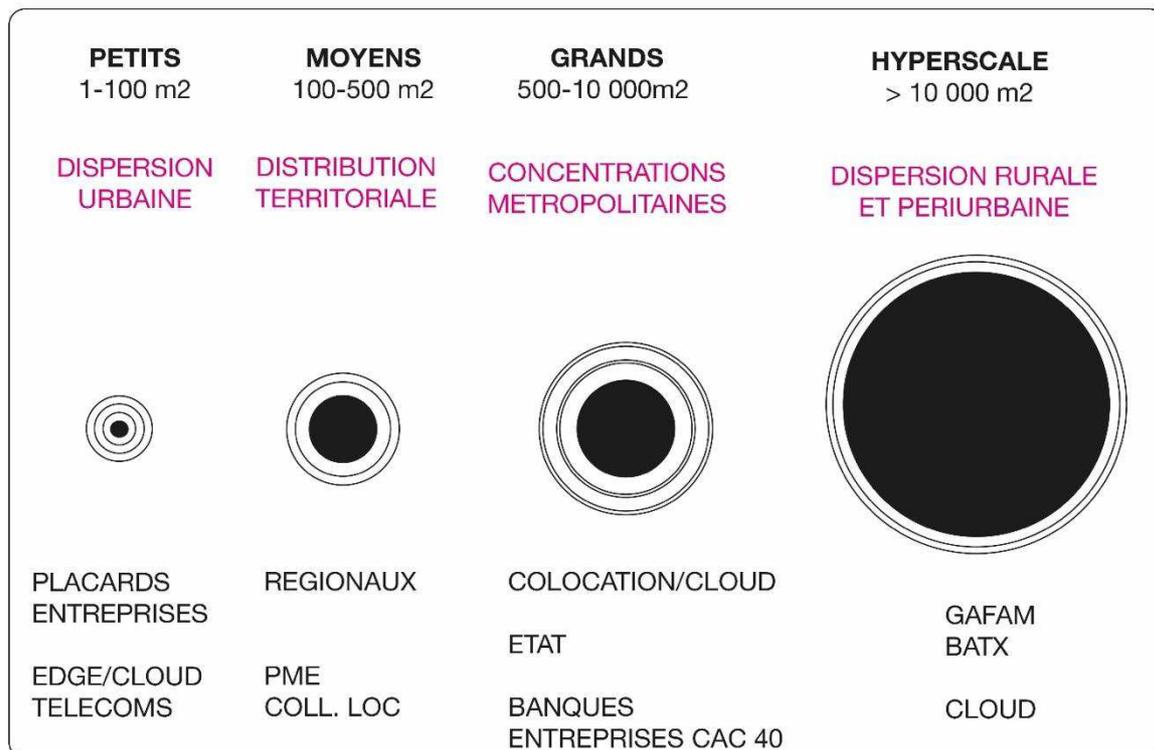
- le Q-Rad de Qarnot Computing : radiateur opérant des calculs informatiques distribuées, ayant son équivalent allemand avec Cloud and Heat.
- la chaudière numérique de Stimergy, ou celle d'Asperitas.

⁴³ Entretien avec André Rouyer, responsable du comité infrastructure et numérique au Gimélec, 23 mars 2017.

⁴⁴ Mohan Ganeshalingam, Arman Shehabi, Louis-Benoit Desroches, *Shining a Light on Small Data centers in the U.S.*, Energy Analysis and Environmental Impacts Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, juin 2017.

⁴⁵ Lors de la rencontre « Les *data centers* dans la société de demain », organisée par Global Security Mag, le 5 décembre 2017.

TYPLOGIES DE DATA CENTER ET LOGIQUES D'IMPLANTATION TERRITORIALE



Source : Cécile Diguët

Figure 5. Schéma croisant les échelles, les usages et les modes d'implantation spatiale des *data centers*
Crédits=©Cécile Diguët.

Chaque type de *data centers* a un mode d'implantation spatiale différent, qui va impacter les territoires selon des modalités particulières :

- les petits *data centers* se distribuent dans les territoires urbains et cette tendance va s'accroître avec le développement du *edge* et de l'internet des objets ;
- les *data centers* régionaux, pour les PME-TPE, collectivités locales, universités, suivent plutôt un modèle d'implantation suivant le réseau urbain national des villes grandes et moyennes ;
- les *data centers* de colocation s'implantent surtout dans les grandes métropoles ;
- les *data centers hyperscale* préfèrent s'implanter dans des territoires peu denses comme le rural ou le périurbain, où le foncier est abondant et peu coûteux.

2.2 Formes architecturales

Une infrastructure sans architecture

L'absence d'architecture dédiée aux infrastructures numériques et plus spécifiquement aux *data centers* pourrait s'expliquer par trois raisons.

La première raison est historique, puisque le *data center* n'est pas pensé d'abord comme un programme autonome, mais comme une excroissance du réseau. En effet, les *data centers* sont l'extension presque organique des placards de serveurs et salles informatiques inclus originellement dans des bâtiments de bureaux, des complexes universitaires ou de recherche. Le changement d'échelle se fait progressivement : un plus vaste placard, puis une salle informatique dédiée. Le caractère initialement décentralisé d'internet favorise par ailleurs une multiplicité d'acteurs, et des développements non-coordonnés, sans vision globale qui aurait pu apporter une pensée architecturale plus poussée et des objets manifestes.

La seconde est due à la rapidité du développement d'Internet, au moment de la naissance du Web commercial au début des années 1990, qui favorise un certain opportunisme dans les choix

d'implantation des salles serveurs et *meet-me-rooms*. Les *data centers* se pressent à proximité des points d'échange internet, carrefours stratégiques du web et d'internet. Tout se concentre très vite pour gagner rapidement des parts de marché. On observe alors une grande hétérogénéité non seulement des sites choisis mais aussi du matériel utilisé (qui se standardisera progressivement). Beaucoup de *data centers* s'installent dans des bâtiments historiques des télécoms comme dans des anciens centraux télécoms à New York, au *60 Hudson street*, ancien siège de Western Union, et *32 avenue of Americas*, ancien siège d'AT&T. A Paris, l'entreprise France télécom puis Orange a conservé des sites historiques emblématiques au cœur de la capitale comme le *data center* de Montsouris dans un bunker aérien, mais la tendance est à la consolidation, au regroupement et à la standardisation. C'est dans cette perspective qu'Orange a fait construire à Val-de-Reuil, un immense *data center* et envisage d'ici 2030 d'en construire un ou deux autres.

Les premiers *data centers* s'installent aussi dans des bâtiments déjà dédiés à l'industrie électronique dans un effet cluster comme à Hillsboro près de Portland, dans la Silicon Valley à Santa Clara, ou encore sur d'anciens sites industriels comme à Plaine Commune en Ile-de-France.

La troisième raison est que les entreprises majeures du secteur de la colocation comme Digital Realty, CoreSite ou Equinix sont des fonds d'investissement immobilier avant tout⁴⁶. Dans les années 2000 et plus encore 2010, s'ouvre une période de construction de *data centers* neufs, dans des bâtiments dédiés, mais les investisseurs sont prioritairement intéressés par le retour sur investissement rapide de l'équipement. Architecturer un *data center* ou installer un réseau de chaleur est une contrainte et une dépense supplémentaire, uniquement justifiable si la collectivité d'implantation en fait la demande pressante. Les *data centers* de colocation (qui excluent donc ceux d'entreprises ou des *Clouds* comme Google ou Microsoft), sont devenus des produits immobiliers à rendements élevés. Il n'y a donc pas (ou très rarement) d'architecture. Ce qui n'empêche pas de penser le produit en série et l'aménagement intérieur. Ces bâtiments se déploient donc sur le mode de la « boîte à chaussures », leur enveloppe ne suggérant pas l'importance stratégique de leur contenu, contribuant ainsi à leur discrétion et à l'invisibilisation du système technique numérique. A plus grande échelle, c'est à la typologie de l'entrepôt ou de l'usine, que l'on peut rapprocher le premier *data center* de Google à The Dalles (Oregon) ou ceux d'Amazon Web Services, non loin à Umatilla et Port Morrow. Certains *data centers* font cependant un effort d'intégration architecturale et paysagère, à l'exemple de ceux de Facebook et d'Apple à Prineville, d'Adobe à Hillsboro conçu par l'agence américaine Gensler, ou, pour ce qui est de la colocation, le *data center* de Core Site à Santa Clara par exemple.

Organiser et architecturer le stockage de données : une histoire récente

Si on note un déficit d'architecture pour le programme *data center*, il y a toutefois un souci d'intégration architecturale et urbaine, notamment porté par :

- les autorités locales qui souhaitent cacher les équipements sur le toit, camoufler les générateurs de secours, leur donner l'air de bureaux plutôt que d'un bâtiment industriel.
- les opérateurs de *data center* qui sont soucieux du bien-être des clients : donner de la qualité aux espaces dans lesquels leurs techniciens travaillent mieux, pour leur vendre leurs espaces et produits grâce à la qualité des lieux (dimension marketing).

Les bâtiments construits pour accueillir les *data centers* présentent plusieurs particularités techniques :

- Extrême robustesse des structures et des planchers, pour soutenir la charge au sol (poids des serveurs et des installations techniques) : entre 500 kg et 1 t/m².
- Adaptabilité pour le passage des câbles.
- Grande hauteur sous plafonds (souvent 4 m et plus).
- Flexibilité des espaces intérieurs et grands plateaux, un minimum de poteaux.

Les *data centers* présentent quelques grandes caractéristiques en termes de forme, volume, densité, et programme :

- Pour la construction neuve, l'image de la boîte persiste. Ce sont souvent des bâtiments rectangulaires à un seul étage dans des zones où il n'y a pas de pression foncière, sinon R+3 ou 4. La grande hauteur est rare sauf dans certaines villes américaines ou asiatiques.

⁴⁶ Des REIT, *real estate investment trust*, qui permettent une large défiscalisation de leurs activités.

- Pour l'ancien, ils peuvent se loger dans du bâti existant à condition qu'il offre de vastes espaces, voire des infrastructures : site militaire, portuaires (sites logistiques anciens), ancienne usine, souvent déjà dotés de générateurs de secours, de réservoir de fioul, de citerne d'eau, etc.
- L'imaginaire du bunker (les bunkers de l'information) persiste, le *data center* est une architecture de surveillance ultra-sécurisée, même si la typologie du campus permet de repousser une partie des dispositifs de contrôle à l'extérieur. On note toutefois une progression de la boîte noire fermée à une ouverture plus maîtrisée dans son rapport à l'extérieur (fenêtres sur la façade, aménagement des abords) comme à l'intérieur (cloisons transparentes pour voir l'intérieur du *data center* depuis les couloirs comme le bâtiment d'Equinix V5 à San Jose).
- L'espace est généralement partitionné en deux ensembles : le pôle bureau et logistique (avec des zones accueil, bureaux, logistique, maintenance) et le pôle informatique et technique (la surface informatique a presque son équivalent en surface technique : onduleurs, systèmes de refroidissement, générateurs de secours, batteries, etc.).
- C'est un espace extrêmement partitionné avec peu de variation programmatique. On ne voit jamais d'espaces traversant le cœur du *data center* où sont les armoires de données (parfois partitionnés par client avec des systèmes de sécurité propre), les circulations et les espaces techniques entourent l'espace central du stockage, avec des espaces de bureaux, cafétéria parfois.
- La mixité programmatique est rare.
- Les équipements techniques sont plus structurants que dans d'autres programmes. La séparation des espaces et des températures joue un rôle clef dans l'efficacité de l'infrastructure. Il s'agit d'isoler des climats et de fabriquer des milieux : allées froides, allées chaudes, chambres climatiques, cheminées d'évacuation (Vantage), espace pour les générateurs de secours, les cuves et réservoirs divers, les tours de refroidissements, les onduleurs, les salles de batteries, la salle de commande.

Du côté des praticiens de l'architecture, l'engagement à aborder le nouveau programme qu'est le *data center* est récent. En effet si le numérique et la cybernétique ont nourri l'imaginaire architectural et urbain de nombreux groupes des années 1960, à l'instar d'Archigram et de sa célèbre *Computer city*, on ne trouve nulle trace des lieux de stockage qui ont été à cette époque intégrés aux espaces informatiques. Depuis le début des années 2000, quelques agences ont développé un grand savoir-faire sur la question, comme *Genster* et *CAC Architecture* aux USA ou *Enia Architectes*, *DK Architectes*, *Reid Brewin Architectes* en France.

Les *data centers* sont des objets extrêmement sensibles pour les maîtres d'ouvrage (en termes de sécurité, d'accessibilité et de continuité de service électrique), il y a donc un caractère assez conservateur et une forme de résistance à la nouveauté. Les expérimentations ou les audaces énergétiques ou programmatiques (comme l'hybridation de ces infrastructures avec d'autres types d'usages comme des bureaux, du logement ou des équipements culturels) restent très rares.

Usages et mixité : au-delà du bâtiment-machine

Les *data centers* sont avant tout conçus pour accueillir des serveurs, mais de nouveaux usages liés à leur activité d'hébergement sont inclus dans certains cas. Les possibilités d'hybridation plus poussées dans des bâtiments neufs sont très souvent théoriques. Elles sont davantage le résultat de l'évolution d'un bâtiment existant comme à New-York où d'anciens bâtiments télécoms accueillent bureaux, *data centers*, sièges de radios, lieux de formation...

Pour les *data centers* de colocation : une offre complétée

Ces installations créent peu d'emplois directs : une dizaine pour une installation de colocation de 20 MW par exemple. En revanche, il y a un turn-over quotidien de clients qui interviennent sur leurs serveurs ou livrent du nouveau matériel. Les *data centers* de colocation proposent donc systématiquement des bureaux (clients et permanents) et des salles de réunions. Certains acteurs du marché se démarquent de la concurrence en offrant une diversité plus grande d'espaces et de services : salle de gym, salle de jeux, salle de conférence...



Figure 6. Intérieur Equinix, Crédits=© Equinix.

Pour les *data centers hyperscale* : le phalanstère numérique ?

Les *data centers* dédiés aux GAFAM ou à des entreprises reflètent leurs propres organisations et priorités. A Prineville, les deux sites d'Apple et Facebook comptent 400 emplois directs et indirects. Le *data center* de Facebook comprend ainsi un restaurant d'entreprise, un centre de fitness, des couchages pour les personnels en cas d'astreinte, des salles de réunion, de conférence, un espace billard, jeux vidéo...

Les *data centers* d'entreprises : entre installation dédiée et combinaison avec les sièges

De nombreuses entreprises, notamment du CAC 40, banques, assurances..., construisent leur propre *data center*, incluant en général bureaux et salles de réunion, comme BNP Paribas à Bailly-Romainvilliers ou le Crédit Agricole à Chartres. Certains sièges d'entreprises incluent également dans leurs étages plusieurs niveaux pour leur propre *data center*, perpétuant finalement une situation ancienne où les entreprises avaient des salles et des placards informatiques chez elles, mais en les optimisant et en les construisant avec les standards d'efficacité actuels. De très nombreuses entreprises ayant leur siège à Paris La Défense disposent de leurs propres *data centers* sur place, avec un back-up sur un second site. Le New York Times à New York fait de même (avec un back-up à Seattle). L'agence américaine Gensler a construit un bâtiment en Chine, à Chengdu, dont le socle est un *data center*, sur lequel repose tous les étages de bureaux de la China Pacific Insurance (Group) Co.



Figure 7. *Data center* de Gensler à Chengdu, Crédits=© Gensler, 2017.

Les *data centers* dans le Grand Paris

La Société du Grand Paris porte un projet tout à fait à part en termes d'hybridation de programmes et d'opportunité foncier. Il s'agit en effet de projets de petits et moyens *data centers* dans les ouvrages à proximité immédiate des gares (notamment les entonnements), qui bénéficieraient des espaces inoccupés mais aussi de l'approvisionnement électrique (normalement dédié uniquement au métro), et de la fibre qui va être tirée le long des rails, sur laquelle on peut se raccorder tous les 800 m, sur les 200 km du réseau de métro, et avec un double réseau de fibre pour la redondance. Chacun aurait une surface entre 250 à 1000 m², à destination des PME-TPE et collectivités locales. Les modalités de construction et de gestion sont à l'étude avec la CDC et des partenaires privés.

Avec cette proposition d'objet semi-enterré, autonome dans son fonctionnement par rapport à la gare, le *data center* participe à renouveler le concept de gare et l'optimisation d'espaces techniques complexes.

Il en va de même pour le futur quartier de « Chapelle International » à Paris, qui sera livré en 2021 et qui accueillera le *data center* de la Ville de Paris. La colonne vertébrale de ce nouveau quartier (900 logements au total, 33 000 m² de bureaux, un gymnase, une crèche, une école primaire...) est une vaste plate-forme logistique déjà construite le long des rails de Paris Nord-est sur une ancienne friche ferroviaire. La filiale de SNCF immobilier, Espaces Ferroviaires, est l'aménageur du secteur.

2.3 Concentration urbaine des flux et décentralisation géographique des stocks

La diversité des *data centers*, de leurs critères d'implantation, de leur fonctionnement, aboutit à une image parfois difficile à décrypter de leurs effets spatiaux. Un double mouvement de concentration et de dispersion impacte ainsi les territoires.

On constate d'une part le développement important des gigantesques *data centers* (*hyperscale*) qui fait écho à la concentration croissante, et décriée, des données de milliards de personnes (2 milliards pour Facebook par exemple) par les GAFAM et les BATX⁴⁷ en Chine. Ces *data centers* ne sont pas situés là où se concentrent les populations, mais là où le foncier et l'énergie sont bon marché. D'autre part, les *data centers* de colocation se concentrent dans les espaces métropolitains, à proximité des *backbones* internet et des points d'échange, toujours plus près les uns des autres pour limiter les coûts de raccordement à la fibre optique. On pourrait ainsi en conclure que l'on a une concentration urbaine des flux via les *data centers* de colocation qui sont aussi les portes d'entrée des *Clouds* et une décentralisation géographique des stocks avec les *data centers hyperscale*. En somme, tout converge en ville et les territoires ruraux sont des espaces servant de stockage de masse.

Si l'on revient en arrière, Internet est conçu à son origine comme un réseau distribué, visant d'abord à permettre à des chercheurs de communiquer facilement entre eux, mais aussi de rendre plus résilientes les installations militaires américaines, en particulier face aux attaques nucléaires tant redoutées pendant la guerre froide. Ce caractère décentralisé a par la suite suscité des visions utopiques où les villes en viendraient à se dissoudre et les hiérarchies spatiales à disparaître avec la fin des contraintes liées à la proximité. Mais finalement, et dès le début, le réseau s'implante sur des points stratégiques en ville. Il suit les réseaux existants. Le réseau Internet a d'abord emprunté celui du téléphone, puis la fibre s'est insérée soit dans les fourreaux existants, le long des routes et autoroutes (France), des métros (Paris), des lignes de chemin de fer ; soit en aérien avec le réseau électrique (comme sur le réseau haute-tension de Bonneville Power Administration (BPA) dans le Nord-Ouest américain ou avec RTE dans certains territoires ruraux français). Ainsi, suivant un chemin déjà tracé, Internet a renforcé les hiérarchies urbaines déjà en place, les câbles se rejoignant à San Francisco, New York, Paris, Londres, Amsterdam, Francfort, capitales économiques et centralités métropolitaines de rayonnement mondial.

Cette contradiction apparente, entre concentration et dispersion, semble masquer plusieurs éléments. Le réseau internet et les flux d'informations suivent en effet les hiérarchies urbaines, et favorisent les nœuds métropolitains, mais à l'inverse, aux débuts d'internet (et avant le web), les contenus étaient décentralisés, hébergés dans chaque ordinateur, en pair-à-pair. C'est surtout avec le développement du web commercial à la fin des années 1990, que l'hébergement des sites, des messageries, des

⁴⁷ BATX : Baidu, Alibaba, Tencent, Xiaomi.

plateformes d'entreprises... a abouti à des besoins de stockage de plus en plus colossaux. Ainsi, les *data centers* se sont multipliés, en particulier à partir des années 2000. La tendance s'est poursuivie à un rythme impressionnant depuis lors.

Pour autant, derrière ce mouvement binaire concentration/dispersion, et avec le développement en cours et à venir des *data centers* edge et des *data centers* régionaux, c'est tout un système complémentaire qui se met en place, s'adaptant à la multitude d'usages et de besoins d'une vie de plus en plus numérique.

2.4 Camouflés dans l'existant et les centres villes

Les cœurs métropolitains, aux Etats-Unis comme en Europe, et les villes-mondes comme Londres et New-York encore davantage, présentent des densités d'habitant·e·s et d'emplois très élevés, et une concentration de richesses exceptionnelle. Ces territoires sont les nœuds stratégiques où les câbles internet se retrouvent et se connectent ; des centres de décisions globaux et centralisés où sont aussi produits, consommés, distribués de multiples contenus informationnels (culturels, financiers, communicationnels, commerciaux...). Les anciens centraux téléphoniques sont souvent devenus des points d'échange internet (Internet Exchange Point), assortis de surfaces dédiées au stockage de données.

Du téléphone à internet, la seconde vie des immeubles connectés

A New York, plusieurs immeubles de Lower Manhattan, poursuivent, avec Internet, leurs destinées communicationnelles. La ville de New York accueille à partir de la fin du XIX^e siècle les sièges des grandes compagnies de télégraphe et de télécom. En 1914, AT&T et Western Union (télégraphe) s'installent ensemble au 32 avenue of Americas, dans un bâtiment construit à la gloire des communications mondiales, notamment illustrée par la mosaïque du plafond du hall d'entrée, où une allégorie connecte chaque coin de la carte : l'Océanie, l'Afrique, l'Asie et l'Europe (les Atats-Unis étant au centre). Dès 1928, Western Union déménage à quelques centaines de mètres au 60 Hudson Street, et fait construire son siège par le même architecte qu'AT&T, dans le style art déco.



Figure 8. 32 avenue of Americas et 60 Hudson Street Crédits=© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.

Les deux immeubles sont connectés par un conduit souterrain, où passe aujourd'hui un trafic internet phénoménal. En effet, à la fin des années 1990, les deux bâtiments ont pris le tournant du numérique et au départ de leurs anciens occupants, ont effectué une mue impressionnante, se débarrassant des installations téléphoniques pour y installer des points d'échange internet, des espaces de stockage de données et des infrastructures de télécommunications à la pointe.

Depuis les attentats du 11 septembre 2001, mais aussi un mois plus tôt, lors d'une explosion du réseau urbain de vapeur qui a altéré tout le système informatique de Goldman Sachs dans le Lower Manhattan, les *data centers* financiers, sous la pression de l'État américain, ont commencé à se délocaliser dans le New Jersey tout proche. Les autres ont vite suivi, y compris celui de la bourse de New York qui se déploie depuis 2010 sur presque 40 000 m² à Mahwah, au Nord-Est de l'État du New Jersey. Ce *data center* offre aussi des espaces pour les compagnies de trading, qui sont donc des localisations *premium* en termes de latence (chaque nanoseconde compte). Ajouté à cela des prix élevés de l'énergie comme de l'immobilier, mais aussi une vulnérabilité climatique forte comme l'a démontré l'ouragan Sandy en 2012, avec l'arrêt d'exploitation de plusieurs *data centers*, New York est une ville où il faut être pour se connecter à des centaines de réseaux télécoms, pour avoir une porte d'entrée sur les *Clouds*, mais tout bascule aussi plus loin : dans le New Jersey ou en Virginie du Nord en particulier où l'énergie et l'espace sont moins chers.

Cas particulier, la tour Sabey est un développement récent venant contredire cette tendance. La NY Telephone Company a construit une tour télécom en 1975, au pied du pont de Brooklyn, pour accueillir un central téléphonique. L'entreprise s'est ensuite transformée en Bell Atlantic, puis Verizon. Taconic Investors a acheté le bâtiment en 2007 (140 millions de dollars), la crise 2008 a stoppé leur projet de transformation, et Sabey a racheté le bâtiment en 2011 (autour de 100 millions de dollars) qu'elle a rebaptisée Intergate Manhattan, avec Young Woo and Associates (promoteur new-yorkais). Verizon en occupe aujourd'hui encore trois étages.



Figure 9. Tour Sabey Crédits© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.

Sabey est une compagnie immobilière basée à Seattle, qui a beaucoup construit pour Boeing, des entrepôts, des usines, des hangars ; puis s'est spécialisée dans les « critical facilities » pour la santé, le militaire et les *data centers*. Ce bâtiment haut de 32 étages soit 160 m, offre 102 000 m² de surface disponible. Les plafonds sont hauts (entre 4 et 7 mètres selon les étages) et chaque plateau propose 3600 m². Sabey a investi 300 millions de dollars pour la rénovation du bâtiment. Le PUE de leur *data center* est de 1.25. La température visée est de 26.5°, bien plus haut que de nombreux autres *data centers*. Les autres hébergeurs et opérateurs présents dans Intergate ont des stratégies différentes.

La transformation de ces immeubles initialement construits et dédiés aux communications est très spécifique à New-York. Leur conception a permis leur transformation :

- charges importantes supportées par les planchers (poids des serveurs) ;

- offre de grands plateaux, et de surfaces importantes à l'échelle du bâtiment ;
- espaces techniques généreux ;
- grande hauteur facilitant également le fonctionnement des antennes de télécommunication.

Trois sujets sont particulièrement intéressants ici :

- le recyclage de bâtiments existants ;
- la compacité infrastructurelle de ces bâtiments machines, en plein cœur de la ville, contenant toutes les infrastructures pour assurer leur autonomie : fuel, eau, cogénération, stockage thermique ;
- la mixité des usages dans les bâtiments : par exemple au 32 *avenue of Americas*, cohabitent notamment des bureaux, des studios radios, des *data centers*, 70 opérateurs télécoms (30% de la surface), et le siège du Tribeca Film Festival, le tout sur 186 000 m².

Les transformations : New-York, Portland, Paris

Au-delà des bâtiments télécoms, d'autres édifices industriels, militaires, de service et résidentiels anciens ont aussi été transformés pour l'accueil de *data centers*.

A New-York, un bâtiment emblématique d'Internet est le 111 8th avenue à Chelsea. Quatrième plus grand bâtiment en surface de New York, c'est en réalité un immeuble-îlot de près de 275 000 m², fréquenté chaque jour par 7 à 8000 personnes, et dont les réserves de fioul de 600 000 litres assurent la résilience en cas de coupure électrique. Cet ancien siège de l'autorité portuaire, construit en 1932, a été racheté en 2010 par Google pour 1,9 milliard de dollars, avec ses locataires, dont de nombreux opérateurs télécoms et de *data centers*. Echouant à tous les évincer, l'entreprise partage encore les locaux avec une partie d'entre eux, ce qui fait dire à Stanislas Voronov, manager du site d'Equinix, que leur visibilité pour le futur est plus que difficile. Il raconte aussi comment, en 2010, face à la pression de Google, de nombreux locataires ont pensé que l'entreprise voulait devenir un opérateur télécom, tellement « *one-eleven* » est un bâtiment ultra connecté. Leur résistance a finalement poussé Google à louer des bureaux supplémentaires juste en face, au 85 10th avenue, où d'autres *data centers* comme Telehouse (mais aussi le FBI) sont présents.



Figure 10. 111 8th Avenue, Chelsea, New-York City. Crédits=© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.

A Portland, le *Pittock Block* se situe dans l'hypercentre de la ville, et constitue le point névralgique des réseaux télécoms donc d'Internet : on y trouve le Portland NAP. Dans ce bâtiment historique du début du 20^{ème} siècle, de nombreuses entreprises du secteur numérique se sont installées. Initialement construit pour accueillir la première centrale électrique de Northwestern Electric Company, « à la cave », et des entreprises aux autres étages, le bâtiment a donc vécu une reconversion numérique réussie.



Figure 11. Pittock Block, Portland Crédits=© Cécile Diguet et Fanny Lopez, 2018.

A Paris, les anciens centraux téléphoniques des PT&T n'ont qu'assez peu connu la transformation numérique à l'échelle de New York puisque le patrimoine immobilier du début du siècle à majoritairement disparu, pour de nouveaux sites construits dans les années 1970. Cependant, et malgré la politique de regroupement des *data centers* engagée par Orange, on compte encore plusieurs localisations intra-muros, notamment Beaujon (Paris 8^{ème}), en socle d'un immeuble de logements, et Montsouris (Paris 14^{ème}) qui sont en partie des *data centers*. Il faut en effet préciser que les principaux points d'Internet ne s'y sont pas localisés au début du web. Ils sont donc aujourd'hui installés au sein des équipements des leaders de la colocation : Interxion, Equinix, Telehouse... et se situent donc à Paris 11^{ème} (Voltaire), Aubervilliers, Courbevoie, Pantin...

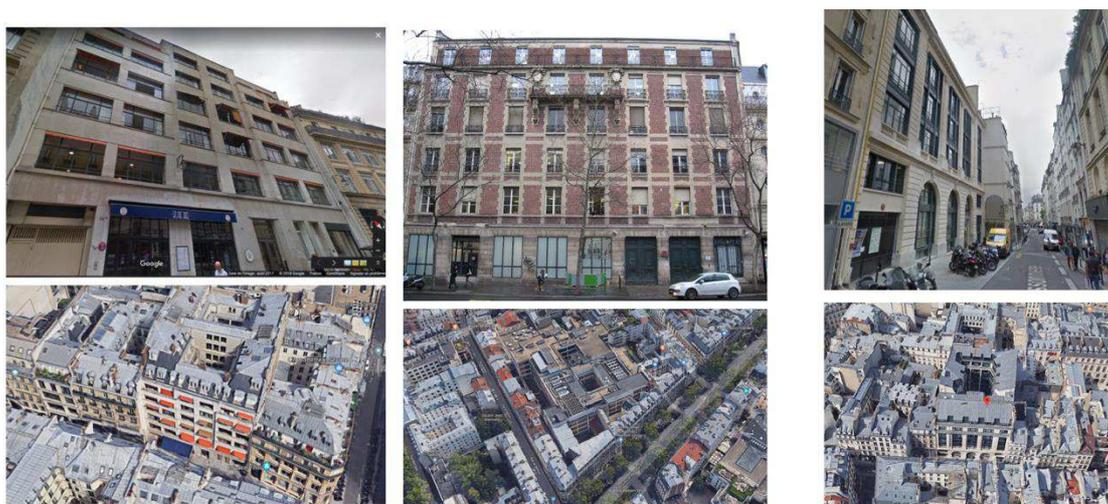


Figure 12. *Data centers* au centre de Paris : Téléhouse 32 rue des Jeuneurs, Téléhouse 137 boulevard Voltaire, Zayo 19-21 boulevard Poissonnière =© Google Map.

En revanche, les espaces historiquement connectés au téléphone étaient localisés autour d'Opéra et de la Bourse⁴⁸, pour répondre aux besoins de la presse, des banques et des entreprises textiles à la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème} siècle. Cette connectivité élevée s'est perpétuée avec Internet, et le Sentier, aussi appelé un temps Silicon Sentier, est le siège de plusieurs *data centers* importants ayant pu s'installer dans d'anciens immeubles industriels adaptés. Les *data centers* situés en cœur de la métropole parisienne sont donc davantage des transformations d'immeubles anciennement industriels.

- L'opérateur Téléhouse s'est installé dès les années 1990 dans un bâtiment du boulevard Voltaire (au 137), à proximité de la mairie du 11^{ème} arrondissement, sur une surface totale de 7000 m² et avec une puissance disponible de 5 MW. Ce bâtiment accueillait jusqu'aux années 1980 un grand magasin, concurrent du Printemps et des Galeries Lafayette, Paris-France, d'où la robustesse de sa structure. Rien n'indique aujourd'hui la présence d'un *data center*. Pourtant, c'est un point névralgique de l'Internet français : il héberge le point d'échange internet France-IX, et constitue un noyau central pour 80 % du trafic Internet direct en France. Une hypothèse pour cette implantation est aussi la présence précoce de la fibre optique dans le quartier puisque la première liaison en France a eu lieu entre le central téléphonique PTT des Tuileries et celui de Philippe-Auguste en 1982. Téléhouse est également présent dans le Sentier, 32 rue des Jeuneurs, sur 1000 m² dans l'ancien Hôtel d'Agoult-Chalabre, bâtiment historique à la structure métallique construit en 1871.
- L'opérateur Zayo est tout près, au 19-21 rue Poissonnière, sur 1250 m² (puissance disponible de 600 kW), également dans un bâtiment de la fin du 19^{ème} en structure métallique, typique du quartier, développé pour les commerçants textiles et la presse de l'époque.
- L'opérateur de *data center* de Free, Iliad, a racheté en 2012 le bâtiment du laboratoire des Ponts-et-Chaussées, situé boulevard Lefebvre à Paris (15^{ème} arrondissement), qui comprend un abri antiatomique à 27 mètres sous terre construit en 1949. Le bunker devait alors héberger le ministère des Transports en cas d'attaque, afin d'organiser les communications terrestres. Il héberge désormais un *data center* de 8000 m².
- A Courbevoie, à proximité de la Défense, SFR a installé un *data center* de 12 000 m² dans les anciennes usines automobiles Delage, construites en 1912 sur 15 ha. Très vaste bâtiment de brique et de métal, coiffé de sheds, ce sera l'unique marqueur patrimonial à l'issue du projet urbain en cours sur le village Delage.

Le patrimoine industriel a donc permis d'assurer une grande connectivité et une capacité d'hébergement numérique au cœur de Paris et à proximité immédiate de ses quartiers d'affaires (QCA et La Défense) en particulier.

Les bâtiments construits spécifiquement pour accueillir des *data centers* en tissus très denses sont beaucoup plus rares, étant donné la complexité d'y construire, et la priorité souvent donnée au logement et à des occupations plus denses en emplois, mais surtout de la facilité, en comparaison, de se développer dans des territoires plus adaptés, avec moins de contraintes urbaines, environnementales et de voisinage. On les trouve davantage dans les périphéries métropolitaines du numérique.

2.5 Les périphéries métropolitaines du numérique

Les périphéries métropolitaines, souvent anciennement industrielles, sont les lieux d'implantation idéaux pour des *data centers* de colocation et de *Cloud*, et pour les entreprises locales ayant besoin d'une faible latence. On retrouve un modèle commun de développement : un territoire anciennement industriel, souvent servant de la métropole, offrant de grandes emprises et des puissances électriques importantes, mais aussi une bonne connectivité (la fibre a suivi les autoroutes et les chemins de fer, traversant souvent ces territoires) : les *data centers* remplacent alors les usines. Perpétuation de ce caractère servant ou montée en gamme ? Chaque territoire s'appuie différemment sur leur arrivée. Santa Clara, au cœur de la Silicon Valley, en a fait un levier de développement économique et une source de financements importante pour le fonctionnement de la ville, via sa compagnie électrique

⁴⁸ Bertho Catherine, 1984, « Les réseaux téléphoniques de Paris – 1879-1927 », in *Réseaux*, volume 2, n°4, pp 25-53.

municipale. Saint Denis et Aubervilliers, au nord de Paris, semblent davantage subir ce développement, tandis que la ville d'Hillsboro, à côté de Portland (Oregon), a ainsi négocié la délocalisation de ses industries électroniques.

Accentuant le caractère mono fonctionnel des territoires économiques dans lesquels ils s'implantent, se rapprochant en termes de paysages de zones logistiques ou commerciales, ces zones d'activité numériques vont dans le sens de la fragmentation urbaine, avec de très grandes parcelles infranchissables, souvent ultra protégées par des clôtures défensives n'amenant pas grande urbanité aux territoires. Certains exemples d'intégration réussie sont cependant à souligner comme le projet du quartier Chapelle International (présenté précédemment), sur une ancienne emprise ferroviaire de Paris, qui comprend dans sa partie logistique un *data center*.

Plaine Commune ou l'opportunité de la désindustrialisation

L'agglomération de Plaine Commune est située au nord de Paris dans le département de la Seine-Saint-Denis. D'après Alain Vaucelle, chargé de mission TIC à Plaine Commune, elle compte une vingtaine de *data centers*. Selon Fabrice Coquio, président d'Interxion, le chiffre est plutôt de l'ordre de 47 *data centers* présents sur 25 km² de territoire⁴⁹. Au regard du secret qui entoure ces infrastructures, les chiffres diffèrent en fonction des acteurs interrogés, mais Plaine Commune reste le territoire français avec la plus grande concentration de *data centers*, notamment dans les villes de Saint-Denis et d'Aubervilliers, sur la Plaine, avec respectivement 5 et 8 *data centers* recensés.

La présence des *data centers* à Plaine Commune date de la fin des années 1990. Le premier *data center* de colocation de Plaine Commune se trouve à Aubervilliers, dans le parc des Portes de Paris, et a été ouvert par Interxion en 1999. La présence de vastes parcelles disponibles à prix abordables à proximité immédiate de Paris et la bonne disponibilité électrique, témoins du passé industriel de la Plaine St Denis, ont favorisé le développement de ces *data centers* de colocation à un moment où le développement dans Paris devenait limité. Il faut également noter la qualité de la connectivité avec la présence de l'un des principaux axes du réseau internet le long de l'autoroute A1 qui permet la liaison entre les différents *data centers* européens. Par ailleurs, comme les *data centers* ont intérêt à se regrouper pour mutualiser et optimiser les réseaux de fibres noires⁵⁰, ils ont créé des poches de concentration sur le territoire, en particulier au sud de l'agglomération.

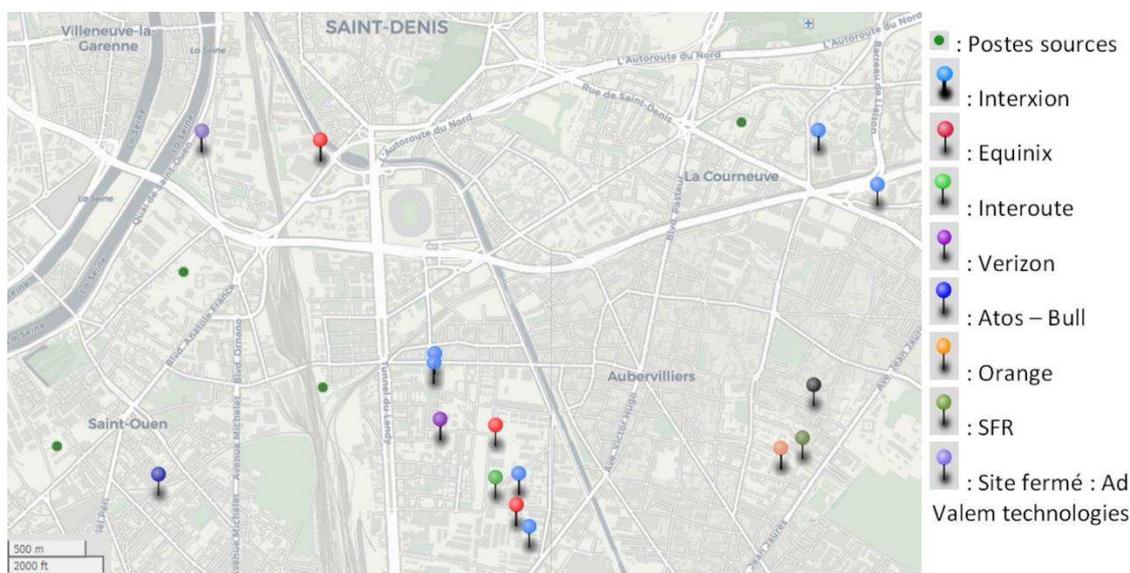


Figure 13. Les *data centers* à Plaine Commune (fond : open street map ; données : ENERNUM)

⁴⁹ Il faut rappeler que les données pour les *data centers* d'entreprises sont difficilement accessibles, et parfois floues : quand certains comptabilisent des sites de *data center* qui peuvent avoir plusieurs bâtiments, d'autres vont comptabiliser chaque bâtiment comme un *data center*. Certains peuvent aussi parler de *data center* de colocation sans le préciser, alors qu'il y a aussi les *data centers* d'entreprises.

⁵⁰ En effet, le coût d'installation de la fibre noire s'élève en moyenne à près de 1000 € le mètre (F. Coquio, mars 2018). Ainsi, plus les *data centers* se concentrent, moins leurs coûts de raccordement sont élevés.

Entreprise - Data center	Date de construction	Commune - rue	Taille (m²)			Puissance IT max (MW)	Puissance totale disponible (MW)
			Parcelle	SdP	IT		
Interxion PAR 1	1999	Aubervilliers, avenue Victor Hugo	3 300	2 250	1 450	1,3	4
Interxion PAR 2	Entre 2000 et 2005	Aubervilliers, rue des Gardinoux	5 525		3 000	4,5	12
Interxion PAR 3	2007	Saint-Denis, avenue des arts et métiers	4 781	4 123	2 000	5	15
Interxion PAR 5	2009	Saint-Denis, avenue des arts et métiers	6 027	7 433	4 200	10,55	30
Interxion PAR 7	2011 - Extension 2018	La Courneuve, rue Rateau	18 293		9 000	30	64
Verizon	2001	Aubervilliers, rue de la Montjoie	7 822	4 500	3 000	2,25	6,75
Equinix PA 2	2007	Saint-Denis, rue Ambroise Croizat	56 340	54 597	6 300	10	30
Equinix PA 3	2007	Saint-Denis, rue Ambroise Croizat			6 700	11	30
Equinix PA 5	2007	Aubervilliers, rue Victor Hugo	2 310		1 250	2	5
Equinix PA 6	2008	Aubervilliers, rue Waldeck Rochet	10 700	14 000	4 600	7,4	28
GTT - Interoute	2003	Aubervilliers, rue des Gardinoux	6 517		760	1,3	4
Atos 3	2009	Saint-Ouen, rue Dieumegard			3 600	5	15
SFR netcenter	2011	Aubervilliers, rue de la motte			600	1	3,5
Orange		Aubervilliers, rue de la motte			2 000	4	13
Interxion PAR 8 (projet)	En construction	La Courneuve, Avenue Marcel Cachin			40000		100
Total					84 460		260,25 MW (+100MW INT PAR 8)

Les data centers à Plaine Commune, octobre 2018.

Les hypothèses de calcul pour extrapoler les données manquantes du tableau sont fournies en annexe. (Extrapolation / Valeurs sourcées)
 Pour les data centers de SFR et Orange, les calculs ont été réalisés grâce aux informations recueillies sur leurs générateurs de secours.

Nous avons identifié seize sites de *data centers* pour sept opérateurs avec en tête Equinix et Interxion, leaders européens du *data center* de colocation, avec respectivement 4 et 5 *data centers*.

Les *data centers* présents sur Plaine Commune sont majoritairement des gros *data centers*, dans un environnement urbain relativement hétérogène, d'une superficie moyenne comprise entre 1000 et 5000 m². En plus du futur *data center* d'Interxion en projet à La Courneuve (site Eurocopter), il y a également deux *data centers* de tailles très importantes : l'autre *data center* d'Interxion de La Courneuve en cours d'extension rue Rateau, qui devrait atteindre 9000m² de salles informatiques et le *data center* d'Equinix à Saint Denis (PA 2 et PA 3 sont en réalité sur le même site) avec 13 000 m² de salles informatiques sur une parcelle de presque 6 ha.

Ce sont donc plus de 84 000 m² qui seront occupés par ces infrastructures de stockage à Plaine Commune à l'achèvement du *data center* d'Interxion (Eurocopter), avec plus de 360 MW électriques dédiés.

Un ralentissement du nombre de constructions de *data centers* a été constaté depuis le début des années 2010, phénomène que l'on peut expliquer par trois facteurs principaux :

- Le foncier n'est plus aussi disponible et bon marché que dans les années 2000, notamment parce que Plaine Commune a poursuivi une dynamique de transformation urbaine conséquente et de valorisation, avec le développement du Campus Condorcet, l'arrivée de la ligne 12 à Front Populaire et les développements résidentiels au nord des EMGP notamment.
- Le secteur de la colocation s'est consolidé et les différents opérateurs ont effectué de nombreux rachats d'entreprises et de bâtiments existants ces dernières années. Ainsi, Equinix, le leader mondial de la colocation, a racheté des entreprises comme Telecity et des *data centers* comme ceux de Digital Realty Trust ou de Verizon.
- Lors de la construction des grands *data centers* de Plaine Commune, les opérateurs ont décidé d'anticiper la croissance du marché. La taille des installations construites ne correspondait donc pas aux besoins réels des opérateurs qui prévoient des espaces supplémentaires pour répondre rapidement à la demande des clients. Une partie d'entre eux est donc restée vide et se remplit peu à peu.

Si l'étude de l'ALEC de 2013 avait alerté les élus locaux sur le phénomène *data center* et placé le sujet au rang des priorités à la veille des élections municipales de 2014, la mobilisation est depuis un peu retombée. Cela s'explique notamment par le ralentissement du rythme de construction de ces infrastructures de stockage mais aussi des multiples grands projets dans lesquels Plaine Commune est engagée (JO 2024, renouvellement urbain, Grand Paris express). La question est donc finalement peu abordée à l'échelle intercommunale, alors que d'autres sujets font l'objet de groupes de travail entre communes.

Pour autant, l'agglomération rappelle que les *data centers* lui posent une triple question :

- La pérennité du système électrique local. Enedis construit un nouveau poste source qui doit voir le jour à horizon 2019-2020 à Aubervilliers, aux abords du campus Condorcet, afin de répondre au mieux aux demandes de raccordements.
- L'apparition de nuisances éventuelles pour les habitants (le *data center* d'Interxion rue Rateau à La Courneuve a ainsi fait l'objet d'une très forte opposition citoyenne) : bruit, danger lié au stockage du fioul, ondes électromagnétiques
- Les grandes emprises spatiales infranchissables que représentent les *data centers*, pour un très faible nombre d'emplois

Le site Eurocopter : à la recherche d'une entente

Le site Eurocopter est une illustration de ces questionnements et du dialogue difficile entre acteurs. Le groupe Interxion porte actuellement un projet de *data center* sur une parcelle de 6.3 ha, à La Courneuve, sur le site de l'ancienne usine d'hélicoptères d'Eurocopter. A l'annonce du départ d'Airbus-Eurocopter de l'usine, située au 13 avenue Marcel Cachin, le site a immédiatement été racheté par un investisseur

local, sans que la collectivité exerce son droit de préemption urbain ou fasse porter le terrain par l'Établissement Public Foncier d'Île-de-France (EPFIF) afin de pouvoir maîtriser son évolution. Le site se situe en effet à proximité du centre-ville, en face d'équipements publics (sport, lycée) utilisés par de nombreux habitants, dans un contexte actuellement hostile aux piétons.



Figure 14. Site Eurocopter Crédits=© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.

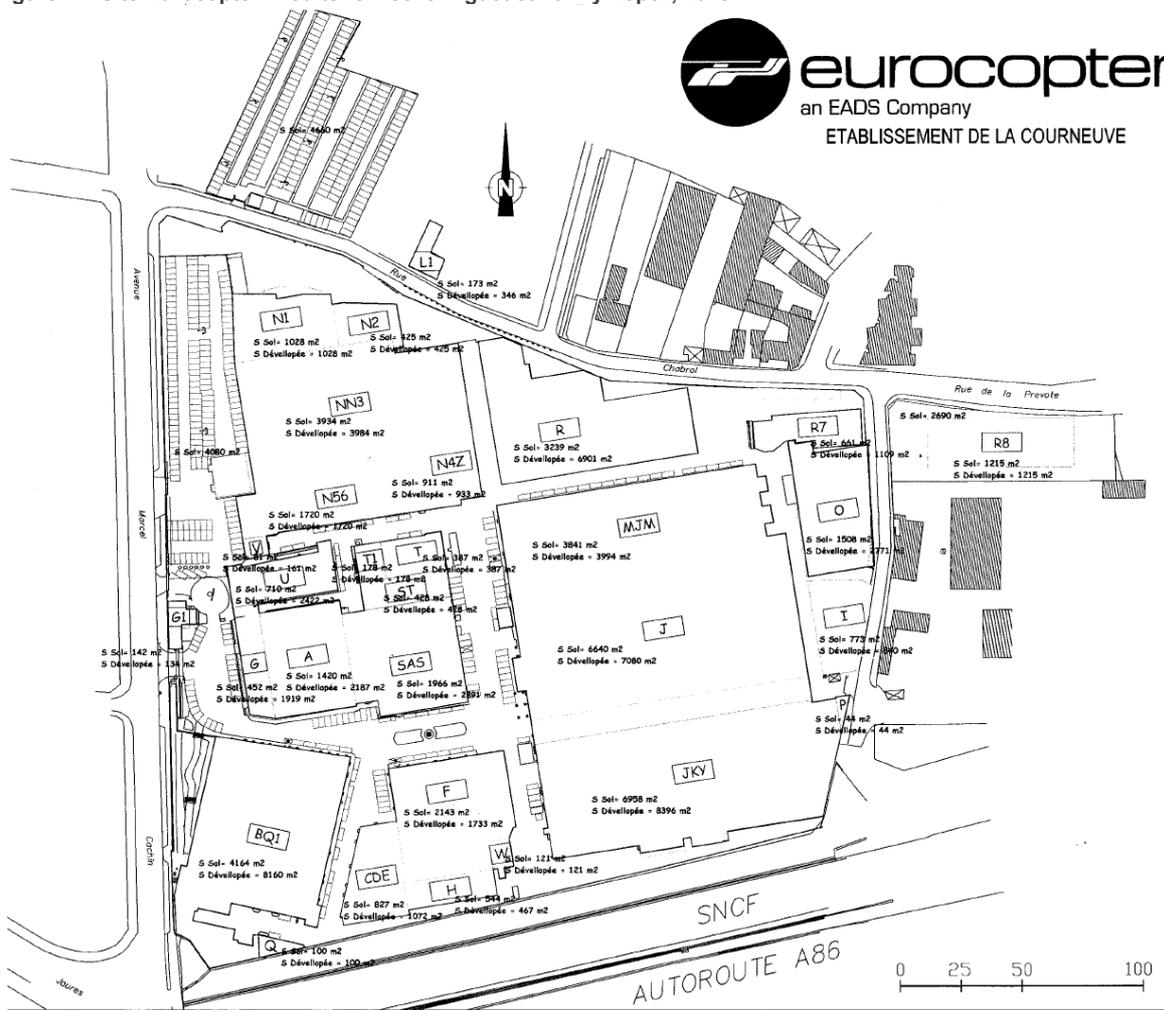


Figure 15. Plan du site Eurocopter Crédits=© Eurocopter

Un accord sur un bail dont la durée nous est inconnue a ensuite été conclu entre le nouveau propriétaire et Interxion pour développer un projet de *data center*. Un premier permis de construire a été déposé en 2013 par Interxion pour la construction d'un *data center* sur une partie du site seulement, représentant une surface de 4.3 ha, en accord avec Plaine Commune. Ce projet, discuté avec la commune et

l'agglomération, prévoyait de développer deux espaces présentés dans une étude de l'agence Anyoji Beltrando⁵¹:

- le long de l'autoroute, le *data center* d'Interxion.
- au nord de l'emprise Eurocopter, séparée du *data center* par une nouvelle voie, un ensemble urbain avec des logements, pensé en interactions avec le secteur Chabrol (13 ha), ses équipements existants (stade de football, dojo) et d'autres logements neufs.

Le PLU de La Courneuve a pris acte de ce projet et a zoné le site en fonction des usages ainsi décidés. L'agglomération Plaine Commune a été partie prenante pour accompagner la commune dans cette discussion avec l'opérateur. Suite aux retards d'Eurocopter lors du déménagement de l'installation, Interxion a déposé un nouveau permis de construire à l'été 2018. Ce nouveau projet ne vise plus l'intégration urbaine, et revient sur les négociations menées avec les collectivités locales, puisqu'il prévoit de développer un *data center* sur toute la parcelle de 6,3 ha.

Le site d'Eurocopter est particulièrement intéressant pour un opérateur de *data center* et semble constituer, selon le PDG d'Interxion, l'une des dernières grandes opportunités foncières à Plaine Commune. Au-delà de sa taille, et de sa connectivité (fibre le long de l'A86), la présence des lignes électriques de RTE qui passent le long de la parcelle (le long du chemin de fer) est stratégique. Il serait ainsi possible de se brancher directement sur le réseau RTE et de s'affranchir du raccordement au réseau Enedis. La puissance demandée pour ce *data center* serait de 100 MW⁵², pour 40 000 m² de surfaces IT. L'agglomération a souhaité améliorer l'intégration du projet et tenter de nouvelles discussions pour améliorer l'interface entre les nouvelles constructions et la ville : clôtures, entrées, végétalisation, mais également pour obtenir une façade urbaine non aveugle pour le bâtiment.

Alors qu'Interxion aurait pu jouer le jeu d'un projet partagé, améliorant le fonctionnement urbain du secteur Chabrol, contribuant ainsi indirectement à l'effort de construction de logement régional, à une meilleure porosité du tissu urbain, il vient au contraire bloquer tout changement.

De l'autre côté de l'Atlantique, des municipalités se sont différemment saisi du développement de ces bâtiments.

Hillsboro : zone d'activité IT, de la production électronique au stockage de données

Hillsboro est une ville de la banlieue de Portland, quelques kilomètres à l'Ouest de la capitale de l'Oregon. Son développement économique s'est appuyé sur l'arrivée d'Intel (et avant de Tektronic) dans les années 1970, puis d'une myriade de sous-traitants de l'électronique. Intel est en effet un acteur historique du territoire qui y produit ses processeurs. C'est aussi le plus gros employeur de tout l'Oregon (19 000 emplois). La commune est donc très dépendante de l'industrie informatique et concentre 41% de tous les emplois du numérique de l'Oregon. L'industrie des *data centers* y est aussi très présente, avec une quinzaine concentrée au nord de son territoire qui continue de se développer, sur des surfaces de plus en plus grandes avec QTS ou Digital Realty par exemple. Le français OVH a d'ailleurs ouvert une installation début 2018, mais on y trouve aussi LinkedIn hébergé chez Informart, l'entreprise de logiciels Adobe, les *datacenters* de Tata, Flexential, Edge Connex et d'autres. Les plus anciens se sont installés dans d'anciennes usines électroniques, les plus récents sont neufs.

Les *data centers* sont arrivés à Hillsboro à partir des années 2000, et continuent de s'y installer pour plusieurs raisons.

Des atouts structurels :

- Comme dans tout l'Oregon, une énergie abondante et bon marché grâce à l'hydroélectricité des barrages sur la rivière Columbia.

⁵¹ Agence Anyoji et Beltrando, *Cahier de prescriptions urbaines, paysagères et architecturales, étude de programmation urbaine et économique*, décembre 2012. Archive du service de la ville.

⁵² Entretien avec Fabrice Coquio, président d'Interxion France à Paris.

- Des infrastructures électriques déjà bien calibrées pour Intel, une puissance disponible importante, et deux nouvelles sous-stations en construction par Portland General Electric.
- Une position stratégique sur les câbles transpacifiques et entre le nord et le sud de la côte Ouest, et entre Portland et le Pacifique. Cette situation s'est même améliorée en 2018. Mark Clemons⁵³, directeur du développement économique de la ville, souligne ainsi que 75% de la bande passante de ces nouveaux câbles transpacifiques sont arrivés à Hillsboro en 2018, renforçant sa position stratégique sur les nœuds du réseau internet.
- Un foncier abordable et disponible, par la consommation de terres anciennement agricoles (faciles à urbaniser). La ville n'a pas beaucoup de difficultés à élargir la « limite de la croissance urbaine » ou UGB (Urban Growth Boundary) pour offrir de nouvelles surfaces constructibles, pour des usages industriels, tant qu'elle prouve qu'elle crée de l'emploi. Pourtant la contestation est croissante du côté de l'État, et de Portland Metro du fait de la faible création d'emploi et du mitage spatial. Les *data centers* grignotent lentement des acres de terres maraichères alors que de nombreuses friches industrielles et portuaires auraient pu accueillir ces usages numériques à Portland. La connectivité d'Hillsboro d'une part et les exemptions fiscales d'autre part, ont consolidé cette situation dans le temps.
- Des bâtiments transformables : anciennes usines de production électronique type Epson aujourd'hui occupé par Flexential, bâtiment d'Informart, ancienne usine de peinture pour OVH.
- Un climat tempéré, favorisant le *free cooling*.
- La desserte par l'autoroute, et la présence d'un aéroport à proximité immédiate (vols non commerciaux, 32 jets privés pour le lien avec la Silicon Valley en particulier).
- La proximité de la Silicon Valley (1h de vol), où un certain nombre d'entreprises présentes soit pour les *data centers* (Adobe, LinkedIn) soit pour la production (Intel) ont leur siège.

Des incitations fiscales et une action proactive de la collectivité :

- Incitations fiscales :
 - o L'Oregon est un des trois états étasuniens qui n'a pas de *sales tax*. L'acquisition de tout le matériel informatique nécessaire aux *data centers* est ainsi beaucoup moins chère.
 - o La ville a créé une *Entreprise zone* qui exonère les entreprises de la taxe foncière. Mais les incitations fiscales via les zones économiques spéciales obligent désormais les *data centers* à créer plus d'emplois. La presse locale a d'ailleurs été le relais d'un certain nombre d'interrogations face à l'octroi d'une fiscalité extrêmement avantageuse à leur endroit alors qu'ils ne créent que très peu d'emplois, souvent une dizaine pour une installation de 20 MW (sans compter les emplois de construction). Infomart a par exemple bénéficié d'une exemption de taxe foncière pour 20 ans à son arrivée.
- Par ailleurs, la ville est très accueillante pour le *business* via ses services techniques, qui facilitent toutes les démarches d'installation, de développement, de mise en relation, de coordination avec les compagnies électriques, de réseau, l'Etat, la Metro. Hillsboro a d'ailleurs créé un groupe de travail dédié sur ces questions de guichet unique pour les *data centers*.
- Enfin, les zones d'activité où sont implantés les *data centers* sont très soignées, aussi bien par la ville que les propriétaires et gestionnaires des parcs d'affaires :
 - o Végétalisation généreuse, présence d'un parc, plantations d'alignement...
 - o Pistes cyclables (mais trame viaire largement dimensionnée et très routière)
 - o Propreté des espaces

⁵³ Entretien réalisé avec Mark Clemons, département urbanisme d'Hillsboro, le 18 septembre 2017 à Hillsboro.

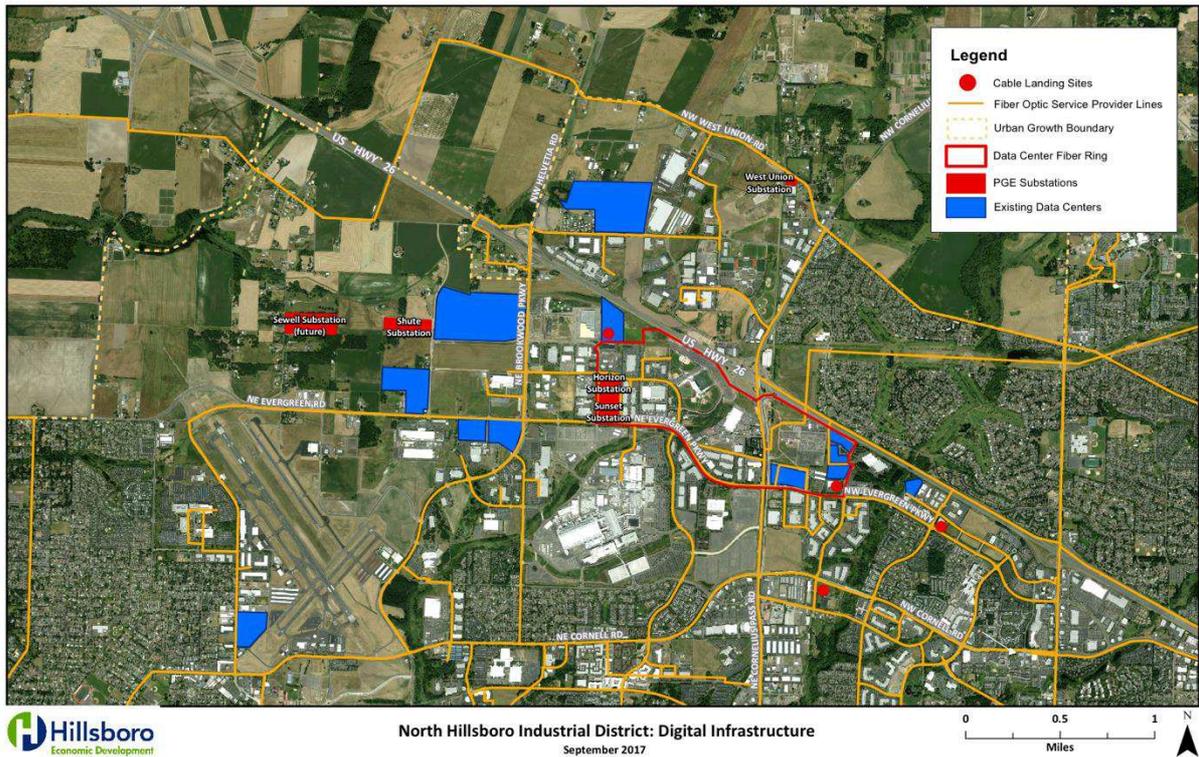


Figure 16. La zone d'activités numériques Crédits=© Ville d'Hillsboro, 2018



Figure 17. Data centers d'OVH et d'Adobe à Hillsboro Crédits=© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.

Le data center d'Informart

Un des data centers implantés à Hillsboro est celui de l'opérateur Informart. Il se situe au cœur des espaces d'activités de la commune, non loin de l'usine d'Intel et de la desserte autoroutière, et à côté d'un poste de transformation de BPA. Informart développe 32 000 m² de surfaces IT, avec une puissance dédiée de 18MW et une réserve égale en puissance à déployer lorsque le data center se remplira. En effet, il est aujourd'hui rempli à 50% en termes d'espace, et dépense 30% de l'énergie disponible. Son client principal est LinkedIn, qui occupe 30% du bâtiment, et a supervisé toute l'installation de ses serveurs et systèmes techniques pour atteindre un PUE affiché de 1.06. La température y est par exemple plus haute que dans les halls traditionnels de colocation d'Informart dans le reste du bâtiment : 22° au lieu de 18°. Ainsi, le PUE objectif pour la phase 1 est de 1,4 mais utilisé à 30% il chute à 1,7. Idem pour la phase 2 (extension), prévu à 1,06, il est actuellement à 1,2 avec 30% d'occupation



Figure 18. *Data center* d'Infomart, Hillsboro, Crédits=© Cécile Diguet et Fanny Lopez, 2018.

Le bâtiment est une ancienne usine de production électronique, avec un étage technique qu'Infomart a pu utiliser pour installer toutes les installations de froid. Une extension y a été ajoutée, réalisée par le même architecte qui avait construit le bâtiment initial (Jackson Main). Le fournisseur d'électricité d'Infomart est Constellation qui lui assure un approvisionnement 100% ENR (hydroélectricité, éolien, solaire) via le programme Direct Access. Ainsi le coût de l'énergie est de 6,5 cents/KWh au lieu de 8 à 9 cents/KWh avec PGE. Un des objectifs pour l'entreprise dans le futur serait d'avoir une énergie la plus locale possible.

Silicon Valley / Santa Clara : surenchère et suréquipement dans une zone métropolitaine à la pointe du monde numérique.

La Californie n'est pas la destination idéale pour des installations aussi stratégiques que des *data centers* au regard des risques de tremblements de terre, du prix de l'énergie élevé (excepté à Santa Clara), du foncier rare et cher ; mais il faut y être. C'est d'abord là où siègent les plus grands acteurs du numérique mondial (Alphabet-Google, Facebook, Oracle, Apple, Salesforce), et de nombreuses start-ups développant de nouveaux produits, logiciels, services, et donc, collectant, créant, traitant, stockant des données. C'est aussi une zone métropolitaine dense (pour les États-Unis), aux revenus élevés et aux pratiques numériques développées, bref un bassin de consommation et de prescripteurs stratégiques. La Silicon Valley a donc un besoin immense de *data centers*, certains territoires sont ainsi devenus son back-office infrastructurel.

La Silicon Valley est le berceau historique du développement d'internet et de l'informatique aux États-Unis. Elle s'étend, dans un tissu dense et embouteillé, de San Francisco à San José avec au cœur, Palo Alto, siège de l'université de Stanford, et hôte d'un point d'échange internet stratégique et historique pour la côte Ouest (ici aussi chez Equinix). Le Palo Alto Internet Exchange (PAIX) se situe dans un ancien central téléphonique au cœur de la ville, près de son axe le plus commerçant, University avenue. Mais c'est la ville de Santa Clara qui concentre le plus de *data centers* sur son territoire : une cinquantaine qui consomment 70% de l'énergie fournie par la compagnie publique municipale, Silicon Valley Power, et représentent 80% de ses revenus. Tandis que le centre de la vallée (Mountain View, Palo Alto, Cupertino, Sunnyvale) accueille plutôt des bureaux et campus liés aux entreprises de la *high-tech* ; le sud, Santa Clara et San José en particulier, concentre les infrastructures de stockage.

Ce territoire anciennement maraîcher était appelé la *valley of Heart's Delight* pour ses vergers en fleurs. Elle s'industrialise tout au long du XXe siècle, avec la concentration de conserveries liées aux productions agricoles, puis surtout, avec le développement de la recherche militaire et informatique d'après-guerre. Santa Clara devient alors une ville productive autour de l'électronique et des semi-conducteurs. Le siège d'Intel en est un héritage, la fabrication des processeurs a d'ailleurs été déplacée à Hillsboro, Oregon. Le territoire offre toujours une puissance électrique déterminante, des réseaux surdimensionnés notamment pour l'assainissement, de grandes parcelles désormais à prix d'or, mais surtout l'électricité la moins chère de toute la Californie. Cet avantage, indéniable pour l'industrie des *data centers*, les a poussés à s'y agglutiner dès les années 1990, transformant les anciennes usines

électroniques puis construisant leurs propres bâtiments, toujours aussi discrètement mais sûrement. La ville de Santa Clara bénéficie ainsi d'un choix stratégique : celui d'avoir créé sa propre compagnie en 1896, dont les unités de production, notamment hydrauliques, sont amorties depuis longtemps. Elle fournit également un réseau de fibre noire pour les entreprises, complétant une offre parfaite pour le monde numérique.

S'ils perpétuent d'une certaine façon leur rôle de territoire servant du cœur métropolitain et des centres de décision, Santa Clara et San José accueillent aussi de nombreuses activités : du tertiaire, des sièges d'entreprises, des universités, des bureaux, des équipements sportifs et culturels d'envergure.

Aujourd'hui, le foncier commence à se faire rare à Santa Clara et l'espace dédié aux *data centers* entre en compétition avec les besoins en logement. Alors qu'ils étaient souvent dans les zonages industriels, ils se retrouvent aujourd'hui dans les zonages bureaux, ce qui illustre leur mutation en termes d'intégration urbaine. Ils imaginent ainsi des développements plus compacts et plus architecturés, à l'image du campus de Vantage qui construit plus haut et a densifié sa parcelle sur Walsh boulevard. Sur cet ancien site d'Intel, contenant initialement un seul *data center*, il y en a maintenant cinq, et un sixième vient d'être livré sur une parcelle attenante. Le campus accueille également son propre poste source. La limite du règlement urbain sur les hauteurs est cependant à 21 m, a priori négociable au cas par cas selon le responsable de l'urbanisme⁵⁴.



Figure 19. Campus Vantage Crédits=© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.

La ville de San José, juste au sud de Santa Clara, accueille en conséquence de plus en plus de *data centers* : un projet de Microsoft atteint ainsi les 40 000 m²⁵⁵. Equinix y développe aussi un campus, sur une ancienne usine de micro-processeurs d'IBM et des terres agricoles. La Central Valley (à l'est de la baie de San Francisco) et la ville de Hayward (où un *data center* d'Amazon a été construit) se développent également en complément.

La ville de Santa Clara a un positionnement pro actif pour attirer les *data centers* et compte ainsi plusieurs particularités notables.

- Il y a une fiscalité économique favorable pour ces industries malgré le peu d'emploi qu'ils offrent, car peu d'emplois a pour corollaire peu de congestion automobile, problème majeur dans la vallée.
- L'électricité de la compagnie électrique municipale est la moins chère de toute la Californie. Par ailleurs, les consommations énergétiques importantes des *data centers* permettent à la municipalité de réinvestir les bénéfices dans les services publics et les équipements locaux ;
- La municipalité a ses propres pompiers, des services techniques très mobilisés, avec un traitement des demandes d'installation intégré et donc très rapide.
- Des efforts sont demandés aux *data centers* pour une meilleure intégration architecturale et urbaine, les résultats sont souvent moins défensifs qu'en France

⁵⁴ Entretien Yen Chen, responsable de l'urbanisme, ville de Santa Clara.

⁵⁵ <http://www.datacenterknowledge.com/microsoft/report-microsoft-buys-land-silicon-valley-huge-data-center>

Le data center, consolidation d'un modèle obsolète ou réinvention potentielle ?

Les périphéries du numérique ou zones d'activités numériques ont-elles exactement les mêmes effets spatiaux que les centres commerciaux et les zones logistiques ?

Il faut d'abord noter que les *data centers* sont une hybridation entre :

- des dimensions franchement industrielles par la consommation électrique massive qui y est réalisée et les réserves de fioul stockées, ainsi que la part technique du bâtiment.
et
- des dimensions tertiaires par l'absence de nuisances matérielles types poussières, flux de camions, et pour les plus neufs et mieux conçus, absence de nuisances sonores, mais aussi la présence de bureaux et d'espaces de réunions.

Ils s'intègrent donc aussi bien à des espaces comme la Plaine St Denis où l'on trouve du tertiaire, de l'industriel, du résidentiel (cette cohabitation s'explique aussi par les mutations en cours), que dans des espaces productifs et tertiaires comme Hillsboro ou Santa Clara.

Ici c'est davantage l'accumulation des *data centers* qui pose question, dans la mesure où elle vient nourrir un modèle (la zone d'activités) qui paraît obsolète au regard des impératifs pour lutter contre les effets du changement climatique, mais aussi parce qu'elle crée une pression forte sur le système énergétique local.

Ces espaces ont en effet en commun de proposer :

- Des territoires monofonctionnels, ne favorisant pas les complémentarités entre usages, mais minimisant les conflits d'usage.
- De grandes emprises infranchissables et très minéralisées, assez hostiles aux piétons.
- Des objets architecturaux de type « grandes boîtes », sans insertion paysagère ou urbaine
- Des bâtiments dédiés vite obsolètes, difficilement transformables.

Ainsi, à l'heure où de nombreux territoires français essaient difficilement de densifier et de diversifier leurs zones d'activités, de les reconnecter à leurs tissus bâtis, d'en faire évoluer les bâtiments obsolètes, la lutte contre le changement climatique suppose de :

- Favoriser les déplacements piétons, donc la porosité des emprises bâties et une trame viaire dense, avec des îlots de petite taille.
- Limiter les emprises au sol des bâtiments pour ne pas imperméabiliser les sols (donc encadrer au mieux le stationnement), favoriser l'infiltration des eaux, la biodiversité mais aussi limiter l'effet d'îlot de chaleur urbain potentiellement aggravé par les rejets de chaleur des *data centers*.
- Réduire la consommation foncière grâce à davantage de mixité fonctionnelle, une densité raisonnée, la transformation de l'existant.
- Réduire les consommations énergétiques et favoriser les échanges de chaleur et les solidarités énergétiques.

Il faudrait faire du *data center* un vecteur de transformation positif des ZA pour qu'il ne vienne pas simplement renforcer un modèle qui n'est pas pertinent aujourd'hui pour lutter contre le changement climatique. Cela impliquerait donc de revoir son architecture, son intégration spatiale, environnementale et énergétique, son hybridation mais aussi de planifier, anticiper, guider les logiques d'implantation des *data centers*, en fonction de leur diversité et de leurs attentes.

2.6 A l'assaut du monde rural

Dans le monde rural et les territoires périurbains, la problématique est davantage celle du mitage, de la gouvernance et d'un objet solitaire incapable d'intégrer un fonctionnement écosystémique.

Deux GAFAM à Prineville, au cœur de l'Oregon

L'Oregon se positionne comme une option moins chère, moins risquée et plus verte que la Californie grâce à une énergie hydraulique généreuse et bon marché provenant des barrages du New Deal sur la rivière Columbia, une grande disponibilité foncière, une bonne connectivité, le tout à deux heures de vol de la Silicon Valley. A The Dalles, Google a construit son premier *data center* en 2006. A Prineville, dans un territoire rural et désertique, Facebook a fait de même en 2009 et Apple l'a suivi de près en 2011. Les deux géants du numérique continuent de développer leurs installations : un troisième espace de stockage d'Apple est en cours d'achèvement et Facebook a annoncé en décembre 2017 la construction de deux nouveaux bâtiments. Ce qui portera leur nombre à cinq, pour une future surface totale de 200 000 m² (soit la surface du terminal 4 de l'aéroport de Madrid Barajas ou celle de Grand Central Station à New York). Les trois façades de Facebook sont aussi longues que celles du Château de Versailles, côté jardin. Encore plus au nord, l'État de Washington jouit également de l'énergie des barrages sur la rivière Columbia et on trouve à Seattle le siège historique d'Amazon, et non loin, à Redmond, celui de Microsoft, dont un campus de *data centers* est installé dans un village rural du centre de l'État à Quincy.



Figure 20. *Data center* d'Apple et Facebook, Prineville Crédits=© Cécile Diguet et Fanny Lopez, 2018.

Plusieurs points sont à noter :

- Les *data centers* sont arrivés masqués sans dire qui ils étaient. Le nom de code de Facebook était Vatas. La collectivité savait seulement que le projet avait besoin de : 80 à 120 ha, beaucoup d'eau et beaucoup d'électricité. Aucune idée en revanche de l'activité de cet opérateur au démarrage et jusqu'à assez tard dans l'avancement du projet. La culture du secret des GAFAM peut ainsi aller à l'encontre d'un besoin d'anticipation et de planification urbaine et économique des territoires.
- Ils se sont implantés sur les hauteurs de la ville, dans une zone industrielle très hétérogène isolée du reste de la ville, et ne se voyant pas depuis son centre, à la demande de la commune. La limite de croissance urbaine (*urban growth boundary*) a été étendue pour répondre à leurs demandes, mais leurs constructions ont dû respecter des contraintes de hauteur pour préserver le paysage (les *rims*).
- Dans une commune de 10 000 habitants, avec un taux de chômage de 21% en 2008, ces *data centers* ont été une aubaine en termes d'emploi :
 - Dans le secteur de la construction (toujours d'actualité avec les extensions en cours)
 - Pour le fonctionnement des sites : Apple et Facebook représentent 400 emplois directs et indirects (sous-traitants, maintenance...).
- Facebook (davantage qu'Apple) s'implique dans la communauté locale, par le financement : de concerts gratuits l'été dans le parc, de nouveaux outils informatiques pour les écoles ou des bourses scolaires, pour un total estimé, depuis son arrivée, à plus d'un million de dollars.

- Les bâtiments d'Apple et Facebook sont le reflet de leur obsession pour la sécurité et l'opacité : voies condamnées par des entraves en béton, doubles rangées de clôtures, doublées de sauts de loup, vidéo surveillance, patrouilles véhiculées de vigiles en permanence...
- Entre 2008 et 2017, la puissance électrique nécessaire dans la ville est passée, selon le Directeur Général des Services de la ville⁵⁶, de 10 à 500 MW. Facebook et Apple ont co-investi en conséquence dans 5 fermes solaires de chacune 15 MW, non loin de leurs implantations. Apple a également investi dans un projet de micro barrage hydroélectrique et chacun paye des frais de projets annuels pour s'installer puis se développer, et contribuer à investir dans les infrastructures locales (postes sources, usines de production d'eau, d'assainissement).

Amazon Web Services à Umatilla et Port Morrow

Encore plus discret, voire vraiment opaque, le leader mondial du cloud Amazon Web Services (AWS) construit des *data centers* à un rythme effréné dans le monde entier. De Port Morrow à Umatilla, toujours au bord de la manne hydroélectrique de la rivière Columbia, la firme déploie des entrepôts de stockage aux allures d'usines, dans des parcs industriels isolés ou des *no mans land* ruraux. Aucun soin n'est apporté au bâtiment, qui pourrait se confondre avec un entrepôt de stockage alimentaire ou une plateforme logistique, chapeauté de climatiseurs imposants et attelé de gros générateurs de secours au fioul.



Figure 21. Amazon Web Services, Umatilla. Crédits © Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.

Umatilla, petite ville atone de presque 7000 habitants, née en même temps que la ruée vers l'or en 1863, accueille depuis 1962 les stocks d'armes chimiques de l'armée américaine. Elle a sa propre compagnie électrique municipale et n'a pas pu refuser à Amazon de s'y installer. Julie Peacock⁵⁷, de la Commission Services Publics de l'Etat de l'Oregon précise ainsi que les petites communes veulent que les *data centers* s'installent, mais que cela risque de mettre en danger leur propre système électrique. En effet, la demande de puissance est telle que la compagnie électrique locale s'est engagée à construire de nouvelles unités de production pour lesquelles d'une part elle va s'endetter, d'autre part

⁵⁶ Entretien avec Phil Stenbeck, Prineville.

⁵⁷ Entretien avec Julie Peacock, Portland.

faire reposer l'effort sur tous les consommateurs de son territoire, pourtant peu fortunés, alors même que rien ne permet d'assurer qu'AWS sera encore là dans 5 ans. L'entreprise exerce ainsi une pression qui est en mesure de déstabiliser l'équilibre économique et énergétique du territoire.

La transition numérique de ces territoires ruraux est questionnante car elle rend ces villes, ici Prineville et Umatilla, très dépendantes de peu d'acteurs et elles sur-dimensionnent leurs infrastructures énergétiques, hydrauliques, routières pour des acteurs dont on n'a que très peu d'idées sur la longévité.

Les data centers dans les champs : le territoire élargi de Paris Saclay

Le projet de Silicon Valley à la française

Le territoire considéré ici est situé à cheval sur 2 départements (Yvelines et Essonne) et sur 4 intercommunalités (Saint-Quentin-en-Yvelines, Versailles Grand Parc, Paris Saclay et le Pays de Limours). Elle comporte le périmètre de l'Opération d'Intérêt National (OIN) Paris Saclay, piloté par l'Etablissement Public d'Aménagement Paris Saclay (EPAPS). De nombreuses transformations ont lieu sur ce territoire qui concentrent désormais de nombreuses activités de recherche ainsi que des activités liées au numérique, impliquant la présence de *data centers*. L'EPAPS est notamment en charge de l'aménagement du « campus urbain », qui doit accueillir à terme 68 000 étudiants et 11 000 chercheurs⁵⁸.

Il est composé :

- de la Zone d'Aménagement Concerté (ZAC) du quartier de l'école polytechnique ;
- du quartier de Corbeville qui doit accueillir à horizon 2024 un « hôpital du futur » ;
- du quartier du Moulon, qui se développe autour des implantations de Centrale Supélec et des bâtiments de l'Université Paris-Sud ainsi que de l'Ecole Normale Supérieure.

L'EPCI Paris Saclay inclut le campus urbain, aménagé par l'EPAPS, ainsi que d'autres zones dans lesquelles des opérateurs de *data centers* sont présents, comme dans la zone d'activité de Courtaboeuf, l'une des plus grande d'Europe, et dans les villes des Ulis ou de Marcoussis.

Ce territoire a connu trois vagues de développement successif, venant à chaque fois consolider sa dimension numérique avec le calcul informatique et le stockage de données.

- Les premières implantations sur ce campus sont celles du CNRS en 1946 (Centre National de la Recherche Scientifique), du CEA en 1952 (Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Renouvelables), de l'INRA en 1950 (Institut National de la Recherche Agronomique) et de l'ONERA en 1948 (Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales).
- Une seconde série d'implantations a eu lieu dans les années 1970, notamment avec l'implantation de l'Ecole Polytechnique à Palaiseau en 1976, la création de l'université Paris XI à Orsay en 1971 ou encore celle de Supélec à Gif-sur-Yvette en 1975.⁵⁹ Dès 1992, un SDAU (Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme) est établi et prévoit le développement de 640 hectares pour la recherche. A l'époque, ce projet se heurte aux oppositions locales et à un soutien distant de l'Etat⁶⁰. En 2006, une OIN est créée avec comme projet que cette « Silicon Valley » à la française puisse regrouper 25% des activités de recherche en France. Deux RTRA (Réseaux Thématiques de Recherche Avancée) voient aussi le jour en 2006 dans le domaine de la Physique et des Sciences et Techniques de l'Information et de la Communication ainsi que deux pôles de recherche et d'enseignement supérieur (UniverSud et ParisTech).
- Un nouveau mouvement s'annonce en 2009 avec les arrivées successives d'AgroParisTech, de l'ENS Cachan, de l'Ecole Centrale et de l'ENSAE qui souhaitent rejoindre le campus. Dans le même temps, EDF décide de transférer son principal centre de R&D de Clamart à Palaiseau,

⁵⁸ Pierre Veltz, *Petite ensaclaypédie*, Editions La Découverte, Paris, 2015.

⁵⁹ Site de l'université Paris-Saclay: <https://www.universite-paris-saclay.fr/fr/notre-histoire>

⁶⁰ Veltz *op-cit*.

à côté de l'école Polytechnique. La construction de la ligne 18 du métro reliant Nanterre à Orly, doit accompagner le projet mais son report à 2027 pour le premier tronçon a été validé par les derniers arbitrages gouvernementaux (avril 2018), impacte les équilibres économiques des opérations et les calendriers de déménagement des écoles. Parmi les projets en cours, citons le projet DIGIHALL⁶¹ qui regroupe des acteurs du numériques, chercheurs et entreprises, sur des sujets liés aux technologies du numérique et de l'intelligence artificielle⁶².

Les *data centers* à Saclay

Le territoire du plateau élargi se caractérise par une densité modérée et une forte présence d'espaces ouverts et agricoles, enjeu majeur des développements à venir. Le solide approvisionnement électrique et la disponibilité de postes sources (notamment celui de Villejust⁶³ et celui en construction à Saclay) sont un atout supplémentaire pour les futures implantations de *data centers*. Enfin, la proximité des centres de recherche et des parcs d'activités comme ceux de Courtaboeuf et de Vélizy sont aussi propices à l'intégration des *data centers* sur ce grand territoire. Sept *data centers* sont actuellement implantés sur le territoire de l'EPCI Paris Saclay. En élargissant le périmètre, nous avons pu répertorier 16 sites. Certains proposent de l'hébergement et sont gérés par des grands noms du domaine : Data4 à Marcoussis depuis 2006, Telehouse à Magny-les-Hameaux depuis 2009, Colt aux Ulis depuis 2016 ou Atos à Clayes-sous-Bois depuis 2017. On compte également des acteurs plus modestes comme Cloudata au Plessis Robinson, Kheops/fiducial à Vélizy ou Alionis sur Courtaboeuf. Il y a également de nombreux *data centers* universitaires et de recherche ainsi que ceux d'entreprises et de centres de R&D comme celui d'EDF Lab Paris-Saclay inauguré en 2016.

A l'occasion du plan campus en 2010, plusieurs laboratoires du CNRS ont lancé le projet Virtual Data afin de construire et de mutualiser 2 espaces destinés à la simulation et au calcul (salle plateau et salle vallée)⁶⁴. La première correspond au *data center* de l'Ecole Polytechnique. La seconde est une salle commune qui a permis de rassembler et de rationaliser les 650 m² de salles IT réparties dans différents laboratoires en une salle unique de 220 m². Un refroidissement à eau (water cooling) a été ainsi mis en place.

Sur son site de Bruyères-le-Châtel, le CEA possède par ailleurs un supercalculateur d'une puissance de l'ordre de 25 pétaflops par seconde (soit 25 millions de milliards d'opérations par secondes), dédié à la recherche. Ce site est partagé avec d'autres laboratoires du plateau de Saclay⁶⁵.

En plus de ces deux utilisations (colocation et recherche), on retrouve également sur site la présence de grands opérateurs téléphoniques comme SFR à Trappes et Bouygues Télécom à Montigny-le-Bretonneux. Leurs deux *data centers* ont une fonction mixte avec l'hébergement de leurs applications et services et l'hébergement de serveurs d'entreprises clientes.

Contrairement à ce qui est observé à Plaine Commune ou à Paris, on remarque des implantations très récentes, avec des *data centers* comme celui de Colt construit en 2016 ou celui d'Atos en 2017.

L'attrait des *data centers* pour ce territoire se confirme. D'après l'EPCI Paris-Saclay, l'un des GAFAM serait intéressé pour ouvrir un *data center* près de Villejust.⁶⁶ Pour l'instant, la discussion avec l'EPCI amènerait à l'utilisation d'une parcelle délaissée de 15 hectares, à l'est de l'autoroute A10. Ce terrain présente de fortes servitudes dues aux réseaux RTE le traversant (deux lignes de haute tension et deux lignes moyenne tension). Ce terrain est inscrit dans l'OIN, et se situe en zone AU dans le PLU (zone à urbaniser). Une étude de faisabilité a été réalisée par Enedis (et payée par le client) mais l'EPCI ne dispose pas de son résultat. Cette étude porte sur la faisabilité de trois bâtiments de 15 000 m² pour une puissance de 60 MW au total. Une telle puissance pourrait leur permettre de se connecter directement aux lignes RTE car la puissance serait supérieure à 50 MW.

⁶¹ Site de l'EPAPS, <http://www.epaps.fr/projets/tous-les-projets/nano-innov/>

⁶² Les membres fondateurs de ce projet qui compte regrouper 1500 chercheurs, sont l'Inria, le CEA, IRT SystemX, le pôle Systematic, Telecom ParisTech et Telecom SudParis. Un exemple concret de ce creuset scientifique est l'implantation d'équipes de Renault en 2016 dans les locaux CEA - NANO INNOV afin de travailler sur le développement du véhicule autonome.

⁶³ La base de données capareseau.fr indique que la puissance supplémentaire maximale de ce poste est de 896 MW.

⁶⁴ Présentation de Virtual Data lors de l'inauguration de la salle vallée, https://indico.lal.in2p3.fr/event/2311/contributions/4412/attachments/4192/5118/P2IO_Virtual_Data_-_Inauguration_Salle_Vallee_-_20140128.pdf

⁶⁵ Entretien avec Antoine du Souich et M. Simon-Pierre Kuzar de l'EPAPS.

⁶⁶ Entretien avec Axelle Champagne, DGA développement économique innovation à l'agglomération ; Eric Siberath, directeur de cabinet adjoint en charge de la stratégie numérique ; Claire Le Strat, responsable de la transition énergétique à la communauté d'agglomération Paris-Saclay.

D'après la directrice générale adjointe au développement économique et à l'innovation de l'EPCI, le bassin de Versailles – Saclay est sollicité tous les deux mois pour une recherche de foncier afin de construire un *data center*. Deux projets sont d'ailleurs en cours, en lien avec la présence de Data4, car chacun de ces *data centers*, aura un *back-up* de ses données chez Data4 à Marcoussis. On voit ici comment peut fonctionner la dynamique de concentration des *data centers*.

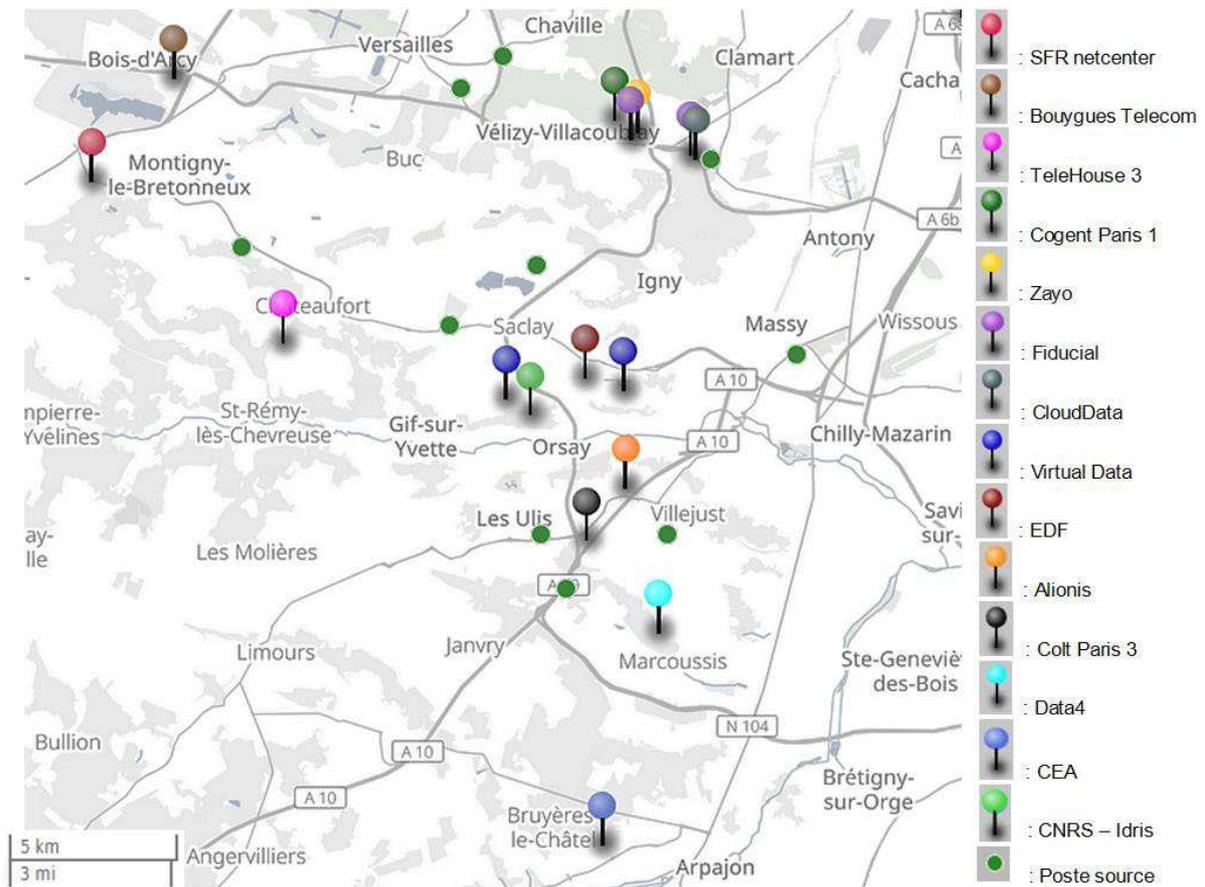


Figure 22. Les *data centers* autour du Plateau de Saclay 2018 (fond : OpenStreetMap, données : ENERNUM)

Les hypothèses de calcul pour extrapoler les données manquantes du tableau sont fournies en annexe. (Extrapolation / Valeurs sourcées)

Les *data centers* autour du Plateau de Saclay, octobre 2018.

Entreprise - Data center	Date de construction	Commune	Type	Taille (m ²)			Puissance serveurs (MW)	Puissance totale disponible (MW)
				Parcelle	SdP	IT		
GDC 2 - Cogent Communication	2006	Vélizy-Villacoublay	Housing + hosting			250		> 1 MW
GDC 3 - Zayo	2007	Vélizy-Villacoublay	Housing + hosting			2 000		En rénovation
Fiducial (ex Kheops Organisation 2)		Vélizy-Villacoublay	Housing + hosting	1 230		230		>1 MW
Fiducial (ex Kheops Organisation 1)		Plessis Robinson	Housing + hosting	6 ha (ZA)		650	1	3 MW
CloudData	2012	Plessis Robinson	Housing + hosting			1 200	2	6 MW
Atos - Bull 4 et 5	2017	Clayes-Sous-Bois	Housing + hosting	18 000		1 500	3	9 MW
SFR - Netcenter	2015	Trappes	Housing + hosting			1 000		12 MW
Bouygues Telecom	2009	Montigny-le-Bretonneux	Entreprise +location	18 000	9 882	3 660	6	20MW
TeleHouse 3	2009	Magny-Les-Hameaux	Housing + hosting	65 969	26 211	5 000	8,5	30 MW
EDF	2016	Palaiseau	R&D entreprise					-
Virtual Data (deux salles)	2014	Palaiseau	Laboratoires 2 salles mutualisées			420	1,5	1,8 MW
Alionis DC 1	2005	ZA Courtaboeuf	Housing + hosting	5 000		1100	2	6 MW
Colt Paris 3	2016	Les Ulis	Housing + hosting	30 572	13 161	5000	8,5	20 MW
Data4	2007	Marcoussis	Housing + hosting	111 ha	39 000	17000		100 MW
CEA		Bruyères-le-Chatel	Calculateur			1500		3 MW
CNRS - IDRIS		Orsay	Calculateur					-
Total						40510		212,8 MW

Data 4, un campus dans les champs

Data 4 s'est installé à Marcoussis en 2008, sur l'ancien site d'Alcatel, précédemment Laboratoires de Marcoussis de la CGE, Compagnie Générale d'Electricité, qui a accueilli des recherches sur la fibre optique dans les années 1970 et 1980. L'emprise s'étend sur 120 hectares, dont une partie est boisée, et une partie seulement est dédiée aux data centers tandis que le reste est loué à d'autres entreprises. C'est le seul campus de *data centers* que l'on peut trouver en France, avec des capacités d'extension importante. Il n'a aucun problème d'approvisionnement électrique car il est branché directement au réseau RTE, sur le poste de Villejust (héritage Alcatel) et un poste de transformation a été construit sur site qui a des capacités électriques de 100 MW. Le campus compte 8 bâtiments de data centers, il en est prévu 20 à terme. A ce jour, grâce à l'achat de Guarantee of Origin (l'équivalent européen des RECs, Renewable Energy Certificates), il peut afficher un approvisionnement électrique 100% ENR. A l'image de Stockholm qui a créé des *data centers parks* pour canaliser leurs implantations, et les obliger à se raccorder aux réseaux de chaleur, le modèle du campus peut être intéressant dans sa capacité à rassembler et mutualiser. Mais ici le choix typologique favorise une forme d'étalement, avec une recherche d'urbanité *new urbanism* qui fait se confondre ces usines de données avec des pavillons dispersés autour de l'étang central. L'implantation sur un territoire aussi peu dense empêche également tout réemploi de chaleur. L'étude de faisabilité en cours dira s'il est possible d'injecter cette chaleur fatale dans le RCU de Nozay pour chauffer des serres agricoles et des équipements publics.



Figure 23. Campus Data 4. Crédit=©Data 4 (gauche) Cécile Diguët et Fanny Lopez (droite), 2018.

Autour de Saclay comme dans l'Oregon rural, la dispersion des *data centers* a plusieurs conséquences :

- L'invisibilisation du phénomène d'accumulation des installations numériques et de leur poids énergétique, loin des utilisatrices et des utilisateurs.
- Le mitage de terres agricoles ou non-urbanisées.
- Les impossibles solidarités énergétiques entre usages complémentaires, excepté éventuellement pour des serres agricoles.
- Un impact environnemental (imperméabilisation des sols, rupture des continuités écologiques, anthropisation des milieux...) et paysager négatif.
- Des rapports de force qui peuvent être déséquilibrés entre *Big Tech* et petites collectivités.

En revanche, dans des territoires périurbains de délaissés infrastructurels comme c'est le cas pour le site visé par un des GAFAM le long de l'A10, dans l'Essonne, il semble intéressant de cibler des terrains contraints soit par des servitudes, soit par la proximité d'infrastructures nuisantes (en revanche peu amènes pour les employé·e·s, même en petit nombre)

3. Jeux d'acteurs et gouvernance des territoires numériques

3.1 L'écosystème des acteurs des data centers

Le monde des *data centers* en France regroupe une grande diversité d'acteurs, nous citons ici les principaux mais de façon non exhaustive.

- **Les concepteurs de *data centers* :**
 - **Les prospecteurs fonciers / conseils immobiliers**
CBRE, JLL, BNP Paribas Real Estate...
 - **Les agences d'architectes**

En France, on compte trois agences d'architecture, s'étant spécialisée sur les projets de *data centers* :

- ENIA qui a construit les *data centers* d'Orange et EDF à Val-de-Reuil ou de BNP Paribas à Romainvilliers (qui chauffe le centre nautique voisin).
- L'agence Emmanuel Kuhn, qui travaille par exemple avec Interxion (rue Rateau, La Courneuve ; site Eurocopter).
- RBA (Reid Brewin Architectes), qui a construit par exemple pour Equinix (Pantin), et Global Switch (Clichy La Garenne).

D'autres agences d'architectures ont réalisé des *data centers* mais à une échelle plus modeste ou expérimentale :

- L'agence GRAU qui a construit le *data center* de l'université de Bourgogne (300 m²), avec réinjection de la chaleur produite (400kw) dans le réseau de chaleur de la ville de Dijon.
- L'architecte Lina Gotmeh a réalisé des études pour le projet de *data centers* intégrés aux gares (évoqués ci-dessus) de la Société du Grand Paris.

- **Les bureaux d'études techniques**
 - BET spécialisés en *critical facilities*, avec une vision globale (refroidissement, énergie, sécurité, urbanisation du DC...).
 - BET énergie et électricité, construction.

Global	Construction	Energie - électricité
APL Critical Building IBM Jerlaure	Cap Ingelec	Eaton Engie Axima Bouygues Energie et Service SOCOMECE Vertiv Engie Cofely

- **Les constructeurs**
 - Bouygues construction
 - Vinci
 - Eiffage

- Spie Batignolles
- SNEF

- **Les fournisseurs de matériel** : informatique, électrique, de refroidissement... (et leurs services après-vente qui interviennent après livraison du bâtiment)

Informatique	Electricité (onduleurs, switch...)	Energie (générateurs de secours)	Froid - CVC	Sécurité	Mobilier (racks, cloisons, câbles management)
Intel, HP, Cisco Google, Facebook, OVH	Schneider Electric Legrand Vertiv Siemens Eaton	Eurodiesel Caterpillar	Carrier Vertiv Stulz	Delta Security Solutions	Minkens Vertiv

Il faut noter la spécificité de certains acteurs comme Google, OVH et Facebook, qui fabriquent eux-mêmes leurs serveurs. Cela leur permet de maîtriser toute la chaîne de production, et non pas de dépendre de fournisseurs qui peuvent limiter leurs assurances sur l'usage du matériel, notamment sur les températures à ne pas dépasser pour un bon usage. Cela peut permettre d'améliorer le PUE des *data centers*.

- **Les gestionnaires : entretien, maintenance**

On retrouve des acteurs présents en amont sur la fourniture de matériel :

- Vertiv
- Schneider Electric
- Delta Security Solutions

Mais aussi des acteurs polyvalents :

- Vinci Facilities qui inclue les *data centers* dans son offre de Facilities Management
- Engie Cofely (facilities management)

Et des acteurs spécialisés :

- Entretien, nettoyage : Cleansoft Solutions

- **Les opérateurs**

Au-delà des opérateurs de colocation, on retrouve une grande variété d'acteurs pour qui le *data center* se positionne au cœur de leurs activités (liste non exhaustive) :

- Les ESN ou entreprises de services numériques : Alterway Hosting, Agarik (Bull), Sopra Steria, Intrinsec, Atos.
- Les hébergeurs à valeur ajoutée : OVH, Aruba Cloud, Ikoula, Amen.
- Les opérateurs télécoms : Celeste, TDF, Zayo, Acropolis Telecom, Orange, SFR, Iliad...
- Les opérateurs de colocation : Equinix, Global Switch, Interxion.

Pour les opérateurs de colocation, les *data center* sont des produits financiers à rendements très élevés, et très rapides (en moyenne 5 ans). Certaines entreprises majeures du secteur de la colocation comme Digital Realty, CoreSite ou Equinix sont des fonds d'investissements immobilier⁶⁷, statut qui sur le sol américain permet une large défiscalisation de leurs revenus (les REIT). Elles investissent avant de construire et standardisent les *data centers* à un niveau global. Ce positionnement les conduit à ne pas

⁶⁷ Des REIT : real estate investment trust.

s'aligner sur des projets ou innovations à l'amortissement plus long, comme des projets de récupération de chaleur, de tri-génération ou d'utilisation d'ENR locales par exemple.

Si le monde de la colocation (qui ne représentent cependant que 30% de *data centers* en France, selon le Gimelec) continue de se développer fortement, une consolidation importante est en cours depuis plusieurs années, vers un nombre d'acteurs réduit et consolidant de vastes patrimoines.

- Les services de *Cloud computing* : Microsoft, AWS, Google, OVH

A noter que Facebook a lancé le projet *Open Compute* pour partager sa stratégie informatique et technique pour la performance optimale des *data centers*.

3.2 La construction d'une expertise côté collectivités locales

Le monde des *data centers* présente une opacité et une complexité qui ne facilite pas les échanges entre acteurs. Cependant, quand il a été identifié comme une opportunité économique, comme à Santa Clara (Californie) ou Hillsboro (Oregon), les collectivités ont développé des expertises et se sont organisées en interne. On note en revanche, qu'en France, notamment à Saclay comme à Plaine Commune, le dialogue semble plus difficile à mettre en place.

Santa Clara : autonomie, intégration et anticipation

Au début des années 1990, des *data centers*, d'abord petits, dans du bâti existant notamment des télécoms, se sont installés à Santa Clara. Puis, et notamment avec le développement de labels environnementaux et d'exigences de performances énergétiques, de nouveaux bâtiments de plus en plus grands se sont construits. Alors que la ville validait au départ ces projets sans trop d'études techniques, en se concentrant surtout sur la consommation d'eau pour le refroidissement (et le dimensionnement des réseaux d'égouts), elle a rapidement décidé de s'organiser pour développer un guichet unique pour les *data centers* et ainsi, anticiper et organiser le développement de ces infrastructures numériques de façon pro-active⁶⁸.

Ce guichet unique rassemble :

- Silicon Valley Power (SVP), la compagnie électrique municipale créée en 1896. Une personne est spécifiquement chargée des clients *data centers* (qui représentent 80% des revenus de la compagnie). La compagnie a aussi développé et gère un réseau de fibre optique (et un wifi gratuit dans la ville) et est en charge de la gestion des réseaux d'eau et d'assainissement.
- Les pompiers : Santa Clara est une rare ville de la Silicon Valley à ne pas avoir de pompiers dépendant du comté, mais un corps municipal. Selon elle, cela permet de trouver des solutions consensuelles plus facilement avec les *data centers*, davantage en termes d'obligation de résultats que de moyens.
- Les services de l'urbanisme et de l'environnement.

Les revues techniques des projets sont ainsi réalisées en trois à quatre semaines, à l'issue desquelles les permis sont donnés ou refusés. Tous les partenaires, en particulier la SVP, sont impliqués le plus en amont possible des projets, afin d'intégrer au plus vite toutes les contraintes techniques.

La ville de Santa Clara réutilise ainsi les bénéfices réalisés par Silicon Valley Power dans les équipements publics de la ville. Un exemple en est l'imposant stade de football américain construit au nord de la ville, mais plus largement la qualité des espaces publics, parcs et équipements locaux. On note ici l'intérêt de la municipalisation de certains services pour une approche intégrée et articulée de l'implantation des équipements complexes que sont les *data centers*, mais aussi pour en relocaliser les bénéfices économiques.

⁶⁸ Entretien avec Yen Chen, responsable de l'urbanisme à la ville de Santa Clara, Santa Clara.

Hillsboro, groupe de travail partenarial et stratégie économique

A l'image de Santa Clara, la ville d'Hillsboro, dans la banlieue de Portland, a vite identifié le secteur des *data centers* comme un segment économique à attirer pour consolider son positionnement dans le secteur numérique, en se présentant d'ailleurs comme une alternative meilleur marché et moins risquée que la Californie (séismes, sécheresse). La ville, via son service de développement économique, a d'ailleurs été très offensive, dans de multiples salons internationaux, pour vanter les mérites de son territoire en termes de connectivité, de foncier et d'environnement économique.⁶⁹

Les services techniques d'Hillsboro jouent ainsi un rôle de médiateur et facilitent toutes les démarches d'installation, de développement, de mise en relation, de coordination avec les compagnies électriques, de réseau, l'Etat, la Metro pour l'installation de *data centers*, qu'ils soient de colocation ou dédiés à des entreprises. La ville a par ailleurs créé un groupe de travail dédié avec les opérateurs de *data centers*, afin d'échanger plus largement sur les projets de construction de postes source par PGE (Portland General Electric), sur les relations avec la métropole de Portland, sur les questions de fiscalité avec l'Etat de l'Oregon.

Paris Saclay, l'énergie comme point d'entrée

La particularité du territoire de Paris Saclay est d'avoir une gouvernance à plusieurs niveaux avec l'EPCI Paris Saclay d'une part, qui ne recouvre pas le territoire de l'Opération d'Intérêt National (OIN) menée par l'Etablissement public Paris Saclay, opérateur d'Etat, d'autre part.

Côté EPCI, une expertise relative a été construite car DATA 4 est présent sur le territoire, à Marcoussis, depuis maintenant 10 ans. Par ailleurs, via l'expertise Plan Climat et énergie, l'agglomération est consciente de cette problématique et souhaiterait pouvoir inclure les *data centers* dans la stratégie énergétique locale. Cependant, aucun lieu d'échange ou groupe de travail n'existe sur le sujet. Il semblerait que les projets ne soient traités actuellement qu'au cas par cas. Pourtant, l'EPCI a pris la compétence AODE récemment et devient ainsi autorité organisatrice de distribution électrique pour 13 des 27 communes de l'agglomération (le reste faisant partie du CIGEF). Par ailleurs, le PCAET est en cours pour 2018-2022, avec une vision prospective 2030-2050 dans laquelle la question des infrastructures numériques pourra être prise en compte.

Aujourd'hui, ici aussi, seul Enedis a une vision globale des consommations électriques réelles des *data centers* et des projets en attente, vision qui permettrait une planification croisée entre énergie et urbanisme si elle était partagée. Enedis souligne cependant que ces données sont confidentielles puisqu'elles concernent ses clients. Il faut aussi noter que les opérateurs de *data centers* ne transmettent pas ces données car d'une part, elles pourraient montrer à quel point la puissance demandée à Enedis est supérieure à leur consommation réelle, et d'autre part, leur consommation électrique pourrait donner à leurs concurrents une idée de leur taux de remplissage, pas toujours élevé, et donc de leur santé économique.

Un projet de recherche et développement, porté par l'IRT Systemic, incluant notamment l'EPCI, RTE, EDF, Enedis, GRDF, et Dalkia, vise à construire une plateforme de modélisation numérique pour mieux comprendre les consommations énergétiques du territoire, et pouvoir faire des projections. Ce projet vient cependant de commencer. Il pourrait constituer une avancée pour l'EPCI, un nouvel outil de pilotage et de planification énergétique et territoriale, mais il est encore trop tôt pour le dire. Ainsi, l'EPCI semble avancer plus largement sur une planification et une stratégie énergétique dans laquelle les *data centers* pourraient être intégrés. Par ailleurs, la proximité de la fibre (près des autoroutes) et des postes sources (loin des habitations), étant des facteurs d'implantation privilégiés par les *data centers*, la question de leur localisation sur des délaissés infrastructurels impropres à d'autres usages semble aussi représenter, pour l'EPCI, une opportunité pour une planification numérique de ces espaces interstitiels.

Côté établissement public d'aménagement Paris Saclay, l'angle d'attaque de la question *data centers* a d'abord été celle de l'intégration de leur chaleur fatale au réseau de chaleur urbain sur le Plateau, la question de l'intégration urbaine ou architecturale ne se posant pas car les *data centers* sont intégrés aux écoles, centre de recherches, entreprises. Dans la première phase du Réseau de Chaleur Urbain (RCU), utiliser cette chaleur fatale n'est pas pertinent car il y a suffisamment d'ENR avec la géothermie

⁶⁹ Entretien avec Mark Clemons, directeur du développement économique de la ville d'Hillsboro.

(Albien). La question devra être repoussée dans une seconde phase. Il faut noter, qu'à l'image du fonctionnement autarcique au niveau académique de certaines grandes écoles ou centres de recherche, la question de la mutualisation d'infrastructures numériques ou énergétiques liées aux *data centers* ne semble pas mûre.

3.3 Des collectivités locales face à l'opacité

Prineville, Umatilla, Boardman : le pot de fer contre le pot de terre ?

Si les *data centers* sont souvent venus remplacer les fonderies d'aluminium et les scieries, qui avaient aussi besoin de grandes puissances électriques, les puissances consommées par les *data centers* sont bien plus élevées et les déséquilibres potentiels sur les territoires plus importants.

Le secret qui entoure l'implantation des *data centers*, comme on peut le voir pour Prineville, mais plus largement pour de très nombreux territoires, se rapproche davantage de celui qui concerne d'habitude des implantations militaires ou secret défense. Comment maîtriser le développement et la planification de son territoire dans ces conditions ?

Ce déséquilibre en termes d'information ne permet pas aux collectivités d'anticiper suffisamment un positionnement sur la question des *data centers*, de consolider une expertise sur le sujet, sur des alternatives en termes d'implantations urbaine, architecturale, d'intégration énergétique par exemple. Ceci est d'autant plus vrai dans des territoires ruraux comme Prineville ou Umatilla, où d'une part les services techniques ne sont pas nécessairement outillés sur ces sujets, où le poids politique ou démographique des territoires n'est pas de nature à contrebalancer le pouvoir des GAFAM en particulier, et enfin, où la situation économique souvent très difficile de l'emploi pousse à privilégier la création d'emplois, même minime, sur les questions urbaines, énergétiques, environnementales ou économiques de long terme.

Plaine Commune, un développement rapide et non-coordonné

Sur le territoire de Plaine Commune, au nord de Paris, le premier *data center* est arrivé en 1999 (Interxion), puis, en une dizaine d'années, le territoire est devenu un hub numérique majeur pour les *data centers*. Ce nouvel immobilier d'entreprises, alors assez inconnu, s'est ainsi développé sur la plaine St Denis, et à La Courneuve notamment.

Le sujet n'est apparu comme stratégique et questionnant qu'à partir de la publication de l'étude de l'ALEC en 2013, alors que de nombreuses implantations étaient déjà réalisées. Cependant, en l'absence d'un portage politique fort du sujet, d'une alliance entre communes concernées et agglomération, de la construction d'une expertise sur les *data centers*, il n'existe pas d'instance ou de stratégie en la matière. Les conclusions de l'étude de l'ALEC n'ont donc pas été suivies d'actes, notamment en matière de récupération de chaleur.

La plupart des implantations font bien sûr l'objet d'une autorisation ICPE délivrée par l'Etat, mais cela ne constitue pas un levier pour de véritables négociations. Par ailleurs, seul Enedis (mais ni les communes ni l'agglomération) dispose d'une vision de consommations électriques réelles des *data centers*, et des puissances réservées ou en file d'attente. Ceci constitue ici, comme dans le territoire élargi de Paris Saclay d'ailleurs, une grande difficulté pour traiter les projets et les autorisations d'urbanisme, avec une vision globale.

Le cas d'Eurocopter développé plus haut illustre enfin la difficulté pour l'agglomération et la commune de travailler de manière partenariale avec un acteur dominant du marché, et tenter ainsi de concilier développement économique et numérique, avec un besoin de construction de logements et la recherche d'une plus grande urbanité pour un quartier aux espaces publics dégradés et hostiles aux piétons, pourtant nombreux.

3.4 Opérateurs énergétiques et télécoms : dépendances et disruptions

Le marché de l'énergie américain et l'histoire de sa dérégulation varie d'un état à l'autre et présente de fortes différences avec la situation française, on note toutefois des deux côtés de l'Atlantique des caractéristiques communes au regard des impératifs de transition énergétique et des résistances des compagnies électriques historiques (*utilities*) qui voient leurs marchés bousculés et leurs activités se transformer en profondeur. Aux Etats-Unis, d'une façon générale, l'état des réseaux électriques de distribution est de moins bonne qualité qu'en France où le monopole RTE et Enedis a permis des investissements très lourds dans l'infrastructure.

Dans les trois terrains américains retenus, les territoires énergétiques sont certes spécifiques mais la production d'Enr en importante quantité est une constante.

- En Californie dans la Silicon valley où malgré les prix chers de l'électricité (sauf à Santa Clara) les *data centers* sont très nombreux et participent au développement des énergies renouvelables (27% de la production d'électricité).
- Dans l'Oregon, territoire servant de la Californie qui a accueilli le premier grand *data center* de Google en 2006, le climat est plus frais et l'électricité moins chère grâce aux barrages hydrauliques de la Columbia River et où il y a de forte opportunités foncières (71% de la production d'électricité de l'Oregon sont générés par des centrales hydroélectriques classiques et d'autres ressources énergétiques renouvelables.)
- Dans l'état de New York, c'est la ville de New York qui a retenu notre attention pour sa densité urbaine et la progressive transformation des bâtiments emblématiques des télécom en *data center*, dans un contexte post Sandy qui a favorisé des politiques de résilience énergétique très fortes, notamment en termes d'Enr et de micro réseau. (23% de la production d'électricité de l'état de New York est renouvelable).

Le numérique à l'assaut des vieilles utilities

D'immense quantité d'énergie consommée.

Aux Etats-Unis, en 2014, les *data centers* consomment environ 70 TWh, ce qui représente 1.8% de la consommation totale d'électricité du pays. Leur consommation a augmenté de 4% entre 2010 et 2014⁷⁰. En Californie et dans l'Oregon, les *data centers* sont des clients parfaits pour les compagnies électriques : pas de pic à gérer, une importante consommation stable jour et nuit, toute l'année, et en croissance. Alors que les programmes d'efficacité énergétique commencent à porter leurs fruits, que les consommations des ménages baissent, et qu'il est difficile de financer de nouvelles infrastructures de production et de transmission électrique, le numérique est une aubaine qui se compte en mégawatts (et donc en dollars) pour les vieilles « utilities » américaines qui font face à de plus en plus de concurrence, notamment en termes d'offre de production. A Prineville avec l'arrivée des infrastructures de stockage de Facebook et d'Apple, la consommation électrique est passée de 10 MW à 500 MW.

En France, les *data centers* consommaient, en 2015, 2% de l'électricité selon l'association Négawatt, soit 10 TWh (et 9% pour le secteur numérique dans sa totalité). Les villes de Saint-Denis et d'Aubervilliers, sur la Plaine, avec respectivement 5 et 8 *data centers* recensés, totalisent par exemple une puissance disponible totale de l'ordre de 150 MW. Il s'agit pour la plupart de grands *data centers* avec de fortes consommations énergétiques, pouvant aller jusqu'à 60 MW pour le futur *data center* de l'opérateur Interxion à La Courneuve.

⁷⁰ Shehabi Arman, Josephine Sarah, Sartor Dale A, Brown Richard E, Herrlin Magnus, G Koomey Jonathan, Masanet Eric R, Nathaniel Horner, Inês Lima Azevedo, William Lintner, 2016, *op.cit.*

Les GAFAM exercent une pression sur les compagnies électriques historiques

Pour Gary Cook de GreenPeace, auteur du rapport *Clicking Clean*⁷¹, si les GAFAM font des efforts en matière d'utilisation d'ENR, notamment en affichant des engagements à être approvisionnés par 100% d'énergies renouvelables, il y a encore beaucoup de chemin à faire car cette énergie n'est pas locale, ni additionnelle, ni réellement utilisée par leurs *data centers* : elle est en partie achetée aux compagnies électriques grâce à des certificats (RECS aux Etats-Unis ou GO en Europe). Les GAFAM sont de plus en plus regardants et exigeants et vont jusqu'à forcer la transition énergétique de certaines vieilles *utilities* au mix très carboné... C'est notamment le cas dans certains États américains où le foncier est peu cher et le mix énergétique très fossile (avec les centrales à charbon dont le lobby industriel reste puissant). Dans le Wyoming, Microsoft a fait acheter à la compagnie historique locale plus de 230 MW d'électricité éolienne. En Virginie, Microsoft avait négocié un accord avec Dominion Virginia Power et le gouvernement de l'État pour réclamer la production d'une centrale solaire de 20 MW. L'entreprise fait de même en Europe où elle vient de signer un contrat pour réserver la totalité de la production électrique d'un parc éolien de General Electric, tout juste mis en service dans le comté de Kerry au sud-ouest de l'Irlande. Cet achat vise à verdir le mix énergétique de son grand *data center* à l'ouest de Dublin dédié aux services *Cloud* pour toute sa clientèle d'entreprises européennes. En revanche, le dernier rapport (2019) *Clicking Clean* cible tout particulièrement le leader du cloud, Amazon Web Services, dont tous les nouveaux *data centers* construits dans le cluster d'Ashburn, près de Washington DC, sont approvisionnés au charbon. L'auteur souligne ainsi que la croissance exceptionnelle des *data centers* sur ce vaste site justifie, pour Dominion, la compagnie électrique locale, de soutenir le développement du *Atlantic Coast pipeline* dont les effets environnementaux sont estimés dévastateurs sur les montagnes Appalaches et les émissions de CO2 et pollutions.

De nouveaux producteurs d'ENR

Sur la côte ouest, les GAFAM semblent ainsi exercer une forte pression sur le système énergétique vers l'utilisation d'ENR, et voudraient mettre un terme aux monopoles des compagnies électriques qui leur paraît être un blocage pour atteindre cet objectif, celles-ci voulant d'abord rentabiliser leurs installations actuelles, avant d'investir dans de nouvelles, plus propres. Apple a ainsi créé sa filiale *Apple Energy* qui lui permet d'écouler le surplus d'énergie produit par quatre de ses installations américaines, dont le parc éolien Newark en Californie. Ces productions d'énergies renouvelables (solaire, hydraulique, éolien et piles à combustible au biogaz) permettent à l'entreprise d'afficher : « 100 % d'énergie renouvelable pour 100 % de ces installations »⁷², notamment pour ses *data centers*. Dans l'Oregon Apple a racheté le barrage hydroélectrique 45-Mile pour alimenter son *data center* de Prineville. Certains GAFAM envisagent également de plus en plus de développer leur autonomie énergétique et leurs propres infrastructures de production sur site ou à proximité.

Des velléités d'autonomie

En France, la faible présence des GAFAM limite une forme de concurrence sur le marché de l'électricité par ailleurs verrouillé par le monopole d'Enedis pour la distribution. Toutefois les moyens capitalistiques des grands opérateurs de *data centers* de colocation leur permettent d'investir dans la construction d'infrastructures électriques et de réseaux de fibre noire. Ils se substituent alors d'une certaine façon aux opérateurs historiques de distribution d'électricité et de télécom.

La construction de postes sources ou la haute tension à la source

Les grands *data centers* suivent la géographie des postes de transmissions et réservent d'importante quantité d'électricité. Pour la distribution, ils ont trois options. La première est de se placer près des postes de transformation existants. La deuxième est de demander à Enedis d'en construire de nouveaux. La troisième est de les construire eux-mêmes. En Ile-de-France, pour Enedis les projets de *data centers* connus correspondent à un doublement de la capacité réseau du nord de Paris sur les 5 prochaines années. Pour les industriels de *data centers*, il y a un fort enjeu autour de la distribution (c'est-à-dire le moment où le niveau de la tension est abaissé de 250 000 V à 20 000 V). L'accès à un poste source est un élément majeur du business model de ces industriels. Historiquement la durée de construction d'un poste source par Enedis était de 5 ans à 7 ans, l'industrie des *data centers* essaye de faire pression pour la baisser à 3 ans et parfois n'hésitent pas à contourner Enedis pour passer directement par RTE, lorsque la puissance des bâtiments dépasse 50 MW (seuil réglementaire à partir

⁷¹ <http://www.greenpeace.org/usa/global-warming/click-clean/>

⁷² <https://www.apple.com/fr/environment/climate-change/>

duquel c'est possible). Ils vont ainsi directement se brancher sur une ligne à haute-tension RTE. C'est donc un nouveau critère de localisation qui apparaît. C'est notamment le cas d'Interxion. Ainsi, Fabrice Coquio, président du groupe France affirme : « On a déjà commencé à Francfort où on a fait un poste source de 100 MW et on est en train d'en construire un à Stockholm. Je dépose un permis bientôt à Marseille parce que j'ai raflé tout ce qu'il restait : 90 MW, il n'y a plus rien. (...) Il faut être un sacré expert en gestion de l'énergie et en gestion de l'infrastructure pour savoir travailler un poste source et il faut avoir les moyens. Pour 73 MW à Francfort c'est 25 millions d'euros. Ça va tout de suite clairsemer les rangs de qui peut faire quoi⁷³. »

Par ailleurs, les *data centers* doivent désormais payer à 100% le raccordement au poste source alors que précédemment c'est Enedis qui en avait la charge.

Même situation aux Etats-Unis, *Sabey data center* a fortement investi dans de l'infrastructure hors site pour son site Intergate Manhattan, avec la construction de 4 sous-stations électriques (25 millions \$), ce qui lui assure un prix de l'énergie plus bas sur le long terme (actuellement 14 cents le kW/h⁷⁴). Sabey passe par une ESCO⁷⁵ pour acheter l'énergie : *Constellation Energy* et ne paie que la distribution à ConEd. La puissance maximale disponible est 40 MW, mais ce sont actuellement 18 MW qui sont consommés. L'entreprise ne se positionne pas sur les ENR.

Infrastructure télécom : PoP et fibre noire

Des acteurs comme Interxion ou Equinix créent aussi leurs propres infrastructures télécom pour se substituer aux opérateurs qui n'ont, selon eux, plus de fonds pour le faire. « Quand vous êtes un opérateur télécom, pour faire un trou dans un trottoir pour aller rejoindre un *data center* c'est 1000€ du mètre. Ensuite, pour mettre un PoP, c'est-à-dire un point de présence, un élément de télécom actif pour livrer des services, c'est un investissement entre 500 000 et 1.700.000 €. Forcément avec des prix qui baissent de 30% par an vous vous posez la question du nombre de mètres que vous avez à faire. Si vous avez 30km de réseaux à créer, ce qui pourtant à l'échelle d'un pays est rien, vous ne le faites pas.⁷⁶ » Ainsi Interxion construit des capacités considérables qui sont revendues à SFR, Orange etc. Il y a un jeu de substitution qui se crée entre les opérateurs historiques et les opérateurs de *data centers* qui sans avoir de licences d'infrastructures peuvent les installer puisqu'il s'agit de relier des bâtiments appartenant à un même opérateur de *data center*.

L'organisation du territoire et du réseau bousculée

Appropriation énergétique au-delà des besoins réels

Pour Brigitte Loubet, conseillère spéciale chaleur de la DRIEE, comme pour Fabienne Dupuy adjointe au Directeur territorial Enedis en Seine-Saint-Denis, les demandes des *data centers* peuvent être bloquantes pour les territoires. La commande d'électricité se résumant à : premier arrivé / premier servi, des files d'attente se constituent sur différents sites. La puissance réservée (60 MW pendant 5 ans, 10 ans) est bloquante pour d'autres clients alors même que cette puissance correspond à une hypothèse de consommation maximaliste (lorsque le *data center* sera plein, ce qui met parfois plusieurs années). L'étude de l'Alec interpelait déjà sur ce sujet en 2013. C'est l'exemple de Marseille, où le maire Jean-Claude Gaudin a dû négocier avec Interxion pour récupérer 7 MW « parce qu'ils avaient oublié de les réserver pour leurs bus électriques⁷⁷ ».

André Rouyer, Délégué des Infrastructures du Numérique au Gimelec, attire l'attention sur le risque de surenchère et rappelle que le marché de la colocation perturbe la lisibilité et les calculs et participe à cette mystification, les *data centers* de colocation sont chargée en moyenne à 30/40%, certains à moins de 20% et la colocation c'est 30% du marché. « On a construit les *data centers* mais ce qui se passe dans ces métiers là c'est un peu la fuite avant. Ils disent on veut construire un *data center* parce qu'on veut des clients, donc s'il n'y a pas d'espaces il n'y a pas de clients. Si vous allez à Saint-Denis visiter les *data centers* de colocation, ils sont très loin d'être plein. Ça tourne mais quand on voit les charges, ils ont tous besoin de clients⁷⁸. »

⁷³ Entretien avec Fabrice Coquio, président d'Interxion groupe France, Paris.

⁷⁴ Contre par exemple 22 cents le kW/h par 365 data centers, localisé aussi à Manhattan (entretien avec Jim Grady, janvier 2018)

⁷⁵ ESCO : Energy service company

⁷⁶ Entretien avec Fabrice Coquio (*idem*)

⁷⁷ *Idem*.

⁷⁸ Entretien avec André Rouyer, Délégué des Infrastructures du Numérique, Gimelec, Paris.

L'aménageur et la collectivité mis à contribution

Les territoires sont d'autant plus bousculés qu'ils doivent maintenant participer à l'investissement dans les infrastructures électriques. En effet, la loi relative à la Solidarité et au Renouvellement Urbain (SRU) a modifié les conditions d'investissements dans les infrastructures électriques, pour tout le transport d'électricité. L'aménageur et la collectivité doivent participer financièrement, alors qu'avant EDF se faisait fort de structurer son réseau et de le renforcer.

Des exigences plus fortes des pouvoirs publics ?

Comment pousser les *data centers* à jouer plus collectif ? Est-ce que la collectivité, Enedis, voire RTE, pourraient au nom de l'intérêt général les contraindre et imposer des emplacements d'installation, comme c'est le cas de la ville de Stockholm ? La *Stockholm Data Parks initiative* oblige en effet les *data centers* à s'installer dans des campus où la chaleur doit être réutilisée. Ce programme a été lancé en partenariat avec l'opérateur de refroidissement et de chauffage urbain Exergi, l'opérateur électrique Ellevio et celui de fibre noire Stokab. Cette expérimentation et l'engagement de la ville de Stockholm nous semble relativement unique (elle est développée plus loin dans le présent rapport).

Comme le rappelle David Rinard, directeur développement durable d'Equinix⁷⁹, que ce soit aux Etats-Unis ou en France, tout gain d'efficacité énergétique et toute nouvelle capacité en ENR captée permet avant tout de consommer plus, et à un prix plus stable. C'est l'effet rebond ou autrement appelé le paradoxe de Jevons. A mesure que les améliorations technologiques augmentent l'efficacité avec laquelle une ressource est employée, la consommation totale de cette ressource peut augmenter au lieu de diminuer. En d'autres termes, l'utilisation de technologies plus efficaces en matière d'énergie et moins émettrice de CO₂, ne garantit pas une baisse de la consommation totale de l'énergie, au contraire. L'industrie des *data centers* illustre bien ce paradoxe comme nous l'avons montré dans la première partie de ce rapport.

3.5 Gouvernance collective : des structures pour avancer vers une meilleure intégration des *data centers*

Aux Etats-Unis, des lobbys classiques et des structures axées énergie

Les centres de données de colocation s'inscrivent prudemment dans la dynamique de transition énergétique, en trouvant un équilibre entre une énergie à bas coût et le souhait de verdir leur image. En effet, leurs clients sont variés et nombreux, et n'exercent pas une forte pression pour se tourner davantage vers les énergies renouvelables. En revanche, les grands acteurs du numérique sont souvent beaucoup plus exigeants, pour leurs propres *data centers*, mais aussi pour ceux qui hébergent les localisations métropolitaines de leurs *Clouds* : les *data centers* de colocation.

Certains comme Facebook, Autodesk et Salesforce se rassemblent dans des organisations comme BSR (Business Social Responsibility), à travers son programme « The future of Internet Power », pour faire pression sur les *data centers* de colocation pour aller vers plus d'énergies renouvelables et de transparence⁸⁰.

D'autres appartiennent à REBA, la Renewable Energy Buyers Alliance, alliance des acheteurs d'énergies renouvelables, qui travaillent sur des tarifs et des offres, en lien avec les acteurs de l'énergie. Les plus connus, Google, Facebook, Microsoft, négocient en direct avec les compagnies électriques où ils s'installent pour obtenir le mix énergétique souhaité, et respecter leurs engagements en matière d'énergies renouvelables. Google a ainsi annoncé fin 2017 être parvenu à consommer 100% d'ENR sur l'année.

L'organisation 7x24 Exchange a été créée en 1989 pour instaurer un dialogue entre les acteurs de l'informatique et ceux des *data centers*. Elle rassemble aujourd'hui les acteurs des *data centers* (concepteurs, constructeur, gestionnaires...), pour échanger sur des problématiques communes mais aussi aborder les questions de responsabilité sociale et environnementale. Une conférence est

⁷⁹ Entretien avec David Rinard directeur développement durable d'Equinix, San José.

⁸⁰ Entretien avec Michael Rohwer, BSR, octobre 2017.

organisée chaque année autour de thèmes souvent très techniques. L'impact énergétique du numérique n'est pas au cœur de son action⁸¹.

Enfin, plus localement, le Silicon Valley Leadership Group, créé en 1977 par des entrepreneurs de la Silicon Valley pour la vitalité économique et la qualité de vie du territoire, avait initialement 3 objectifs :

- réduire la congestion automobile,
- améliorer les opportunités en termes de logement,
- promouvoir une stratégie énergétique (d'abord sous l'angle de la pollution de l'air).

Elle a désormais 8 axes de travail et 365 compagnies membres, dont les GAFAM et des opérateurs de *data centers*. L'association se positionne publiquement pour un approvisionnement 100% ENR et en accord avec les objectifs de la COP 21 de Paris.

Concernant le groupe de travail Energie, elle a 3 axes de travail pour 2018-2020 :

- un approvisionnement énergétique propre,
- la modernisation et la fiabilisation du réseau de gaz et d'électricité ; le développement des énergies décentralisées,
- les solutions côté demande : efficacité énergétique, effacement.

En France, des lobbys électriques et numériques

En France, trois associations portent les intérêts des *data centers* : France Data Center, le GIMELEC, l'AGIT.

France *Data center*, qui a pris la succession du CESIT (Club des Exploitants de salles informatiques et télécom) en 2016, a pour but de fédérer tous les acteurs, pour agir de concert avec le GIMELEC et l'AGIT, et défendre les intérêts des acteurs des *data centers*. Il rassemble une centaine d'opérateurs de *data centers*. Après avoir été surtout un organisme centré sur la performance interne du secteur, la diffusion de bonnes pratiques, FDC souhaite également valoriser davantage les *data centers* comme une infrastructure numérique stratégique, améliorer leur image, et agir comme un lobby sur les questions énergétiques et fiscales notamment.

Le GIMELEC, groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle/commande et des services associés, est un syndicat d'entreprises. Un de ses groupes de travail concerne les infrastructures du numérique, l'alimentation sécurisée et la performance énergétique. Dans ce cadre le Gimelec participe aux travaux sur le Code de Conduite Européen des *data centers*. André Rouyer, pilote de ce groupe de travail, souligne qu'il y a urgence à reconnaître l'importance des *data centers* dans le fonctionnement du numérique en général, à les considérer comme une infrastructure stratégique.

L'AGIT, Alliance Green IT promeut le Green for IT, autrement dit un secteur numérique à l'impact environnemental moins lourd (performance énergétique, écoconception des logiciels, recyclage...). Elle a publié en 2015 et 2017 un Baromètre des pratiques Green IT, dont une des rubriques concerne les *data centers*. Elle organise par ailleurs des événements, formations et participe à des publications sur le sujet, comme l'étude Enercert /ATEE sur l'efficacité énergétique des *data centers*, citée plus haut.

On ne trouve pas en France d'associations ou de structures rassemblant énergéticiens, collectivités locales et opérateurs de *data centers*, qu'elles soient locales ou nationales.

Plusieurs points paraissent centraux pour garantir une meilleure compréhension des acteurs entre eux et pour envisager des approches moins sectorielles. Mais un certain nombre de freins bloquent aujourd'hui non seulement la compréhension mais plus largement la possibilité de mutualisations ou de projet commun entre les opérateurs de *data centers* et les collectivités.

- L'opacité et le manque d'informations ne permet pas d'anticiper, ni de planifier pour une meilleure coordination d'un projet de territoire qu'il soit urbain ou énergétique. La convergence des intérêts des acteurs se pose. La rentabilité financière d'une opération immobilière pour des opérateurs comme Equinix ou Interxion échappe à la notion même d'intérêt général portée par les collectivités.

⁸¹ Entretien avec David Schirmacher, Président de 7 by 24, New York.

4. Les *data centers*, nouvelle pièce du puzzle énergétique

4.1 Des réserves infrastructurelles inédites

Les *data centers* sont des bâtiments-machines qui contiennent des systèmes de secours et une impressionnante redondance infrastructurelle. En vue de pas être fragilisés par d'éventuelles coupures électriques qui pourraient toucher le réseau et impacter le stockage, les *data centers* ont généralement deux arrivées électriques et des systèmes de secours (générateurs et batteries) qui leur permettent une continuité de service en mode « autonome » pendant 24h au moins, mais le plus souvent 48 ou 72h. Ces réserves de sécurité sont exceptionnellement mobilisées, en moyenne une fois tous les 5 ans pour des durées très courtes, de quelques minutes à quelques heures en fonction des territoires.

Si le risque associé à des catastrophes varie en fonction des régions, tous les *data centers* sont extrêmement soucieux de garantir à leurs clients une autonomie énergétique en cas de problèmes, c'est un argument de vente central. Les coupures de plusieurs heures restent exceptionnelles, à l'exemple de l'ouragan Sandy qui a plongé dans le noir 1/3 de la population New-Yorkaise et a mis 50% des *data centers* hors de fonctionnement ; les systèmes de secours ont permis dans certains cas d'assurer la continuité de service.

Cet équipement infrastructurel impacte lourdement l'organisation spatiale puisque les salles de stockage informatique sont doublées d'espaces de réserve infrastructurelle dans des espaces attenants aux salles, au même niveau, mais aussi parfois en sous-sol, dans les étages ou sur les toits.

- **111 8th avenue, 32 avenue of Americas et 60 Hudson Street**

Les toits de ces bâtiments sont des excroissances vertigineuses, comprenant des générateurs de secours au diesel, des tours de refroidissement d'eau pour l'air conditionné, des antennes satellites de toutes tailles et formes, des réservoirs d'eau en cas de coupure, des grues pour faire monter les générateurs diesel depuis la rue... Leurs sous-sols sont bardés de câbles, équipés de réservoirs de fioul de plusieurs centaines de milliers de litres pour approvisionner les générateurs en cas d'arrêt du réseau électrique de ConEdison, la compagnie électrique desservant majoritairement la ville.

Le 111 8th avenue est l'ancien siège de l'autorité portuaire. Quatrième plus grand bâtiment en surface de New York, racheté en 2010 par Google pour 1,9 milliards de dollars, c'est notamment ses spécificités infrastructurelles qui ont intéressé le géant du web.

- Les réserves de fuel de 600 000 litres assurent la résilience en cas de coupure électrique. Google et son gestionnaire de service Taconic ont fait une étude de faisabilité pour une centrale de cogénération au gaz, mais n'ont pas retenu cette option. Ils étudient aujourd'hui la possibilité de recycler les déchets organiques produits dans le bâtiment pour en faire de l'énergie et utiliser du biogaz ou méthane comme énergie primaire pour remplacer les générateurs au fioul.
- Stockage thermique : l'eau est refroidie la nuit dans des citernes quand l'électricité est peu chère et est restituée en journée pour la climatisation des *data centers* (voir photo).



Figure 24. Toiture du 111 8th avenue Crédit =©Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.



Figure 25. Intérieur du 111 8th avenue. Avec cuve de fioul et stockage thermique. Crédit =©Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.

- **Sabey data center**, présente des caractéristiques similaires. Le bâtiment est doté de réserves d'un million de litres d'eau au rez-de-chaussée, et d'un stockage d'essence de 700 000 litres (soit une autonomie à pleine charge, de 72 heures).

Cette redondance infrastructurelle pose en premier lieu la question de l'optimisation des ressources et des systèmes sur site. Par exemple, en lieu et place des milliers de litres de fioul stockés pour les générateurs de secours, la co ou tri-génération gaz ou biogaz apparaît de plus en plus comme un dispositif de secours alternatif, et pourrait être une option moins polluante et moins risquée. C'est notamment le cas du bâtiment du New York Times à New York dont le *data center* a pour système de secours une centrale de cogénération gaz, c'est également le cas pour le *data center* de Citybank à Londres. Il y a d'autres exemples de ce type en Europe. En France, GRDF essaye fortement de développer ce marché mais les opérateurs de *data centers* restent conservateurs et réticents à changer

un système qu'ils maîtrisent parfaitement. C'est également un soutien politique à cette source qui fait défaut comme le souligne Guillaume Planchot de la société énergétique IDEX : "Aujourd'hui la cogénération en France, avec peut-être l'autoconsommation, seraient hyper pertinentes vis-à-vis des *data centers*, voire peut-être la tri-génération. On a eu jusqu'à 5000MW de cogénération installées en France, l'heure de gloire ça doit être 2005/2007. C'est quand même 5 tranches nucléaires. Mais je crois qu'on en a démonté plus de 3000 depuis qu'il n'y a plus de tarifs d'achats, ils se sont largement dégradés, la filière n'a pas été soutenue. »⁸². Les piles à combustible sont également une alternative, certains *data centers* des Big Tech en sont équipés.

Cette redondance infrastructurelle est aussi une piste pour la mutualisation qui permettrait peut-être de compenser l'impact de leur consommation électrique, mais les échanges avec le territoire et l'équilibre technique et financier restent complexes à trouver. La difficile récupération de chaleur témoigne de ce phénomène.

4.2 La difficile récupération de chaleur

En 2012, dans les travaux préparatoires au SRCAE, la DRIEE avait identifié les enjeux importants liés à la récupération de chaleur des *data centers* dont la température en moyenne est autour de 40-50°C, soit une ressource dite "Basse Température" (<60°C). L'ALEC avait aussi formulé une recommandation pour approfondir ce sujet qui s'est en partie concrétisée avec l'étude ADEME sur la chaleur fatale⁸³. Dans cette dernière étude, les auteur.e.s estiment que le gisement maximal total de chaleur fatale des *data centers* en Île-de-France s'élève à 490 GWh (concentré sur Aubervilliers) sur les 26 500 GWh analysés⁸⁴. Mais cette estimation est à prendre avec prudence car elle a été réalisée seulement à partir d'informations transmises par les opérateurs de *data centers* ayant bien voulu répondre au questionnaire.

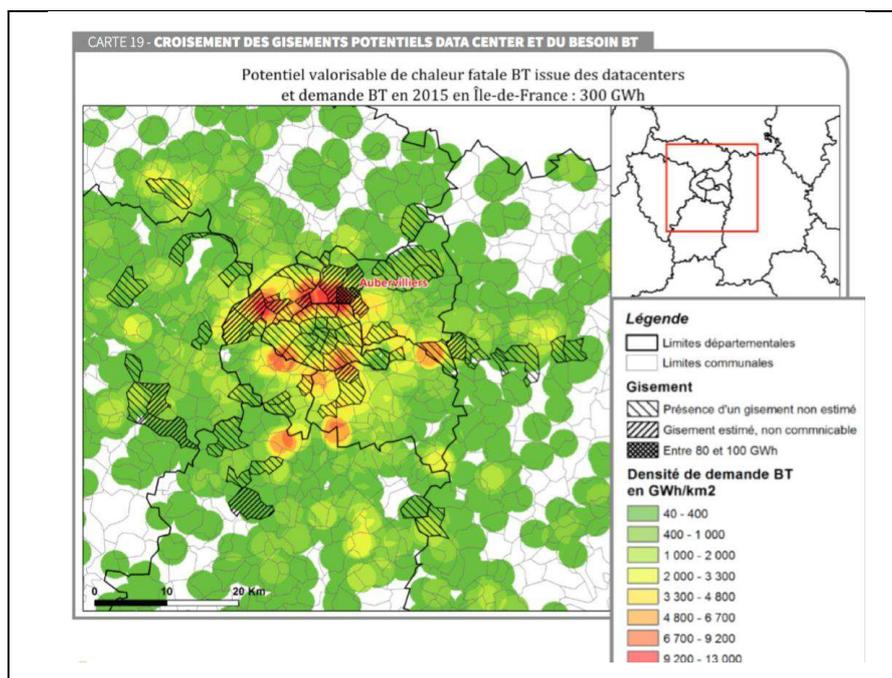


Figure 26. Carte de l'étude Ademe 2017 sur la récupération de chaleur fatale, p 39.

⁸² Entretien avec Guillaume Planchot, Directeur du développement réseaux de chaleur et de froid IDEX, Paris.

⁸³ <http://www.ademe.fr/etude-potentiels-production-valorisation-chaleur-fatale-ile-france>

⁸⁴ *Ibidem* p. 23. « Le gisement maximal de la chaleur fatale en Île de France, pour les périmètres des eaux usées, de la chaleur fatale industrielle, des UIDND et des Data Center, est estimé à environ 26 500 GWh, soit 22% de la demande en combustibles des secteurs résidentiel, tertiaire et industriel franciliens ».

Des potentialités multiples mais une réalité opérationnelle bloquante pour les réseaux de chaleur

L'intégration de la chaleur dans les réseaux de chauffage urbain intéresse les gestionnaires type CPCU (Compagnie Parisienne de Chaleur Urbaine) car cela ne mobilise pas leur dépenses d'investissement de capital (CAPEX), toutefois la mise en œuvre est difficile. Parmi les freins techniques, l'étude souligne la « non pérennité de la ressource », c'est-à-dire que l'augmentation de la performance pourraient engendrer une baisse de la chaleur fatale émise. Au regard des entretiens que nous avons menés, deux paramètres semblent bloquants et expliquent que la récupération de chaleur fatale des *data centers* soit restée au point mort.

- Frein économique : les modèles de rentabilité économique et les intérêts divergent. Pour les promoteurs de *data centers* un investissement dans un projet de réseau de chaleur n'est pas intéressant en termes de rentabilité économique. En effet, le monde de la promotion immobilière des *data centers* de colocation engagent des ROI sur des périodes très courtes entre 2 et 5 ans pour des clients qui sont souvent en dehors du territoire potentiellement desservi par le réseau de chaleur à l'étude. Pour les réseaux de chaleur, la contractualisation contraint à des engagements sur des durées de 25 / 30 ans, voire 50 ans. Les temporalités de projets ne correspondent pas.
- Frein technique : il est préférable d'envisager la récupération de chaleur au moment de la construction du *data center* car l'intervention et les travaux sur de l'existant peuvent perturber son fonctionnement. C'est également le coût des systèmes existants à changer et des réglages techniques qui peut être rédhibitoire. L'opportunité pour une construction neuve ou une rénovation semble plus pertinente, même si la distance raccordable et la température nécessaire doivent être finement étudiées (les réseaux de chaleur en Île-de-France ont des températures généralement comprises entre 60° et 110°C). Pour la connexion à des bâtiments neufs, il faut également évaluer la pertinence d'un tel raccordement et les coûts associés car avec les standards de RT 2012 (et les prochains à venir), les besoins de température sont moins élevés. A noter par ailleurs que le monde des *data centers* est engagé dans une réduction drastique pour maîtriser l'énergie en interne à l'échelle du bâtiment (important investissement sur l'efficacité logiciel, le *hardware*, le *free cooling*, etc). Ces méthodes de réduction de consommation électrique (notamment par le *free cooling*) empêchent aussi de récupérer un maximum d'énergie⁸⁵. Il y a une dimension concurrentielle dans ce choix, le marché des *data centers* neufs cherchent à atteindre un PUE le plus bas possible.

De nombreuses études réalisées n'ont pas eu de suite :

- Une étude d'opportunité a été faite à Courbevoie en 2016 dans le cadre du projet urbain Village Delage afin d'étudier les possibilités de valorisation des ressources thermiques existantes. Cette étude ne se focalisait que sur le seul *data center* qui allait être relocalisé lors de la restructuration du quartier. L'avenir des deux autres *data centers*, notamment celui de SFR avec ses 12 000 m² d'hébergement, n'étant pas connu, la récupération de chaleur n'a pas été étudiée. La conclusion de cette étude est « qu'il est quasiment impossible de préfigurer de ce que sera un *data center* d'ici 10 ans » et que la récupération de chaleur n'est pas envisageable pour Courbevoie, qui dispose pourtant d'un réseau de chaleur urbain.
- Des études de faisabilités et des études techniques ont été réalisées à Clichy sur le *data center* de Global Switch. Le *data center* et Idex, qui gère le réseau de chaleur des villes de Clichy et de Levallois, n'ont pas réussi à se mettre d'accord sur la contractualisation, alors que les études techniques montraient que les conditions technico-économiques étaient présentes.
- L'architecte du *data center* d'Interxion à La Courneuve, rue Rateau, a mentionné l'existence d'études de faisabilité faites lors de de la conception du bâtiment. Elles sont restées sans suite.

⁸⁵ Feltin Gabrielle, Bouterin Bernard, Canehan Xavier, 2017, « Indicateurs pour un *datacenter* efficient ? Mesurer pour améliorer ! », JRES.

Des études sont en cours :

- **Chapelle International**

Une étude est en cours pour le futur quartier de « Chapelle International », qui sera livré en 2021. Il a été annoncé que ce nouveau quartier va accueillir la première boucle de chaleur autonome à Paris, pilotée par la CPCU (Compagnie parisienne de chauffage urbain) qui fournira l'énergie de Chapelle International depuis une chaufferie construite à la pointe sud de l'hôtel logistique. Le futur *data center* de la Ville de Paris qui sera installé dans la halle logistique, juste à côté de la future chaufferie, sera connecté au réseau de chaleur. Avec 50 % d'énergies renouvelables, tous les bâtiments du site seront alimentés en eau chaude (en circuit fermé). Le fonctionnement de la chaufferie est assuré par une centrale au biogaz.

- **Les réseaux de chaleur à Saclay : incertitude concernant l'intégration du *data center***

Aujourd'hui le raccordement des *data centers* au réseau de chaleur et de froid urbain n'est pas encore au stade opérationnel. La première raison est que l'infrastructure du réseau de chaleur et de froid est complexe, et n'est pas encore achevée. Les efforts sont donc concentrés sur le réseau « seul » dans un premier temps. Ensuite, le réseau montera en charge au fil des nouvelles constructions sur le plateau. Dans une première phase, le réseau tel que conçu aujourd'hui répond aux objectifs de performance énergétique fixés (>50% d'ENR&R, <100g de CO2 par kWh produit). Néanmoins, à moyen terme, le mix énergétique du réseau intégrera des énergies de récupération.

La dernière contrainte est qu'il reste à établir un cadre juridique pour le rachat de l'énergie à un tiers, ainsi qu'une tarification associée. Une phase d'étude détaillée est en cours pour un raccordement de réseau de chaleur à l'IDRIS, le supercalculateur de CNRS déjà implanté sur site. L'objectif à ce stade est un raccordement d'ici 3 ans.

Des boucles locales plus facilement mises en place

La récupération de chaleur pour les bureaux, logements ou des espaces logistiques dans une immédiate proximité est une échelle plus commune de réutilisation :

- A Bailly-Romainvilliers à Marne-la-Vallée, sur la ZAC du Prieuré, la chaleur récupérée des 10000 m² du *data center* de la banque Natixis permet de chauffer et d'alimenter en eau chaude sanitaire un centre aquatique et une pépinière d'entreprises de 1800m².
- C'est également le cas de Céleste, fournisseur d'accès Internet et opérateur d'un réseau national de fibres optiques, qui a fait construire en 2012 son *data center* par l'agence d'architecture Enia, à Noisy-Champs (77). La conception architecturale permet de refroidir ce *data center* haute-densité sans production d'eau glacée. 95% de l'année, c'est l'utilisation de l'air ambiant, le free-cooling qui le refroidit. La chaleur dégagée par les machines est utilisée pour chauffer les bureaux.
- Un autre exemple de récupération de chaleur est celui d'Iliad, à l'ancien siège du laboratoire central des Ponts et Chaussées dans le 15^{ème} arrondissement de Paris. Iliad installe un *data center* dans un ancien abri antiatomique laissé à l'abandon depuis 1991. La chaleur produite par ce *data center* ultra-sécurisé, dédié à l'archivage, sera récupérée pour chauffer des logements sociaux, au-dessus de l'abri antiatomique. Ce partenariat avec Paris Habitat, d'une durée de 10 ans, permettra de récupérer en hiver 250 kW pour le chauffage et 700 kW pour la production d'eau chaude sanitaire. Cela représentera pour les habitants une économie de 500€ par an sur les charges.
- Le *data center* appartenant à l'Université de Bourgogne est utilisé pour chauffer les bâtiments adjacents à l'aide du réseau de chaleur de l'université. Cela est rendu possible car la chaufferie alimentant le réseau de chaleur de l'université se situe dans un bâtiment adjacent au *data center*. 5% des besoins de chauffage de l'université sont ainsi récupérés, soit 400 kW.

Une autre façon d'utiliser la chaleur issue du calcul ou du stockage est de mettre le « *data center* en morceau » et de déplacer ses éléments. C'est le principe de chaudière numérique ou du chauffage Qarnot : le *data center* a éclaté et, en se rapprochant au plus près des besoins de chauffage, permet d'économiser sur la partie réseau.

- **Stimergy : la chaudière numérique**

La piscine de la Butte-aux-Cailles (Paris 13) est chauffée à 30% par six chaudières numériques (serveurs informatiques) de la société grenobloise Stimergy.

Les six chaudières installées ont permis des économies sur la facture de chauffage et sur le bilan carbone puisque 50 tonnes de CO2 sont économisées par an. Ces chaudières ont aussi été installées dans des bâtiments ou des éco-quartiers à Nantes et à Grenoble dans des logements sociaux et des logements étudiants, avec des économies de 40% sur la facture de chauffage. Les serveurs sont plongés dans un bain d'huile qui absorbe la chaleur produite et réchauffe le ballon d'eau chaude. Grâce à l'eau chauffée entre 45 et 50°, la chaudière numérique permet de couvrir 30 à 60% des besoins du bâtiment.



Figure 27. Chaudière numérique Stimergy installé dans un bâtiment à Échirolles AVEC L'OPAC 38, Stimergy. Crédit =© Stimergy, 2018.

- **Qarnot Computing : se chauffer avec du calcul**

Cette entreprise, née en 2010, est spécialisée dans le calcul distribué et la production de chaleur. L'objectif, comme avec Stimergy, est de déplacer la source de la chaleur, du *data center* au logement. Qarnot a déployé plus de 800 radiateurs numériques, les Q-Rad, dans des bâtiments comme les logements sociaux à Balard (Paris 15) ou la résidence Florestine à Bordeaux (en partenariat avec Gironde Habitat). Qarnot va alors vendre des capacités de calcul à ses clients. Les calculs seront faits directement dans les logements, permettant ainsi de chauffer à faible coût. Un autre atout vanté par Qarnot est l'aspect *smart-building* puisque chaque Q-Rad est équipé d'une interface qui permet suivre les consommations ou la qualité de l'air du bâtiment. Ce système permet de remplir pleinement les besoins de chauffages des habitants et la facture de chauffage est payée par les clients de la plateforme de calcul. Il s'agit d'une autre approche de la fonction calcul des *data centers*, permettant des applications de smart-building.



Figure 28. Chauffage Qarnot Computing installé à Bordeaux. Crédit =© Qarnot, 2018.

Au regard des difficultés rencontrées, il y a fort à parier que l'engagement dans un projet de territoire ne viendra pas d'un opérateur de la colocation, mais peut-être plus d'un *data center* d'entreprise plus implanté sur le territoire, à moins que des réglementations ne viennent obliger ces acteurs à jouer plus collectif pour l'intérêt général du territoire. A ce titre le *Stockholm Data Parks initiative* lancée par la ville de Stockholm en partenariat avec l'opérateur de refroidissement et de chauffage urbain Exergi, l'opérateur électrique Ellevio et celui de fibre noire Stokab est un engagement majeur en faveur d'une efficacité énergétique territoriale (voir focus plus loin).

4.3 Les data centers dans les smart grids et micro grids

De plus en plus de grands opérateurs de *data centers* s'engagent dans la production d'énergie et dans le développement de micro-réseaux privés. Si leur stratégie est peu lisible et reste totalement secrète, on peut se demander si certains GAFAM n'auraient pas l'ambition de devenir d'importants acteurs d'un marché de l'énergie plus décentralisé, et surtout si cette orientation bénéficiera aussi à la population. Entre velléité d'indépendance et de mutualisation, des projets de différentes natures coexistent.

L'îlot autonome ou la gated community énergétique-numérique.

L'engagement de Microsoft et de Facebook dans le programme *micro-grid*⁸⁶ est un signe révélateur de cet intérêt pour l'autonomie énergétique. Mais c'est pour l'instant à l'échelle de leur site qu'ils testent et mettent en place ce type d'infrastructure, qui s'apparente pour l'instant davantage à des *gated community* énergétique-numériques.

- Microsoft cofinance dans le Colorado depuis 2013 un parc de *data centers* dont l'ambition est de produire sur site une *micro-grid* et 200 MW électriques. La *micro-grid* fonctionnera le plus en autonomie possible grâce à une centrale de cogénération au gaz, une centrale photovoltaïque et des piles à combustible déployées sur le site. Cette installation permettra à des opérateurs de *data centers* de s'installer en se connectant au micro-réseau avec la possibilité d'une connexion au réseau électrique traditionnel pour complément ou en cas de souci sur la *micro-grid*. Ainsi, la hiérarchie du système électrique est inversée : les systèmes sur site sont la source première d'électricité pour le fonctionnement et le réseau traditionnel devient système de secours. La puissance capitaliste des GAFAM leur permet des expérimentations énergétiques que peu d'autres acteurs peuvent se permettre. Cette enclave énergétique *high tech* renvoie à une sorte de *gated community* énergétique-numérique au seul profit des industriels du secteur.

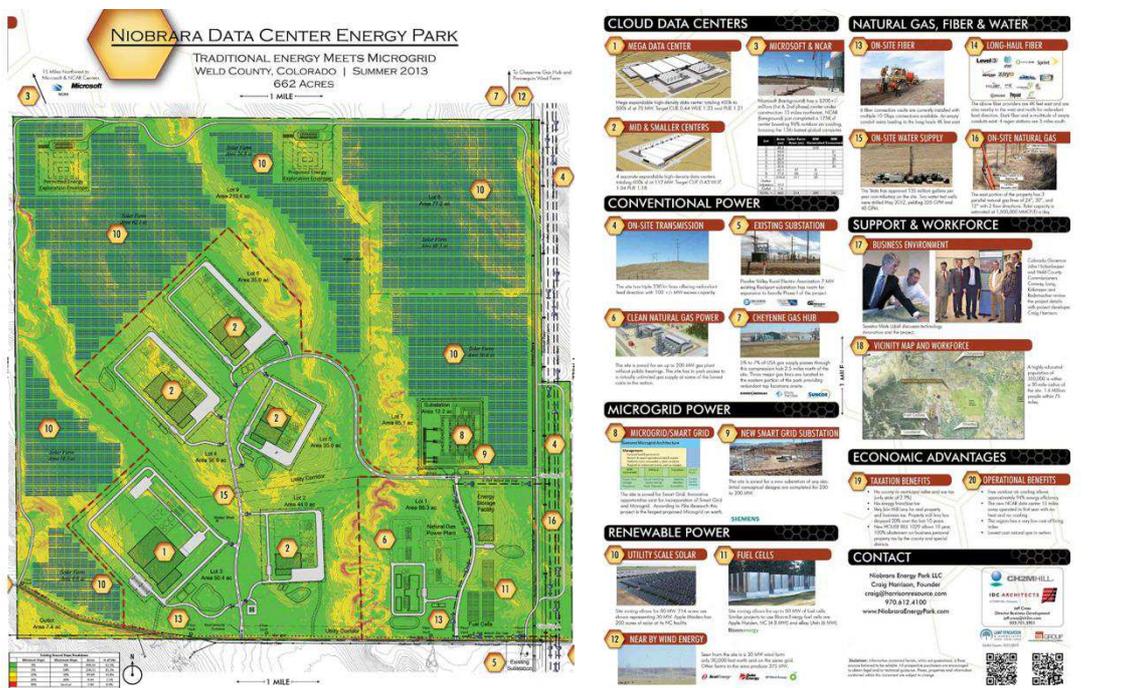


Figure 29. Microsoft data centers parc Crédit =  Microsoft, 2018.

⁸⁶ [https://www.greentechmedia.com/articles/read/facebook-microsoft-mobilize-50-million-for-renewable-energy-microgrids consulté en ligne le 3 janvier 2018].

- Microsoft est engagé dans un projet similaire pour son siège social à Redmond (Washington), l'entreprise envisage l'autonomie énergétique de son campus.
- Certains acteurs comme des entreprises énergétiques se spécialisent dans l'accompagnement des acteurs et des industriels, dans la mise en œuvre, les normes de conception et d'exploitation d'une infrastructure électrique qui permettrait l'autonomie électrique. C'est notamment le cas d'Uptime Institute, qui encourage les opérateurs à produire sur site pour renforcer leur autonomie électrique afin qu'elle soit la principale source d'énergie pour le *data center*, le réseau étant considérée comme une "alternative économique". L'opérateur du *data center* aurait ainsi le contrôle sur la maintenance et le fonctionnement des générateurs par rapport au réseau de distribution où il est un client.

Du micro au macro réseau : des mutualisations énergétiques

Suite aux dégâts liés à l'ouragan Sandy en 2012, les micro-réseaux électriques ou *micro-smart grids* sont devenus une préoccupation centrale pour les acteurs de l'énergie new-yorkais, financièrement soutenue par le département de l'énergie de l'État. Sandy a plongé dans l'obscurité un tiers de la population new-yorkaise. 50% des *data centers* ont été mis hors de fonctionnement à Manhattan. Au regard de la redondance infrastructurelle qui les caractérise, c'est un bon indicateur du niveau de la catastrophe.

Sandy a accéléré une politique volontariste en faveur des micro-réseaux électriques⁸⁷ qui sont perçus comme une des façons les plus efficaces :

- d'alléger les réseaux de transmission connu à New York pour leur fragilité, une demande croissante, et donc de plus en plus de pics à gérer (rappelons que 60% de l'électricité de l'État de NY est consommée dans la région métropolitaine de New York. Et 40% de l'électricité y est produite).
- de créer de la résilience en cas de coupure ;
- d'intégrer des nouvelles micro-productions locales Enr.

L'échelle des bâtiments a depuis la fin du XIX^e toujours favorisé une forte capacité en production d'électricité à « la cave » ou de secours. Il y a une grande professionnalisation sur ce type de système (autonomie de 3 jours en moyenne). Il existerait encore aujourd'hui environ 1000 MW de générateurs de secours (en activité) dans la ville de New York. Ces générateurs sont cependant très souvent au diesel et très polluants. L'installation de centrales de cogénération au gaz (ou CHP) depuis 2012 dans le cadre du *CHP acceleration program* mis en place par l'Etat⁸⁸ permet de remédier à ce phénomène tout en renforçant les nano-grids à l'échelle du bâtiment. Depuis 2012, 625 centrales de cogénération ont été installées dans l'Etat de New York et 240 dans la ville de New York. Ce sont autant de ressource mobilisable par les mini-réseaux qui comprennent parfois des *data-centers*.

- Le New York Times Building est un gratte-ciel de 52 étages livré en 2007 et dessiné par l'architecte Renzo Piano. Une nano-grid a été installée à l'échelle du bâtiment partiellement alimenté par un système de cogénération conçu par WSP Flack & Kurtz. Deux générateurs au gaz naturel fournissent 1 400 kW d'électricité en continu au *data center*. La spécificité de cette installation est qu'elle est utilisée en continu comme principale source d'énergie. Des moteurs diesel et le réseau de distribution fournissent une sauvegarde et une redondance pour ce système. L'eau chaude chauffée par le moteur fournit un chauffage en hiver et entraîne également un refroidisseur à absorption en été.

Précisons que différemment du nanoréseau qui peut constituer un système de secours électrique à la l'échelle du bâtiment (interconnecté ou non au réseau traditionnel), les micro ou mini réseaux se déploient entre plusieurs bâtiments à des échelles variables de quartier. On remarque dans les documents de planification stratégique, un souhait à l'échelle de l'État de passer du nano au micro qui est considéré comme plus performant énergétiquement et plus pertinent en termes de mutualisation.

⁸⁷ Navigant, 2015, *Community Microgrid Case Study and Analysis Report*, Rapport préparé pour le New York State Smart Grid Consortium. http://nyssmartgrid.com/wp-content/uploads/CommunityMicrogridCaseStudyandAnalysisReport_2015-08-133.pdf

⁸⁸ Voir le programme de Nysesda qui est le département de l'énergie de l'état de NY.

Des exemples de mutualisation à des échelles urbaines ou territoriales :

- **Microsoft et l'opérateur électrique Black Hills** ont installé des générateurs de secours au gaz en partage dans le Wyoming. Cette installation qui sert en priorité au *data center* de Microsoft sert également pour la collectivité lors des pics sur le réseau. Lorsque Microsoft a commencé à négocier avec Black Hills pour la construction de son *data center* de 200 MW à Cheyenne, plusieurs problèmes sont survenus. Le premier était celui de la disponibilité électrique demandée qui était trop élevée pour le fournisseur électrique dont l'électricité provenait majoritairement de centrales à charbon. La construction d'une nouvelle centrale de ce type pour alimenter le *data center* aurait nécessité d'importants investissements financiers et ne correspondait pas au bilan énergétique que Microsoft souhaitait donner à son installation. Black Hills et Microsoft ont donc conclu un marché : le *data center* sera équipé de générateurs de secours au gaz qui pourront être mis en fonctionnement pour soulager les pics sur le réseau électrique local en lui redonnant pendant les heures de pointe. Le *data center* devient ainsi une centrale de pointe, à partir de générateurs au gaz plus propres. En échange de quoi Black Hills achètera sur le marché et acheminera de l'électricité à Microsoft s'il y a des lacunes en termes de production. Microsoft bénéficie d'un tarif négocié (lorsque la charge de Microsoft dépasse 35 MW). Ce tarif est destiné aux grands clients industriels qui utilisent au moins 13 MW d'électricité, disposent d'une quantité importante d'énergie de secours sur site et sont prêts à demander à la compagnie d'électricité d'accéder à cette source d'énergie pour compenser les déficits dus aux pics.
- **Portland dispatchable stand-by generation** est une smart grid conçue par Portland General Electric (PGE). Le principe est de mobiliser à distance des générateurs de secours (au diesel), soit 86 générateurs au total correspondant à 35 clients. Parmi ses clients on trouve des *data centers* (six de Via West, deux de TATA, et un de ODAS) ainsi que des hôpitaux, usines, universités, des banques et des entrepôts alimentaires. La mise en réseau de ces générateurs permet d'avoir une réserve de 121 MW mobilisable par PGE pour assurer une partie de ces ressources d'urgence obligatoires. Il y a une mutualisation entre différents acteurs et ce qu'ils appellent une opération *win-win* car PGE fournit le fioul et assure la maintenance sur 15 ans des générateurs. De plus lors des tests mensuels, l'énergie produite est récupérée par le réseau.
- **Salem smart microgrid** est un projet de stockage pour *smart-grid* testé depuis 2010 à Salem, à quelques kilomètres de Portland. C'est un système de batteries et d'onduleurs au lithium-ion de 5 MW capable de stocker 1,25 MWh d'énergie pour approvisionner électriquement certains bâtiments dont le *data center* de l'état de l'Oregon. Ce démonstrateur s'inscrit dans un projet plus large de *smart grid* pour Pacific Northwest, un projet de recherche du Département américain de l'énergie.

Dans les différents exemples présentés, il s'agit de mutualiser des capacités d'urgence dormantes en les connectant ensemble ou en les partageant pour alléger le réseau électrique. Le problème réside toutefois (pour certains exemples) dans l'utilisation du fioul comme énergie primaire, ce qui réduit en termes de bilan carbone l'impact vertueux de la démarche de mutualisation.

Comme pour toute infrastructure de réseau, à la version institutionnelle, de grande échelle et commerciale, largement présentée dans la première partie du rapport, correspondent des infrastructures alternatives, souvent gérées par des structures associatives ou coopératives, par des citoyen·ne·s et des passionné·e·s., visant aussi bien à en élargir l'accès qu'à susciter une réappropriation technique de l'infrastructure, voire sa transformation en termes d'échelle et de fonctionnement.

5. Des initiatives citoyennes, publiques et des infrastructures numériques alternatives

L'infrastructure numérique se divise en trois éléments : réseaux, *data centers* et terminaux informatiques. On évoquera ici d'abord les initiatives alternatives et citoyennes en faveur d'un réseau Internet partagé, ouvert, vecteur de liberté d'expression et de partage de connaissance, passant par l'accès à Internet et à la communication via les wifi et les FAI citoyens en particulier. La question du stockage sera abordée dans un second temps.

Ce pas de côté vers l'infrastructure de réseau est nécessaire pour saisir les atouts, motivations et démarches des acteurs associatifs et coopératifs de l'Internet. Il nous mène ensuite à la question du stockage alternatif (distribué sur les terminaux utilisateurs ou dans des *data centers* de proximité), seconde étape à laquelle ces FAI souhaitent s'attaquer, comme le montre l'exemple de Guifi.net. On pourrait ainsi faire l'hypothèse que la réappropriation citoyenne du stockage passe par celle du réseau.

5.1 La réappropriation citoyenne de l'infrastructure numérique de réseau

Fournisseurs d'Accès Internet (FAI) associatifs : des atouts pour les territoires

En complément des quatre FAI principaux (Bouygues, Free, Orange et SFR), on trouve des FAI associatifs et coopératifs. En France, French Data Network, premier FAI associatif, créé en 1992, a été aussi la première structure à donner un accès à internet au grand public dès le début du Web, avant France Telecom en 1996. Il existe encore aujourd'hui et couvre tout le territoire français, via notamment du VDSL. On peut également citer franciliens.net en Ile-de-France, Aquilenet dans le Sud-Ouest, SCANI en Bourgogne ou dans l'outre-mer, à Saint-Barthélemy, Igwan.net. Ces FAI associatifs sont regroupés au sein de la Fédération FFDN⁸⁹.

Franciliens.net est par exemple un FAI associatif sur le territoire de l'Ile-de-France. Il propose une fourniture Internet via l'ADSL (fibre et wifi sont en projet), mais propose aussi une brique internet à brancher sur sa box, combinée à un VPN, qui permet d'accéder à un internet neutre et ouvert. Cette brique permet également de faire de l'auto-hébergement pour stocker ses propres données, et se constituer un mail.

Au sein de ces FAI, certains proposent une offre de connexion que l'on peut qualifier du « dernier kilomètre » : ce sont les fournisseurs de wifi citoyens. En Europe, les plus développés sont Guifi.net en Catalogne (plus de 40 000 nœuds) et Freifunk en Allemagne. De nombreux autres FAI associatifs sont présents en Europe et dans le monde : Wlan Slovenija en Slovénie, Ninux en Italie, Tetaneutral à Toulouse, Red Hook à New York (voir ci-dessous).

Primavera de Filippi et Félix Tréguer tous deux chercheur·e·s au CNRS, détaillent dans un article ce que sont les *Wireless Community Networks*⁹⁰, ou réseaux communautaires sans fil (wifis citoyens). Leurs atouts sont d'une part d'ordre technique : flexibilité, résilience, autonomie du réseau (voir détails techniques sur les réseaux Mesh dans la partie ci-dessous). Mais les atouts de ces réseaux sont aussi d'ordre social, éducatif et démocratique. Ils participent d'une gouvernance partagée du commun qu'est

⁸⁹ <https://www.ffdn.org/fr/membres> [consulté en ligne le 7 mars 2018].

⁹⁰ (de) Filippi Primavera et Tréguer Félix, 2015, « Expanding the Internet Commons: the subversive potential of Wireless Community Network », dans *Journal of Peer Production, Issue No. 6: Disruption and the Law*. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01306630v2/document> [consulté en ligne le 5 décembre 2018].

Internet en portant des valeurs de transparence, d'inclusion, de lien social, d'apprentissage technique, et d'incitation à la participation à la vie citoyenne. Stéphanie Vidal a proposé l'expression « (Re)coudre avec du sans-fil », reprise ensuite par le chercheur François Huguet dans sa thèse⁹¹. Ce dernier souligne en effet que ces systèmes favorisent « une pratique économique alternative au service d'une forme de résilience urbaine, une pratique pédagogique de reliance communautaire. » Donner accès à internet n'est donc pas qu'un geste technique, mais aussi une démarche sociale, éducative, économique, et la médiation numérique peut aussi être une médiation infrastructurelle.

Le FAI SCANI, dans l'Yonne, a par exemple permis la connexion à Internet d'un FabLab, qui sans ça n'aurait pas pu développer ses activités : la grange de Beauvais⁹². Comme le souligne Benjamin Bayart⁹³, ancien président de la FDN : « quelles compétences y-a-t-il sur les territoires en matière de maintenance de l'infrastructure, du réseau ? Comment ça marche, c'est quoi du routage ? Comment on fait de l'hébergement de site web ? Tout cela c'est tout un nuage de compétence autour des questions du numérique qui se développe ou pas. On se retrouve avec un territoire numérique qui est structurellement périphérique : il y a des gens qui développent des sites web, des gens qui consultent les sites web, mais c'est toujours hébergé ailleurs, un ailleurs très lointain. Les FAI associatifs apportent une diversité économique et donc une certaine richesse. C'est ça qui fabrique de la résilience. Le fait de ne s'appuyer que sur trois malheureux opérateurs réseaux, ça a vraiment comme effet que la compétence en matière d'infrastructure sur le réseau est hyper centralisé dans quelques locaux parisiens. Ce n'est pas aussi caricatural que ça mais ce n'est vraiment pas loin⁹⁴. »

Les atouts des FAI associatifs sont les suivants :

- couverture de territoires mal desservis par les opérateurs classiques ;
- développement de compétences locales, et d'emplois indirects ;
- tarifs accessibles ;
- implication des bénévoles et des usagers, lien social ;
- engagement sur la protection des données.

Leurs faiblesses potentielles sont les suivantes :

- croissance limitée par le nombre de bénévoles disponibles ;
- possibilité d'interruption de service car dépannage bénévole.

Faire une place à ces acteurs, certes petits et au faible nombre d'utilisateurs, dans un paysage numérique français assez peu divers aujourd'hui, semble important, dans la mesure où une gestion plus locale, plus informée, et réalisée par ses propres utilisateurs, peut favoriser des pratiques plus sobres, économes et ajustées aux besoins.

Les réseaux MESH, un accès à Internet pour toutes et tous

Les réseaux MESH (réseaux maillés) sont le plus souvent la base des wifi citoyens ou réseaux locaux de communication, parfois accompagnés du logiciel Commotion permettant leur création.

Primavera de Filippi et François Huguet présentent ainsi le réseau Mesh comme « un ensemble d'appareils communicants reliés entre eux de manière distribuée, sans fil et sans hiérarchie centrale »⁹⁵. Tous ces terminaux, téléphones portables, ordinateurs, tablettes, communiquent entre eux, entre pairs, via le WIFI, grâce à un protocole de routage dynamique qui permet, quand un terminal s'éteint, de configurer un nouveau chemin pour les paquets de données. Chaque personne devient ainsi un relai du réseau. Les auteurs de l'article estiment que les réseaux MESH sont une technologie de rupture « en comparaison avec les solutions centralisées classiques sans fil avec station de base ou avec les systèmes de téléphonie mobile ». C'est un système de communication véritablement décentralisé, qui

⁹¹ Huguet, François, 2016, *(Re)coudre avec du sans fil. Enquête sur des pratiques de médiation infrastructurelle*, thèse sous la direction d'Annie Gentès et de Jérôme Denis, Paris ENST.

⁹² <https://blog.scani.fr/index.php/2018/07/05/grange-de-beauvais-connectee/>

⁹³ Entretien avec Benjamin Bayart, cofondateur de la Quadrature du Net, co-président de la fédération des Fournisseurs d'Accès à Internet associatifs (FFDN), Paris.

⁹⁴ Pour plus de ressources sur le sujet : <https://communitytechnology.github.io/>
<http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/handle/10438/25696>

⁹⁵ Méadel Cécile et Musiani Francesca (éds), 2015, « Les réseaux Mesh » dans *Abécédaire des architectures distribuées*, Presses des Mines, Paris, Collection.

peut fonctionner sans internet, tout comme partager la connexion internet de ses usagers vers les autres.

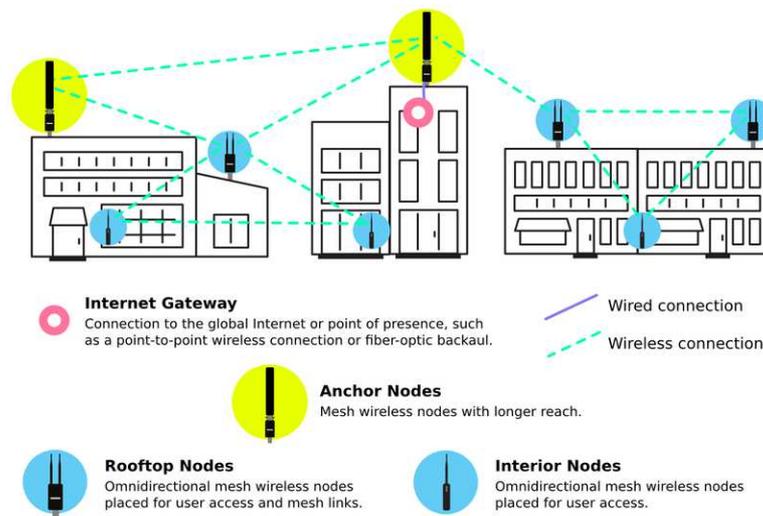


Figure 30. Schéma explicatif du système Mesh ©newamerica.

Les atouts des réseaux Mesh sont de présenter « une tolérance et une robustesse importante aux coupures de réseaux et aux pannes en général », de se déployer à faible coût (moins cher que des systèmes de téléphonie satellitaire par exemple) et sans terminaux à la technologie avancée, et de s'auto-optimiser en permanence. Ces réseaux permettent aussi aux citoyens d'entrer dans la *blackbox* (boîte noire) des réseaux numériques, de se former et de se réapproprier les infrastructures de communication numérique.

Il existe aussi des limites à ces systèmes : possibilité de perte de données, d'absence d'infrastructures s'il n'y a pas assez de terminaux en fonctionnement, erreurs de transmission ou problèmes de sécurité. Ces réseaux ne peuvent pas à ce stade remplacer les réseaux classiques de téléphone (GSM), et gardent un rayonnement local souvent modeste mais sont très intéressants dans des zones sans infrastructures. Ainsi, en Afrique du Sud et au Kenya s'est développé le projet Mesh Potato, et au Cameroun, le projet Feem. Ces réseaux sont également intéressants en cas de catastrophe naturelle, comme évoqué plus haut pendant l'ouragan Sandy à New York, mais aussi à Haïti, en Thaïlande ou aux Philippines, ou comme outil de développement local : à Détroit depuis 2012 ou à Montréal avec le réseau *île sans fil*. Les pays subissant des coupures d'internet ou de la censure peuvent également trouver dans le réseau MESH une alternative efficace, comme en Egypte en 2011 ou en Catalogne en 2018 par exemple.

De nouvelles applications se développent aujourd'hui mêlant technologie Mesh et Blockchain comme Rightmesh⁹⁶, intégrant des incitations à mettre son terminal à disposition du réseau via des *tokens*, qui permettent aussi de payer des biens et des services.

Ces systèmes permettent tous de partager une ou des connexions Internet, sans que tous les utilisateurs (et même plutôt une minorité) ne paient une souscription Internet. Ils suscitent donc l'hostilité des FAI commerciaux et des opérateurs de téléphonie classique. Par ailleurs, y règnent un anonymat qui fait craindre aux Etats aussi bien les dérives type *darknet* qu'une trop grande liberté des populations pour les gouvernements plus autoritaires. En France, les mutualisations d'une connexion Internet, et donc les réseaux Mesh, sont largement entravées⁹⁷ par le fait que d'une part l'internaute mettant sa connexion à disposition doit garder les traces de ses invités, d'autre part, que la loi HADOPI 2 l'oblige à sécuriser sa connexion, sous peine d'amende ou de coupure.

Par ailleurs, les réseaux doivent pouvoir utiliser des fréquences WIFI disponibles, mais la croissance prévisible de l'IoT qui fonctionne aussi avec la technologie Mesh pourra saturer ces réseaux dans le

⁹⁶ <https://www.rightmesh.io/technology>

⁹⁷ Décret du 24 mars 2006.

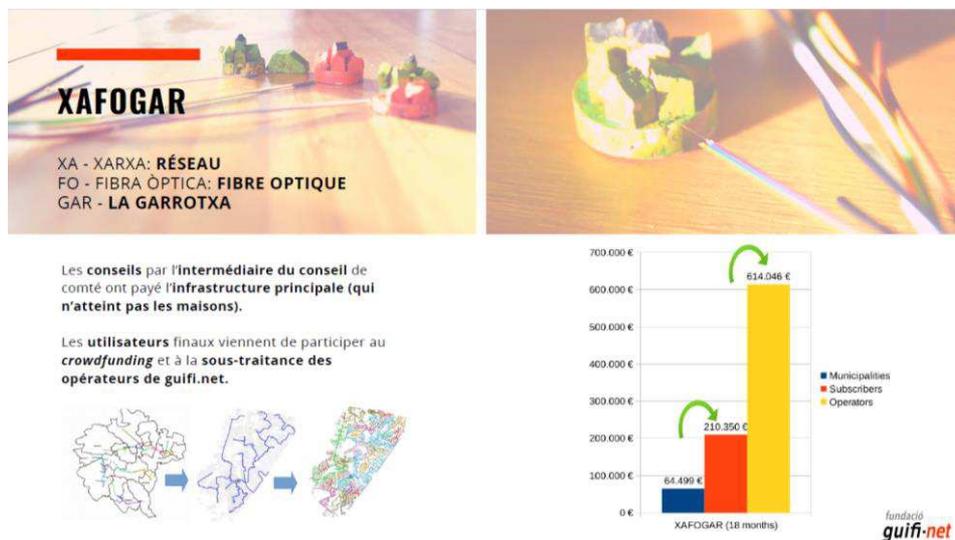
futur. Les auteurs de l'article Mesh soulignent ainsi qu'il faudra alors que le gouvernement libère des fréquences blanches (fréquences radios non utilisées) en faisant une place aux opérateurs citoyens et associatifs.

5.2 Guifi.net : une infrastructure, un commun

Dans le milieu des alternatives pour un internet plus libre, sobre et décentralisé, les initiatives regroupent souvent de petits groupes de personnes mobilisés autour de systèmes qui peinent (pour des raisons techniques et réglementaires) à dépasser le cercle des militants initiés. Le développement ou le saut d'échelle n'est pas évident dans un monde numérique dominé par les multinationales des télécoms et une injonction à la croissance des clics. A ce titre Guifi.net fait figure d'exception, cette Fondation a su développer une infrastructure sur les principes des communs tels que définis par l'économiste Elinor Ostrom et une offre de service résolument différente qui ne cesse de croître.

Guifinet est un réseau internet créé en 2004 pour répondre à des besoins locaux de connexion internet insatisfaits en Catalogne. Il commence de façon d'abord assez artisanale, mais, à partir de 2007, les membres se rendent compte que des acteurs privés proposent des services basés sur l'infrastructure de Guifi sans contribuer à la pérennisation du réseau. Guifinet décide alors d'élaborer un modèle économique et de gouvernance conciliant développement de services, création d'emplois et d'entreprises, services aux usagers et pérennité de l'infrastructure, notamment avec l'invention d'une licence (ou charte) que doivent accepter tous les acteurs du réseau⁹⁸.

Aujourd'hui le réseau est géré comme un commun, sur un modèle participatif, transparent et ouvert. Tout le monde peut participer, acteurs privés compris, mais dans le cadre d'un modèle économique bien cadré, avec un système de compensations et de péréquation qui permet d'intervenir dans différents territoires, plus ou moins rentables, mais aussi d'entretenir et de pérenniser l'infrastructure. La Fondation Guifinet a été créée pour garantir le fonctionnement de ce modèle comme un commun. 4 à 5 opérateurs de services sont des contributeurs importants à Guifi.net à hauteur de 200 à 300 000 euros par mois, et au total 30 entreprises de services ont été incubées par la Fondation (avec des créations d'emplois)⁹⁹. Il y a plusieurs milliers d'abonné·e·s et des bénévoles qui participent également au réseau. Environ 20 millions d'euros ont été investis collectivement (guifinet ; collectivités locales ; usagers) depuis 2004 pour développer le réseau.



⁹⁸ Baig Roger, Dalmau Lluís, Roca Ramon, Navarro Leandro, Freitag Felix, Sathiaseelan Arjuna, 2016, "Making Community Networks Economically Sustainable: The Guifi.net Experience", in Proceeding GAIA 16, Proceedings of the 2016 workshop on Global Access to the Internet. <http://people.ac.upc.edu/leandro/pubs/baig-sigcomm.pdf> [consulté en ligne le 5 novembre 2018].

⁹⁹ Entretien avec Roger Baig de la fondation Guifinet, Barcelone.

Il est aujourd'hui constitué à moitié de wifi, à moitié de fibre optique. Guifinet doit cependant lutter très activement pour avoir le droit de développer cette infrastructure, face aux opérateurs télécoms dominants et une réglementation européenne qui lui est défavorable.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU RÉSEAU



RÉSEAU D'ACCÈS

Il arrive dans les foyers et l'objectif actuel du réseau est de mettre fin à la fracture numérique, de se connecter à tout le monde.

TRANSPORT TERRITORIAL

Les infrastructures publiques existantes sont réutilisées: routes, poteaux, lignes électriques ...

TRAFIC GLOBAL

Point d'interconnexion avec l'internet mondial. Jusqu'à 10Gp symétrique.

fundació
guifi·net

Figure 32. Guifinet.

Sur la question du stockage de données, Guifinet héberge aujourd'hui ses données dans un *data center* classique de colocation, où arrive un des *backbones* internet, dans la zone portuaire de Barcelone. Il n'y a pas d'hébergement pour tiers, mais cela est envisagé comme un service futur. Guifinet développe en effet un projet de *cloud common*¹⁰⁰ (qui s'appelle *cloudy*) avec la même organisation sociale que pour le réseau (un commun). *Cloudy* est un service de type *edge computing* avec du stockage distribué dans les machines des usagers de Guifinet. La simulation du modèle économique d'un cloud commun aboutit à des conclusions positives. La mise en œuvre est à venir.

Ces initiatives de réappropriation des technologies numériques suivent un mouvement et des dynamiques comparables à celles que l'on observe autour des énergies renouvelables (EnR) par des groupes coopératifs et citoyens (parfois soutenus par les collectivités), en Europe. C'est la socio-anthropologue des techniques Laure Dobigny qui a étudié les effets de la relocalisation des EnR sur le comportement des usagers, via l'analyse de communes rurales autonomes. Elle affirme qu'une gestion énergétique qui inclut et implique, à un moment ou l'autre du processus les habitant·e·s, participe à une dynamique de sobriété¹⁰¹. C'est ce que Dobigny a observé dans ses terrains ruraux, où la mise en place de systèmes techniques de plus petite échelle ont permis, en modifiant les usages, une réduction des consommations.

Il y a dans cette dynamique de réappropriation, qu'elle soit autour de l'énergie ou du numérique, la volonté d'organiser un « commun » et le portage citoyen (habitants, acteurs économiques locaux) peut être augmenté d'un soutien institutionnel et/ou municipal.

¹⁰⁰ Baig Roger, Freitag Felix, Navarro Leandro, 2016, "Cloudy in guifi.net: Establishing and sustaining a community cloud as open commons." <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X1732856X> [consulté en ligne le 20 novembre 2017].

¹⁰¹ Dobigny Laure, 2017, *Le Choix des énergies renouvelables. Socio-anthropologie de l'autonomie énergétique locale en Allemagne, Autriche et France*, thèse sous la dir. d'Alain Gras, Université Paris I. Dobigny Laure, 2009, « L'autonomie énergétique : acteurs, processus et usages. De l'individuel au local en Allemagne, Autriche, France », in Dobré, M., Juan, S. (éds), *Consommer autrement. La réforme écologique des modes de vie*, Paris, L'Harmattan, p.245-252.



5.3 Prolonger la dynamique low tech et citoyenne des réseaux vers le stockage de données ?

« C'est partir du moment où on veut mettre le mail de 2 milliards de personnes au même endroit que ça pose problème. »
Benjamin Bayart, ancien président de la FDN (entretien, 20/09/2018)

Les potentiels du stockage distribué pour réduire l'empreinte énergétique et spatial du numérique

Le fonctionnement d'Internet, avant le web, et avant les *data centers*, était fondé sur de l'auto-hébergement et un fonctionnement pair-à-pair, où l'intelligence (ressources techniques et contenus) du réseau était dans ses extrémités (fonctionnement *end-to-end*), c'est-à-dire dans les ordinateurs des utilisateurs et utilisatrices. La création du web et son développement explosif dans les années 1990 a suscité le développement d'architectures techniques plus centralisées, créant des intermédiaires de plus en plus puissants entre les internautes. Déjà dans les années 2000, le projet Gnutella proposait du stockage pair-à-pair. Cette proposition refait surface depuis plusieurs années face aux risques portés par l'ultra-concentration des données par le cloud et les data centers hyperscale. Certains logiciels, solutions de cloud ou services, proposent désormais de réutiliser le fonctionnement peer-to-peer ou stockage distribué d'une part, ou de faciliter l'auto-hébergement d'autre part.

Des solutions de cloud pair-à-pair émergent actuellement. Comme le souligne la chercheuse Francesca Musiani¹⁰², « l'idée centrale sous-tendant ces dispositifs est que les fichiers et les contenus téléchargés par les utilisateurs dans le système sont stockés, totalement ou en partie, sur un nuage de stockage composé d'une partie des disques durs de chaque utilisateur, reliés entre eux en architecture P2P. » Les questions de sécurité sont gérées par des procédés d'encryptage et de fragmentation, ainsi que des systèmes de duplicata pour pallier aux machines des utilisateurs qui se connectent et se déconnectent. Il peut y avoir, par ailleurs, du troc d'espace de disque dur contre de l'espace en ligne comme dans le cas du projet Wuala¹⁰³ : « un utilisateur peut échanger de l'espace inutilisé du disque dur de son propre ordinateur contre de l'espace de stockage sur le « nuage d'utilisateurs » pourvu qu'il reste en ligne une certaine durée chaque jour » (p 212). Reste que ces dispositifs sont encore expérimentaux et posent des questions sur la confidentialité des données et la sécurité des équipements. Ils font cependant partie d'un mouvement de redécouverte des atouts de l'informatique pair-à-pair, qui par ailleurs peut apporter « des réponses aux questions qui touchent à la répartition de la bande passante, à l'équilibre du trafic, à l'efficacité de distribution » sur le réseau Internet plus largement¹⁰⁴. Pour Primavera de Filippi¹⁰⁵, le *cloud computing* ou informatique en nuage, malgré ses atouts en termes de flexibilité et de disponibilité des données, soulève un certain nombre de défis concernant la sécurité, la vie privée et l'autonomie des internautes. Elle relève ainsi plusieurs initiatives qui tentent de répondre à ces défis via des alternatives décentralisées, tout en gardant flexibilité et disponibilité. Elle cite plusieurs projets de nuage pair-à-pair : le logiciel open-source SlapOs, ou encore OwnCloud et CozyCloud. Ces projets restent à ce stade relativement confidentiels mais constituent des potentiels intéressants pour des utilisateurs dont la défiance grandit face au GAFAM en particulier, au regard des utilisations frauduleuses de leurs données (scandale Cambridge Analytica entre autres). Des services d'auto-hébergement, avec consultation à distance de ses données, se développent également, via Yunohost par exemple.

Ces clouds décentralisés et distribués favorisent donc un stockage distribué des données, et réduisent le besoin de grands *data centers*. Ils ont ainsi le potentiel de réduire d'une part l'impact spatial et l'emprise au sol de ces installations, et de permettre, à l'image des offres de Qarnot avec le Q-rad et des chaudières numériques de Stimergy, de mieux répartir les capacités de stockage sur les territoires.

¹⁰² Musiani Francesca, 2015, « Stockage distribué » dans *Abécédaire des architectures distribuées*, Méadel Cécile et Musiani Francesca (éds), Presses des Mines, Paris, Collection I, p.209

¹⁰³ Ce projet s'est arrêté en 2015, faute d'avoir trouvé son modèle économique.

¹⁰⁴ Musiani Francesca, Schafer Valérie, 2011, « Le modèle Internet en question, 1970-2010 », in *Flux*, n°85-86, pp. 62-71.

¹⁰⁵ (de) Filippi Primavera, 2015, « Cloud computing » dans *Abécédaire des architectures distribuées*, Méadel Cécile et Musiani Francesca (éds), Presses des Mines, Paris, p. 49.

On peut également s'interroger sur l'impact énergétique du stockage distribué. Plusieurs hypothèses sont possibles mais il existe peu de recherches sur ce sujet à ce stade pour les confirmer¹⁰⁶ :

- L'absence d'infrastructures de secours (générateurs de secours, batteries), de grands systèmes de climatisation mais aussi d'équipements électriques type onduleurs réduit la dépense de matière initiale (production), l'énergie grise dépensée et l'énergie dépensée en cas de panne. Cependant, on peut imaginer que la redondance serait alors atteinte grâce à la mise en réseau pair-à-pair de davantage de machines.
- Avoir son stockage sous les yeux favorise un fonctionnement plus ajusté (pas surdimensionné, pas de serveurs zombies...) et évite les inconvénients de la dématérialisation qui donne aux utilisateurs l'impression d'avoir accès à des espaces de stockage infinis.
- Le stockage distribué se fait a priori plus localement (et pas sur d'autres continents que le lieu de vie des usagers), les données à stocker voyagent moins dans les réseaux de communication ; on peut donc supposer une dépense énergétique moindre du réseau.
- Les process de « It refresh » qui se font tous les 2 ans dans les data centers de colocation et de cloud, sont probablement moins fréquents dans le cas de machines individuelles. Ici aussi on pourrait faire l'hypothèse d'une économie de matières et d'énergie grise au stade production de matériel informatique, et donc une moindre production de déchets informatiques également.

Des études complémentaires semblent nécessaires sur ce sujet en comparant les services rendus en termes de stockage. Il faudra ainsi prendre en compte la fourniture électrique des infrastructures et la possibilité de (auto) consommation (ou non) d'énergies renouvelables.

Data centers de proximité et associatifs/coopératifs

Les petits *data centers* que l'on pourrait qualifier de « proximité », comme un commerce ou un équipement, sont une option également à explorer.

Parmi les acteurs de l'hébergement alternatif, un nouveau collectif est né en 2016 : les Chatons. Comme présenté sur le site, c'est un « Collectif d'Hébergeurs Alternatifs, Transparents, Ouverts, Neutres et Solidaires. Il rassemble des structures souhaitant éviter la collecte et la centralisation des données personnelles au sein de silos numériques du type de ceux proposés par les GAFAM ». Ce collectif se consolide autour d'une Charte qui garantit aux usagers le respect des valeurs affichées : Alternatifs, Transparents, Ouverts, Neutres et Solidaires. Il n'est pas fait mention de dimensions écologiques ou énergétiques dans la charte, ce qui n'empêche pas les projets, individuellement, de porter ces démarches. Des expérimentations se dessinent également pour des centres de données de proximité, plus *low tech*, autonomes et gérés localement : c'est notamment le cas d'une expérimentation à l'Université Rutgers dans le New Jersey (voir rapport 1).

Nous développons ici plusieurs exemples d'opérateurs alternatifs disposant de mini *data centers*.

Exemple 1 : SCANI, département de l'Yonne

SCANI est une société coopérative d'intérêt collectif (SCIC) qui déploie, gère et entretient un réseau de communication et d'accès à Internet, et à terme des services de stockage, sur l'ensemble du département de l'Yonne et qui est la propriété de ses utilisateurs : particuliers, entreprises et collectivités¹⁰⁷.

Comme Bruno Spiquel, un des actifs de la coopérative, le souligne, il y a une pertinence à installer de petits *data centers* locaux, au plus près des usages : « Autant, il y a 10 ans, il était difficile de trouver des endroits avec une connectivité propice à l'hébergement d'une machine, autant maintenant, entre le câble, le vdsl et la fibre, on trouve assez facilement plus de 50/100Mbps de capacité, largement de quoi entasser des dizaines de sites web et autres services, y compris les plus complexes¹⁰⁸. »

Une meilleure connectivité territoriale permet ainsi d'imaginer mieux répartir les capacités de stockage de données dans des *data centers* locaux. Ainsi, SCANI en exploite trois en direct et en occupe deux

¹⁰⁶ Un axe de recherche du Groupement de Services EcoInfo explore les questions liées à l'impact énergétique de stocker ses données sur un disque dur local plutôt que sur le cloud.

¹⁰⁷ « Quel que soit l'usage fait de la connexion ou la personne qui la souscrit (particulier, entreprise, ...) le tarif est identique : 30 € TTC mensuel », [consulté en ligne le 10 décembre 2018], www.scani.fr

¹⁰⁸ Entretien avec Bruno Spiquel, activiste chez Scani, Paris.

qui appartiennent à des tiers (Virtua Networks à Auxerre). La coopérative les utilise pour ses besoins internes, mais envisage actuellement de créer une structure associative ou coopérative tierce qui pourrait gérer ces espaces de stockage pour des besoins externes également.

Il est intéressant de se pencher sur les 3 équipements que SCANI exploite en direct :

- Le premier est une construction légère de jardin, convertie en data center, pouvant accueillir 3 baies (une seule est en service, et à un quart rempli). A ce stade, l'espace n'est pas climatisé. Il est équipé d'un onduleur. Il sera amélioré au fur et à mesure de la croissance des besoins.
- Un ancien abri télécom de 12 m², propriété d'une mairie qui le prête à la coopérative. Cet espace de 5 baies est tout équipé (électricité et climatisation). Une demi-baie est occupée aujourd'hui. On voit ici le potentiel de la reconversion d'un immobilier télécom de petite échelle, vraisemblablement vacant sur de nombreux territoires, notamment ruraux.
- Un local technique de 30 m² dans un ancien bâtiment militaire, actuellement en cours de transformation par SCANI, et qui fera office de tête optique pour un réseau FTTH hyper local et un data center d'une capacité maximum de 3 à 4 baies.

Pour Bruno Spiquel, quand on héberge des données localement, pour une communauté d'utilisateurs proche, « la prise en compte de la problématique énergétique est immédiate, mais pas forcément pour "aider à réduire l'impact climatique", souvent bêtement pour des questions de dimensionnement électrique et/ou financier ou, plus marginalement, d'espace disponible. » La modestie des moyens de ces acteurs amène donc à une frugalité sur l'équipement, l'aménagement et le fonctionnement de ces *data centers* locaux.

Exemple 2 : Aquilinet à Bordeaux

Aquilinet est un FAI associatif souhaitant fournir un internet neutre et ouvert. Il propose également de l'hébergement (hosting)¹⁰⁹ et a pu installer son propre *data center* associatif au format libre (« la mezzanine »)¹¹⁰ dans un local depuis l'automne 2017, dont l'électricité est fournie par un fournisseur ne proposant que des énergies renouvelables.

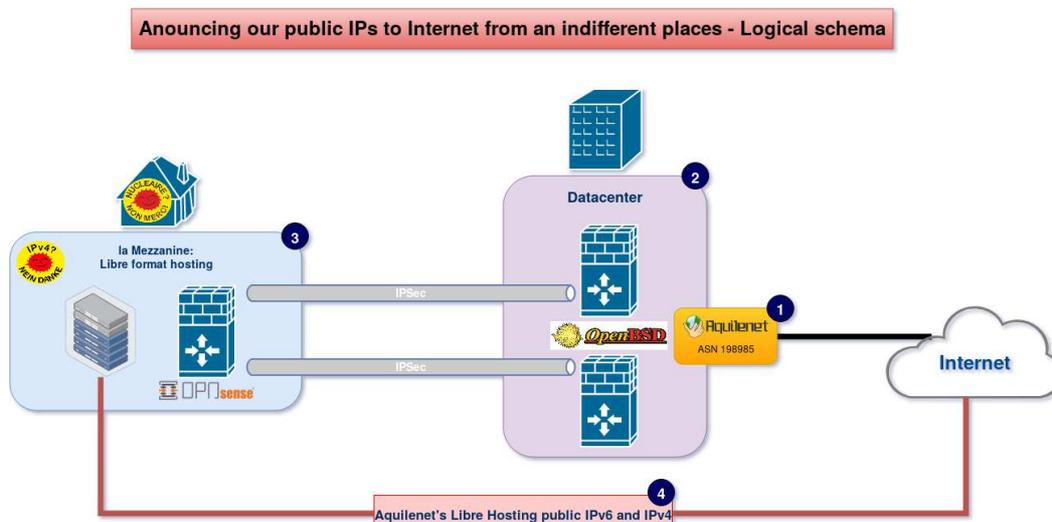


Figure 33. Architecture de stockage chez Aquilinet.

Pour information, le prix mensuel d'un hébergement à la Mezzanine se situe :

- entre 5€ et 10€ par mois pour une petite machine (type NUC, netbook, laptop, NAS, Raspberry pi, etc.)
- entre 15€ et 20€ par mois pour un PC (consommation de 100W maximum avec une consommation moyenne de 30W)¹¹¹.

¹⁰⁹ <https://atelier.aquilinet.fr/projects/services/wiki/Hergementlibre> [consulté en ligne le 3 décembre 2017].

¹¹⁰ <https://www.aquilinet.fr/actualit%C3%A9s/la-mezzanine-histoire-dun-centre-dh%C3%A9bergement-associatif-au-format-libre/> [consulté en ligne le 5 décembre 2017].

¹¹¹ <https://www.aquilinet.fr/services/h%C3%A9bergement-serveur/> [consulté en ligne le 5 décembre 2017].

Aquilenet héberge aussi ses serveurs dans un *data center* professionnel (COGENT). Le tarif est de 100 €/ mois/unité de rack.

Exemple 3 : Tetaneutral à Toulouse

Tetaneutral est un fournisseur d'accès à internet, hébergeur et opérateur sous forme associative et sans but lucratif, hébergé depuis 2011 chez Mix'art Myrys, structure artistique et culturelle, dans un ancien hangar au sein d'une zone industrielle toulousaine de 6630 m² de surface totale, mis à disposition grâce au financement croisé des collectivités locales (Ville de Toulouse, Toulouse Métropole, Département Haute Garonne, Région Midi-Pyrénées et la DRAC). Le site se partage en 4200 m² d'ateliers, 430 m² de bureaux et 2000 m² d'espaces extérieurs.

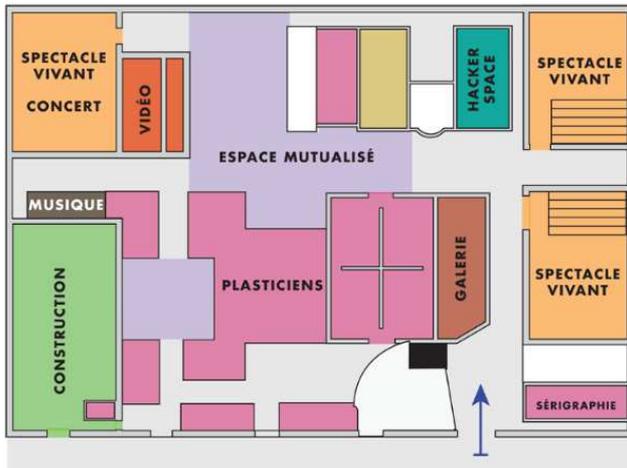


Figure 34. Plan du rez-de-chaussée de Myrys.

L'association a deux salles informatiques, à l'étage du bâtiment, près des bureaux, avec une connexion branchée sur un *data center* voisin opéré par Cogent. L'association a loué une unité de rack dans une baie, avec un contrat de transit et a eu le droit de percer un trou pour tirer une fibre de la baie jusqu'à Myrys. Par ailleurs, Tetaneutral co-exploite une salle dans data center classique, opéré par Fullsave qui leur a proposé une salle « associative », en dehors de la zone ultra sécurisée, difficile à climatiser. C'est une sorte d'espace résiduel du bâtiment, qui pouvait être constitué en rajoutant une cloison, une porte, une arrivée électrique et une arrivée fibre, et ainsi fournir un espace à peu de frais. L'association paye un loyer bon marché et sa consommation électrique. Tetaneutral refuse d'héberger dans ces salles des machines qui consomment trop d'électricité, et sensibilise les adhérent.e.s aux questions de consommation électrique. Il est très intéressant de noter ici une complémentarité entre *data center* d'hébergement classique et associatif, ainsi que l'optimisation des espaces résiduels du bâtiment.

Tetaneutral a des tarifs conseillés, ce qui sous-entend qu'il existe de fait des tarifs sociaux. Ils sont les suivants :

- hébergement de machine virtuelle : 10€/mois
- hébergement de machine physique :
- petites machines (NUC, Brix, Zotac, netbook, laptop, nettop, NAS, sheevaplug, raspberry pi) : 5€ à 10€/mois
- PC : 15 à 25€/mois (20€/mois pour une consommation de 100W max, avec une moyenne de 30W)¹¹²

Ces nouveaux lieux infrastructurels de petite échelle ne sont pas un retour aux placards d'entreprises des années 1990 mais une relocalisation potentielle d'Internet au plus près des usagers, au cœur des villes. Ils viennent ainsi redéfinir la notion d'équipement public dans les territoires, et préfigurer une nouvelle géographie du numérique, plus locale, plus distribuée.

¹¹² <https://tetaneutral.net/adherer/> [consulté en ligne le 5 décembre 2018].

Les atouts des *data centers* de proximité

Techniques

- Moins d'équipements de secours donc moins de consommation de matières et d'énergie grise dans la phase production et moins d'occupation au sol ;
- Comme pour le stockage distribué
 - avoir son stockage sous les yeux favorise un fonctionnement plus ajusté et évite de donner l'impression d'avoir accès à des espaces de stockage infinis ;
 - le stockage se fait plus localement, on peut supposer une dépense énergétique moindre du réseau ;
 - les process de « It refresh » est moins fréquent par modestie des moyens.

Cette limitation de la consommation de matériel informatique neuf correspond la fois à

- La recommandation du livre blanc FING IDDRI WWF¹¹³ sur « allonger à 5 ans la durée de garantie des équipements numériques » ;
- Aux recommandations du rapport du Shift Project sur énergie et numérique paru en octobre 2018¹¹⁴.

Economiques et sociaux

- Développement économique et social local : des services d'hébergement accessibles pour les activités locales, les PME-TPE ;
- Formation : former des bénévoles à la maintenance des infrastructures numériques peut être un tremplin pour l'emploi.

Urbain

- Pas d'effets de concentration urbaine et spatiale des *data centers* (donc pas d'effet îlot chaleur, pas de pression sur le système électrique local et les ressources en foncier) ;
- Résilience plus grande aux événements climatiques, que les infrastructures de grande échelle et centralisées.

Leurs faiblesses

- Disponibilité potentiellement moins importante qui implique une plus grande tolérance des usagers à la panne ;
- Moindre capacité à croître rapidement (mais ce n'est pas forcément le but).

Ainsi, stockage distribué dans les terminaux informatiques et petites *data centers* de proximité constituent une solution possible pour réduire les impacts spatiaux (emprise au sol notamment) et énergétiques des *data centers*.

Si aujourd'hui, l'hébergement, le stockage et le traitement des données restent majoritairement aux mains d'opérateurs marchands, les opérateurs de la société civile se développent et les acteurs publics déploient également leurs propres infrastructures. Le développement de *data centers* publics pourrait ainsi constituer une perspective permettant un rapport aux territoires plus coordonné, accompagné d'exigences en termes de mutualisation et d'économie d'énergie.

¹¹³ FING IDDRI WWF, 2018, *Libre blanc Numérique et Environnement. Faire de la transition numérique un accélérateur de la transition écologique*.

¹¹⁴ Ferreboeuf Hugues, 2018, *Rapport Lean ICT*, The Shift Project, 2018. https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2018/05/2018-05-17_Rapport-interm%C3%A9diaire_Lean-ICT-Pour-une-sobri%C3%A9t%C3%A9-num%C3%A9rique.pdf [consulté en ligne le 5 avril 2018].

5.4 Projet de labellisation des *data centers* de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Depuis plusieurs années, l'Etat Français a engagé un mouvement de rationalisation des ressources informatiques de l'Enseignement supérieur et de la recherche¹¹⁵ (ESR).

En novembre 2015, le comité d'orientation du numérique¹¹⁶ (CODORNUM) lance un mouvement de restructuration des moyens numériques de l'ESR avec un rapport de recommandations. L'une de ces recommandations est la rationalisation des salles machines existantes de l'ESR. La multiplication et le vieillissement de petits sites au cours des années entraînaient à la fois un problème d'interopérabilité entre les différents services des universités et des dépenses énergétiques superflues. Cette démarche rejoint une volonté des acteurs de mutualiser certaines ressources et compétences, par exemple avec l'arrivée d'un besoin en archivage.¹¹⁷ Il s'agit de favoriser l'émergence au maximum d'un *data center* par future grande Région.

Objectifs :

- rationalisation spatiale au niveau national et régional avec la fermeture des salles informatiques ;
- développement et mutualisation de nouveaux services entre acteurs locaux, notamment publics (ESR, et au-delà : CHU, collectivités territoriales, etc) ;
- mise en place de pôles de compétences distribués ;
- transition vers un cloud hybride pour l'ESR.

Cette nouvelle infrastructure de stockage et de calcul serait sous la responsabilité des acteurs régionaux.

Mutualisation des infrastructures numériques universitaires

La première étape revient à s'appuyer sur un réseau ESR de 4 *data centers* de niveau national et 13 *data centers* de niveau régional. Les 4 *data centers* nationaux sont construits sur les sites des 4 centres de calcul de l'ESR : CC-IN2P3 à Villeurbanne, le TGCC à Bruyères-le-Châtel, le CINES à Montpellier, et l'IDRIS à Orsay.¹¹⁸

¹¹⁵ Etat des lieux d'après l'étude INFOTHEP 2014 : plusieurs milliers de salles machines ESR auraient une faible efficacité énergétique (PUE de 1,5 à 3,5), des coûts complets souvent inconnus, et connaîtraient parfois des incidents avec des pertes de données. https://succes2017.sciencesconf.org/data/2017_Journe_es_Success_16octobre_DGRI_V2.pdf

¹¹⁶ Instance décisionnelle qui a pour vocation de proposer des orientations à un haut niveau stratégique sur les sujets en relation avec la transformation numérique. Le CODORNUM se compose de quatre comités de pilotage qui travaillent sur des thématiques différentes : les systèmes d'information, la formation, la documentation et l'information scientifique et technique, et le comité de pilotage sur les infrastructures numériques, appelé InfraNum.

¹¹⁷ Entretien avec François Pellegrini, professeur à l'université de Bordeaux, membre de la Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL), à Paris : « Il se pose des problèmes d'archivage et donc il y a des besoins importants, pour quelque chose qui pour nous était nouveau. Les archives nationales ou départementales savent faire mais nous en tant qu'universitaires, on ne sait pas faire, or maintenant on a besoin de ça. »

¹¹⁸ Présentation de M. Pascal Fouillat lors des journées sur « Les défis des Grandes Infrastructures de Recherche dans la mondialisation des connaissances », 23-24 mars 2016.

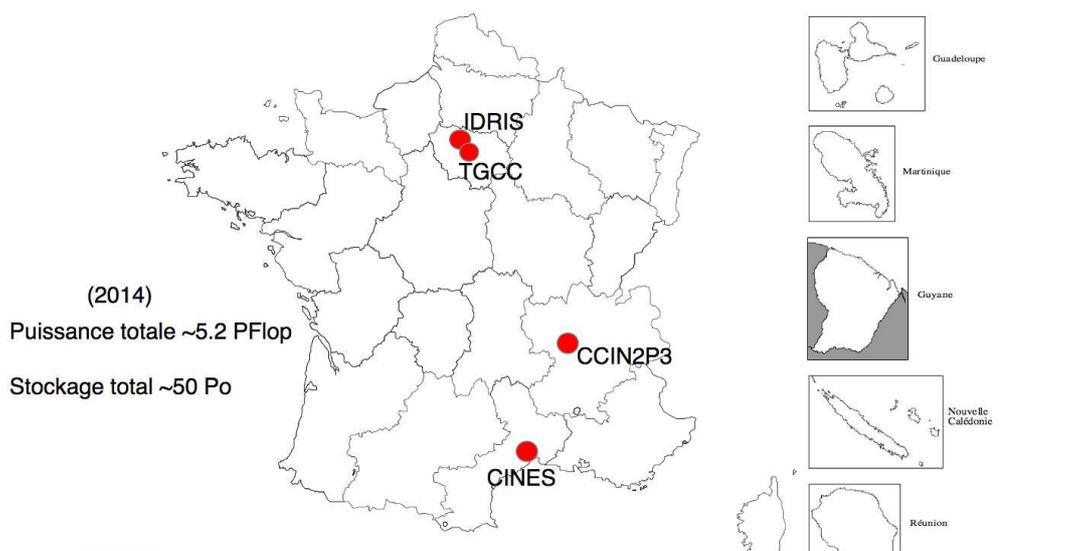


Figure 35. Les 4 data centers nationaux: TGCC à Bruyères-le- Châtel, le CINES à Montpellier, CC- IN2P3 à Villeurbanne, IDRIS à Orsay =© Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

Les 13 *data centers* de niveau régional seront construits à partir du réseau des méso-centres de calcul, du réseau régional des services informatiques de l'Etat ; du réseau des rectorats ; des initiatives en cours dans les collectivités territoriales, les COMUES, les projets CPER¹¹⁹.

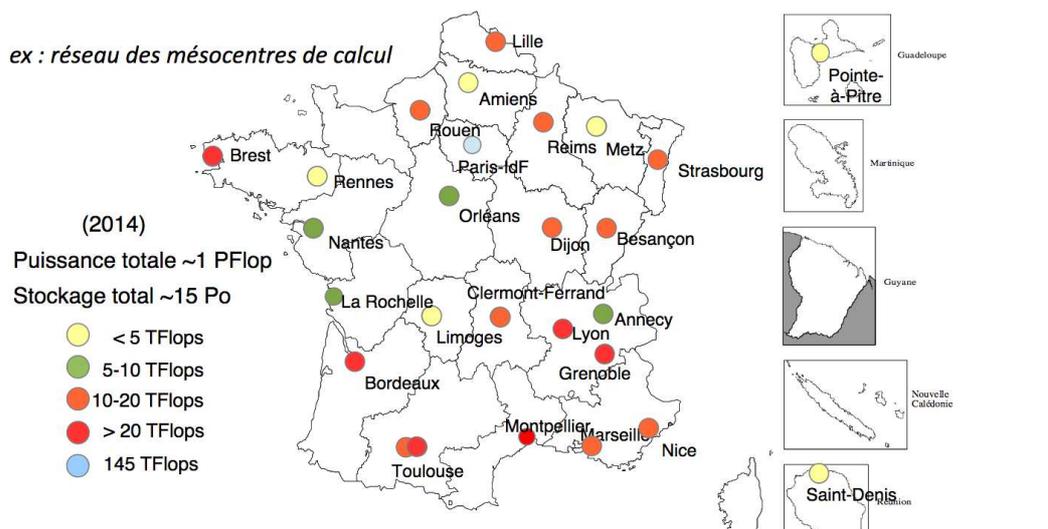


Figure 36. Réseau des mésocentres =© Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

¹¹⁹ http://calcul.math.cnrs.fr/IMG/pdf/menesr_crouzet.pdf [consulté en ligne le 15 avril 2018].

Cette initiative permet de répondre à plusieurs besoins :

- aux besoins de réseau pour déployer des *data centers* régionaux : qualité de service, liaisons à haut débit entre *data centers* et établissements ;
- aux besoins de mutualisation des organismes de recherche, en lien avec la Stratégie Nationale des Infrastructures de Recherche ;
- aux besoins de structuration nationale : contexte européen EuroHPC /EOSC/GO FAIR

Tous ces changements s'inscrivent dans un contexte de réforme territoriale avec la formation de nouvelles régions et la constitution de plateformes territoriales de services publics numériques par les métropoles et les régions. La labélisation par InfraNum d'un unique *data center* dans chacune des 13 régions permettrait de faciliter le financement de ces *data centers*, objets d'une concertation régionale (qui bénéficient de contrats dans le cadre du plan Etat-Région CPER 2015-2020). Sur les dix projets présentés, trois ont été retenus par le comité de labélisation en 2018. Il s'agit des projets des régions Bourgogne Franche Comté, Provence Alpes Côte d'Azur et Auvergne Rhône Alpes¹²⁰.

L'université de Bourgogne est présente dans 6 villes (Dijon, Auxerre, Nevers, Macon, Chalon-sur-Saône et Le Creusot) et 11 sites. En 2014, face au vieillissement de sa salle serveur, construite en 1996, et à l'évolution de ses besoins, l'université de Bourgogne a décidé de construire un nouveau *data center* dans un bâtiment dédié possédant 110 m² d'espace réservé aux serveurs. Cela permet notamment de réduire l'empreinte énergétique de l'université à l'aide des technologies les plus récentes mais également de répondre à des exigences de sécurité et de souveraineté des données. Ce *data center* a obtenu le label « *Data center* régional pour l'ESR » par la suite.

L'université de Bordeaux a engagé la réflexion sur la mutualisation des infrastructures numériques en dépassant les limites de l'université et en travaillant avec tous les représentants publics de la région Nouvelle Aquitaine. Cela pose la question de la gouvernance d'un projet aussi ambitieux, gouvernance qui dépasse le cadre de l'ESR. François Pellegrini, commissaire à la CNIL et ancien vice-président délégué au numérique de l'université de Bordeaux, a promu la création d'un réseau de huit salles *data centers* mutualisées avec une gouvernance partagée entre les différents acteurs de la région¹²¹. La Nouvelle Aquitaine est une région vaste, il y a des contraintes sur la couverture haut-débit de ce territoire. Ainsi relier en haut-débit un grand *data center*, qui serait n'importe où dans la région, à l'ensemble des usagers ne serait pas optimum. C'est pour cela qu'un système réticulaire a été envisagé avec un maillage territorial de 8 salles. Mais ce projet n'a pas été validé dans la première phase. « Ils ne voulaient pas 8 *data centers*, ils en voulaient un grand, c'est une vision un peu jacobine. Il a fallu réexpliquer, c'est en cours. »¹²² Autre problématique sur ce site, la localisation car le campus est sous un couloir aérien, ce qui ne permettra pas à l'installation de devenir un *data center* de niveau supérieur.

François Pellegrini résume ainsi les difficultés : « Pour le moment, la métropole a loué de l'espace dans un *data center* existant, mais s'il y avait un projet public dans lequel ils ont un intérêt, ils iraient. C'est vraiment une question de timing, de *process*, de compréhension du projet. (...) Ces objets sont très mal compris par le politique. En plus nous, dans le *data center*, on héberge aussi un supercalculateur. Entre le financement du supercalculateur, le financement du *data center*, les gens ne comprennent pas les liens. Le supercalculateur de génération suivante va être dans la data-room. Le troisième sera dans un *data center*, un objet qui sera aussi un supercalculateur néo-aquitain. »

L'université de Grenoble, a également essayé de faire travailler ensemble tout un écosystème varié (ville, hôpital, université, rectorat, etc.) afin de mutualiser les ressources en numérique. Le projet a commencé en 2008. Comme à Bordeaux, la question de la gouvernance est complexe car les organismes ont des ministères de tutelle différents. Le comité de labélisation InfraNum a bien retenu le projet de *data center* de la région Auvergne Rhône Alpes, preuve qu'il existe un projet concerté avancé avec des besoins identifiés, mais aucun lieu n'est annoncé pour la localisation de ce *data center*. La gouvernance commune et l'approche multi-tutelle restent compliquées et la réduction énergétique reste peu abordée.

¹²⁰ Présentation de Marie-Christine Plançon, chef de projet modernisation des infrastructures et des services numériques au ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, lors des journées Calcul Données 2018 sur « la modernisation des infrastructures et services numériques de l'ESRI »

¹²¹ Entretien avec François Pellegrini à Paris.

¹²² *Ibidem*.

De l'université au territoire : complexité d'une approche multi-tutelle

Ce projet de labellisation met en valeur une volonté de mutualisation des ressources numériques sur le territoire. François Pellegrini rappelle qu'un « data center est un objet modulaire. Ce qui est à mutualiser c'est l'alimentation électrique, la climatisation et la sécurité périmétrique. Pour le reste, ce sont des m² au sol, il suffit de mettre des cloisons et des portes fermées à clef et chacun gère son espace. On réserve 7000 m² et on construit module par module à mesure que les gens arrivent. » Toutefois, les projets qui ont été labellisés sont ceux qui n'ont rien mutualisé. Ce qui relève bien la difficulté du projet et le manque d'une entité de médiation qui puisse accompagner les acteurs.

En effet, aujourd'hui les difficultés et les freins sont nombreux :

- choisir la taille et périmètre de l'objet ;
- trouver un site qui n'est pas forcément celui du campus (car le *data center* doit être protégé des manifestations, des mouvements étudiants) ;
- évaluer les besoins techniques pour des économies d'échelles et la qualité de service ;
- définir la dimension multi-acteur, multi-usage et établir une confiance entre les partenaires et le partage des compétences.
- préciser la structure juridique : un GIP (groupement d'intérêt public), un GIE (Groupement d'intérêt économique) pour faire rentrer du privé ?

Cette problématique de la configuration des infrastructures du numériques n'est pas réservée aux acteurs de l'ESR mais concerne l'ensemble des acteurs publics.

La difficile émergence de data centers publics

Les acteurs publics et le cloud

Les acteurs publics ont la possibilité de migrer vers le cloud ou d'avoir recours à une offre d'hébergement d'un acteur privé. Cependant cette solution pose de plus en plus de questions sur la localisation et la souveraineté des données.

La question de la réversibilité peut également être une contrainte : la collectivité doit pouvoir rester seule maîtresse de l'intégralité de ses données, qui restent sa propriété. Tout cela s'accompagne de contraintes de renouvellement de marchés publics : au bout de 3 à 4 ans, la collectivité doit à nouveau mettre en concurrence les offres et le cas échéant, doit pouvoir récupérer l'intégralité de ses données et les déménager chez un autre opérateur tout en assurant une continuité de service¹²³.

Quelles solutions pour les collectivités locales ?

La Direction Générale des Entreprises (liée au ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique), le Commissariat Général à l'Égalité des Territoires (lié au ministère de la cohésion des territoires) et la Caisse des Dépôts et Consignations participent ainsi à la publication en 2015 du *Guide sur le cloud computing et les data centers à l'attention des collectivités locales*. Ce guide présente les solutions de cloud computing et de mutualisation des infrastructures qui peuvent exister pour les collectivités locales.¹²⁴ Il est mis en avant que les projets de *data center* dits « de proximité », projets de mutualisations d'infrastructures, de services et de compétences entre collectivités et à différents échelons territoriaux, favoriseraient l'accès à des services d'hébergements pour les collectivités de plus petites tailles, qui n'ont pas forcément les ressources informatiques et logistiques. De la même manière que pour les exemples de l'ESR, cette solution permettrait de répondre aux besoins des collectivités et des acteurs publics tout en permettant un gain énergétique sur les infrastructures. Les conseils régionaux pourraient jouer un rôle majeur dans ces initiatives.

Les limites de l'initiative

Dans le cas de l'ESR, le processus de labellisation d'un unique *data center* régional ne tient pas forcément compte des spécificités de chaque région. Effectivement, dans le cas de la région Nouvelle-Aquitaine, région la plus vaste de France métropolitaine, il semblerait que la solution de plusieurs *data centers* organisés sous une gouvernance commune répondent mieux aux contraintes de la région. Cette

¹²³ Pour en savoir plus voir : CDC, CGE, CGET, 2015, Guide sur le cloud computing et les datacenters à l'attention des collectivités locales.

¹²⁴ *Idem*.

volonté d'avoir un unique data center régional peut également entraîner une hyper concentration des activités numériques dans une capitale régionale, au risque de délaisser le reste du territoire. Les directives pour ce mouvement de mutualisation ne s'appliquent que pour les data center de l'ESR. Les projets de grands data centers publics dans les régions comme celui de la région Nouvelle-Aquitaine ne se réaliseront donc que s'il existe une volonté forte de tous les acteurs de l'écosystème (régions, départements, communes, rectorat, université...).

Si le monde de la banque et de la finance, qui représente une part importante du trafic Internet et des capacités de calcul et de stockage des centres des données, n'est probablement pas prêt à se tourner vers des infrastructures publiques ou plus distribuées, il semble y avoir ici des opportunités pour la société civile, les associations, l'économie sociale et solidaire afin de reprendre la main sur ce bien commun qu'est Internet.

L'échelle et les modalités de gouvernance de ces infrastructures sont de grands sujets de société à l'heure où l'idéal social de la grande infrastructure comme édifice de service public, qui alliait économie d'échelle, stabilité technique et service de qualité pour le plus grand nombre, a été déstabilisé depuis les années 1990 par les capitaux privés de l'économie libérale¹²⁵. En effet, l'objet technique centralisé est en proie à de nouveaux assemblages et à des déplacements de ce qui faisait sa valeur.

La refondation du service public à partir des communs¹²⁶, des mouvements de remunicipalisation ou déprivatisation à des échelles municipale ou régionale se multiplient en Europe pour les services énergétiques mais aussi numériques, comme à Stockholm ou à New York.

L'accompagnement des territoires dans l'accès à un internet libre et ouvert est aussi indispensable qu'une réflexion plus large sur l'objet *data-centers* et le système numérique associé ; pour mieux mesurer l'impact environnemental des choix techniques au regard de la plus-value sociale attendue ; et pour aller vers des pratiques numériques plus raisonnées, sobres et décroissantes.

¹²⁵ Graham Stephen et Marvin Simon, 2001, *Splintering Urbanism*, Londres, Routledge.

¹²⁶ Alix Nicole, Bancel Jean Louis, Coriat Benjamin, Sultan Frédérique (éds), 2018, *Vers une république des biens communs*, Paris, Les liens qui libèrent.

6. Des approches intégrées

Il s'agit également de promouvoir des démarches publiques intégrées où les questions foncières, énergétiques, urbaines et économiques sont prises en compte : c'est le cas du programme *Data centers parks* de Stockholm et de la démarche du quartier de Red Hook à New-York.

6.1 Les *data center parks* de Stockholm: articuler foncier, numérique et énergie

Stockholm a développé récemment un programme qui oriente la localisation des *data centers*, en exigeant la récupération de leur chaleur excédentaire. Les *Data Parks* de Stockholm représentent une initiative majeure en termes de maîtrise de l'énergie et de maîtrise de l'implantation des *data centers*. C'est l'entreprise Stockholm Exergi¹²⁷ créée en 2018, détenue par la ville (50%) et par Fortum (50%) qui est à l'initiative de ce projet.

Pour 2030, l'ambition de Stockholm Exergi est d'éliminer les 10% de combustibles fossiles de son mix énergétique et de les remplacer par la récupération de chaleur¹²⁸. Une des spécificités de la ville de Stockholm est d'avoir un réseau de chaleur très performant. Plus de 80% des besoins en chauffage du Grand Stockholm sont satisfaits par le chauffage urbain, dont les 2800 km de réseau sont approvisionnés par 5 grandes unités de production de chaleur¹²⁹ et d'électricité d'une capacité totale de 4000 MW de chaleur et 650 MW d'électricité.

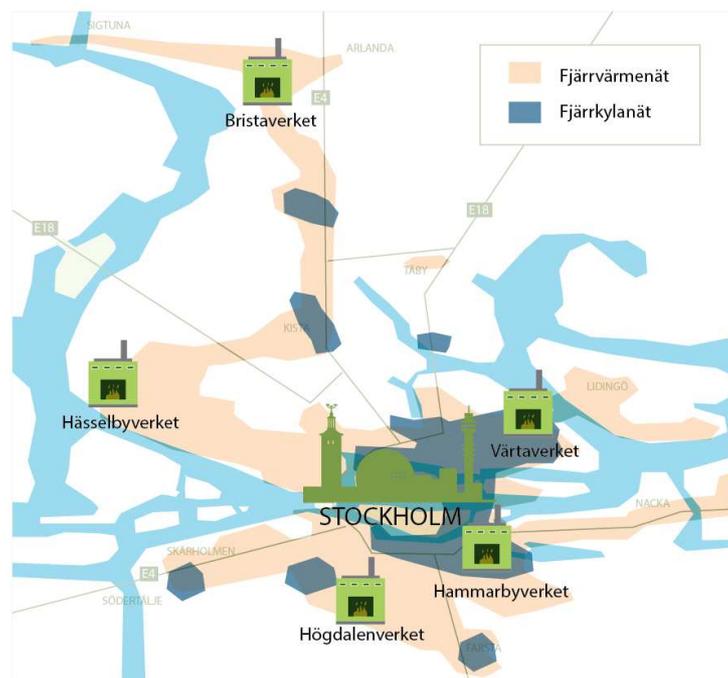


Figure 37. Localisation des 5 grandes unités de production énergétique =© Exergi.

¹²⁷ Anciennement Fortum Värme, une branche de Fortum qui est une des principales entreprises énergétiques suédoises (production et vente d'électricité, chauffage et refroidissement urbain. En thermodynamique, l'exergie est la part maximale d'énergie qui peut être utilisée, c'est une grandeur permettant de mesurer la qualité d'une énergie.

¹²⁸ Entretien avec Erik Rylander, responsable énergie du Stockholm Data Parks, à Stockholm.

¹²⁹ Avec plus de 10 000 bâtiments connectés au réseau de chauffage, il représente un « puits de chaleur » de 12 TWh.



Avec la croissance démographique en hausse, l'objectif est d'augmenter les besoins de chauffage¹³⁰ tout en baissant les émissions de CO2. La Suède est très avancée sur le développement des énergies renouvelables et de récupération, et c'est dans cette perspective que Stockholm Exergi a commencé à réfléchir dès 2012 sur un programme de récupération de la chaleur des *data centers*. « A data center load of 10 MW can heat around 20 000 modern residential flats » affirme Erik Rylander, responsable énergie du projet. Sans être un pôle d'interconnexion majeur (comme Francfort, Londres, Amsterdam ou Paris), Stockholm est une localisation de qualité pour les opérateurs de *data centers* qui peuvent y trouver une électricité d'origine renouvelable, un climat froid (qui réduit les besoins en climatisation), une fiscalité avantageuse et désormais une politique ambitieuse en termes de récupération de chaleur. C'est en 2014 que le partenariat a été créé entre Stockholm Exergi, la ville de Stockholm, l'opérateur électrique Ellevio et celui de fibre noire Stokab¹³¹ afin d'orienter la localisation des *data centers*, en exigeant en échange la récupération de leur chaleur excédentaire. L'intérêt est de rationaliser et de contrôler leurs implantations urbaines, tout en favorisant une efficacité énergétique territoriale.

Le programme « Stockholm data parks » a choisi de spécialiser quatre sites dans l'accueil de data centers (de plus de 5 MW), afin de contrôler l'expansion des data centers en leur offrant :

- une électricité renouvelable à des tarifs négociés
- la connexion à la fibre du bâtiment
- des démarches rapides et accompagnées (autorisations)
- l'utilisation gratuite du réseau de froid de la ville quand le data center est chargé à plus de 10 MW.

en échange:

- d'une contribution au système énergétique local via des équipements mutualisés de récupération de chaleur également mis à disposition,

Une option alternative permet au data center de gérer lui-même son refroidissement, l'opérateur Fortum Varme lui rachète alors la chaleur excédentaire, à un prix reflétant ses coûts de production de chaleur alternative.

Stockholm souhaite se positionner sur le marché nordique en augmentant l'accueil de data centers. Le programme *Stockholm data parks* propose 4 parcs de plusieurs centaines d'hectares spécialisés dans l'accueil de *data centers* : Kista (ouvert en 2017), Brista (ouverture prévue en 2018), Skarpnack (ouverture prévue en 2018), Vasby (ouverture prévue en 2019), tous situés sur le foncier de la ville qui ne peut leur être loué que s'ils acceptent de vendre leur chaleur fatale.

- Le premier site, dans le quartier de Kista, se situe à proximité de l'autoroute, avec un site Interxion déjà présent, une usine de production de chaud et de froid de l'opérateur Fortum, et beaucoup de concessionnaires automobiles dont les parkings sont mobilisables pour densifier la zone, mais également des espaces boisés. Une ancienne imprimerie très vaste pourra également être transformée.

¹³⁰ Le succès de la récupération de chaleur tient au fait que le réseau de Stockholm est le plus grand réseau de chauffage des pays nordiques (et le plus grand réseau de refroidissement du monde). La coexistence de réseaux de chauffage et de refroidissement permet des solutions flexibles et économiques. Dans ce climat froid, la chaleur a une valeur, c'est donc plus de 25 ans d'expérience dans la capture et la réutilisation de la chaleur excédentaire.

On peut également citer la récupération de chaleur à partir des centres d'interconnexions du réseau Stokab, qui se fait dans l'école Östra Reals. La chaleur issue du raccordement est convertie en système de chauffage de l'école, ce qui permet de réduire la consommation d'électricité de 30%.

¹³¹ Stokab est une entreprise publique, opérateur de fibre noire, uniquement fournisseur d'infrastructure physique et non pas de services. Elle appartient à la ville de Stockholm depuis sa fondation en 1994. Sa création résulte de l'ambition de la ville d'investir dans la planification à long terme d'infrastructures numériques ouvertes et neutres afin de garantir une concurrence plus équitable en matière de services. Stokab assure un discours très fort sur la notion de service public comme socle d'un développement des services et l'innovation (notamment pour les PME) contribuant ainsi à la croissance, à la création d'emplois. Le déploiement du réseau est limité à la grande région de Stockholm, la couverture assure les connexions FTTH multifibres et couvrant 90% des ménages et presque tous les bâtiments commerciaux. C'est l'un des plus importants réseaux de fibre noire du monde.

Le cœur du quartier Kista, plus à l'Est, est un secteur tertiaire existant, concentrant le secteur informatique suédois, intégré à la ville et à proximité immédiate de quartiers résidentiels et des universités (Stockholm University and the Royal Institute of Technology).

Data Park Kista – The Sites



Figure 38. Kiska data parc =© Exergi.

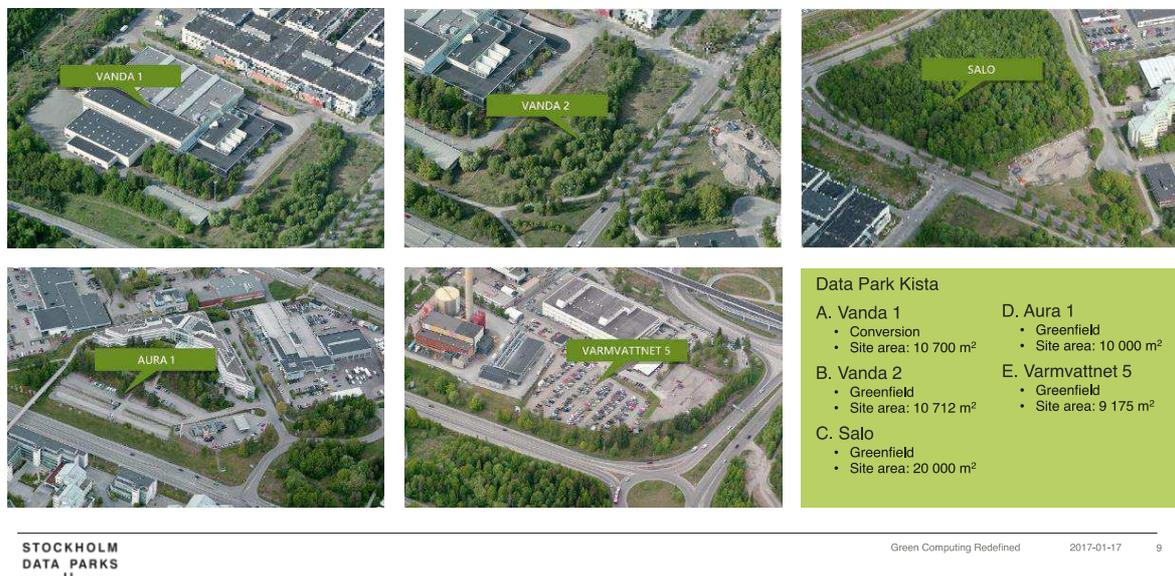


Figure 39. Les localisations du parc de data center =© Exergi.

- Le second Brista se trouve à proximité de l'aéroport, il s'étend sur un espace non bâti au socle rocheux apparent, entre une voie de chemin de fer et une installation de production électrique et de recyclage.
- Enfin, le troisième se situe dans le quartier de Snarpnäck, quartier mixte, où un site d'Equinix est déjà implanté non loin. Le data park est lui une emprise coincée entre deux grandes routes, où est localisée une installation de production électrique, argument indéniable d'attractivité pour des data centers.

Under preparation for 2018

Brista, 200 000 m²



Skarpnäck, 20 000 m²



STOCKHOLM
DATA PARKS

Green Computing Redefined 2017-01-17 10

Figure 40. Les extensions à venir parc de data center =© Exergi.

A ce stade, les entreprises Interxion (40 MW à Kista) et Multigrigrid sont parties prenantes de ce projet de Data center parks, mais d'autres data centers d'entreprises ou de colocation font partie du programme de récupération de chaleur (sans être dans les data centers parks) : Bahnhof (3 contrats), Ericsson (2), H&M (2), ComHem, Bankgirot, GoGreenHost.

Pour Erik Rylander, les facteurs de succès de ce projet sont :

- la robustesse et la taille du réseau de chaleur urbain ;
- le nombre de clients pour la chaleur (besoin de 12TWh thermique/an) ;
- une interface technique claire ;
- la transparence du système et la prédictibilité du besoin en chaleur.

Cette stratégie permet de canaliser le développement à venir de data centers que la ville anticipe. Elle essaie de trouver les incitations suffisantes pour orienter leurs implantations, dans des sites existants, et dans des bâtiments construits ou à construire. Elle a ciblé des sites préalablement repérés par des grands acteurs comme Interxion ou Equinix, rassemblant toutes les qualités en termes d'approvisionnement électrique et de connectivité, en urbanisant soit des espaces naturels en continuité de l'urbain et des espaces sous-utilisés comme à Kista, soit des sites contraints dans leur desserte, naturels mais à côté d'usines de production électrique.

Si cela conforte le modèle des zones d'activités mono-fonctionnels, la démarche est pragmatique face à un développement très rapide, et opportuniste des *data centers*.

6.2 Red Hook: de la résilience numérique au micro réseau énergétique

Red Hook est un quartier de Brooklyn, à New York, péninsulaire et donc extrêmement vulnérable aux événements climatiques intenses et aux inondations, dotée d'une population jeunes, aux revenus modestes. Il compte environ 11 000 habitants, dont plus de la moitié habite dans le parc social public.

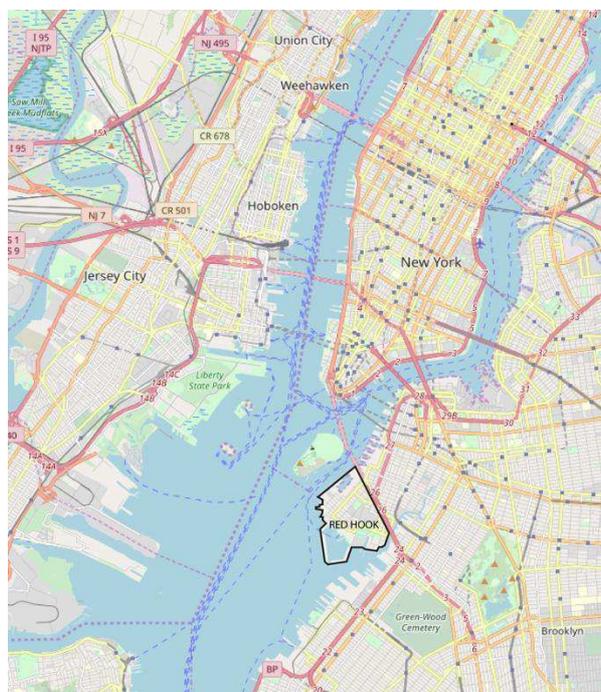


Figure 41. Le quartier de Red Hook à New York. © Red Hook.

En 2002, la *Red Hook Initiative* (RHI) est lancée, d'abord sur des questions de santé publique à destination des habitants et habitantes. Cette initiative non-lucrative emménage ensuite dans un immeuble dédié, en 2010. Voulant toucher davantage les résidents du quartier, elle souhaite alors pouvoir susciter une communauté numérique. La question de l'inclusion numérique est donc abordée à partir de 2011, avec l'aide de l'*Open Technology Institute* et d'un étudiant de la *Parson School of Design*, afin de fournir un accès gratuit à Internet par wifi, gérée par la communauté habitante, et plus particulièrement des jeunes en réinsertion qui sont formés à gérer et réparer le réseau¹³² : les *digital stewards*. Le réseau commence ainsi à diffuser depuis le bâtiment de RHI, via une nano station Ubiquiti sur le toit et un routeur dans le bâtiment, connecté par ethernet au modem du centre. L'accès au wifi donne aussi accès au site web de RHI, à un forum, afin de favoriser l'implication des habitants dans les projets locaux. En mars 2012, une autre nanostation est installée sur le toit d'un bâtiment résidentiel afin d'accroître la couverture du réseau. Cette nanostation n'est d'abord pas connectée à Internet mais à un *GuruPlug Server*, petit serveur à basse consommation fonctionnant sur Linux. Ce serveur héberge alors un portail local du même type que RHI. Le réseau est donc ultra local. Il fonctionne grâce au logiciel *Commotion* qui permet la création de réseaux MESH (voir partie spécifique ci-dessus). Par ailleurs, des outils numériques spécifiques pour et par la communauté ont également été développés, à travers des ateliers, notamment les 2 applications suivantes :

- Where's the B61 Bus? – Une application en temps réel sur les localisations et heures d'arrivées du bus B61
- Stop & Frisk Survey – Une application pour que les habitants renseignent leurs interactions avec la police et améliore la sécurité locale

¹³² New America Foundation 2013. "Case Study: Red Hook Initiative WiFi & Tidepool", *Open Technology Institute*, 1er février. Available from <https://www.newamerica.org/oti/blog/case-study-red-hook-initiative-wifi-tidepools/> [consulté le 22 octobre 2018]

Via la question de l'inclusion et de l'accès à Internet, c'est aussi celle de la résilience face aux inondations et coupures électriques qui a été adressée. Le réseau a d'ailleurs bien fonctionné pendant l'Ouragan Sandy en 2012. Le bâtiment de RHI a été le centre de secours local, ouvert 14 heures par jour pendant 24 jours consécutifs, offrant électricité, eau, chauffage et internet, facilitant ainsi le contact pour les secours comme entre les personnes. Dans les premiers jours après la tempête, près de 300 personnes se connectaient par jour. Depuis, le réseau a été largement étendu.

En 2015, une initiative menée par d'autres acteurs du quartier¹³³ pour la mise en place d'un micro réseau énergétique a remporté un prix du Département Energie de l'Etat de New York (NYSERDA) afin de réaliser une étude de faisabilité, dans l'objectif d'améliorer l'autonomie du quartier face aux coupures électriques et à la fragilité du réseau à Brooklyn. Il s'agissait de penser ensemble le développement d'un micro-réseau internet et d'un micro-réseau électrique et de voir comment ils auraient pu interagir.

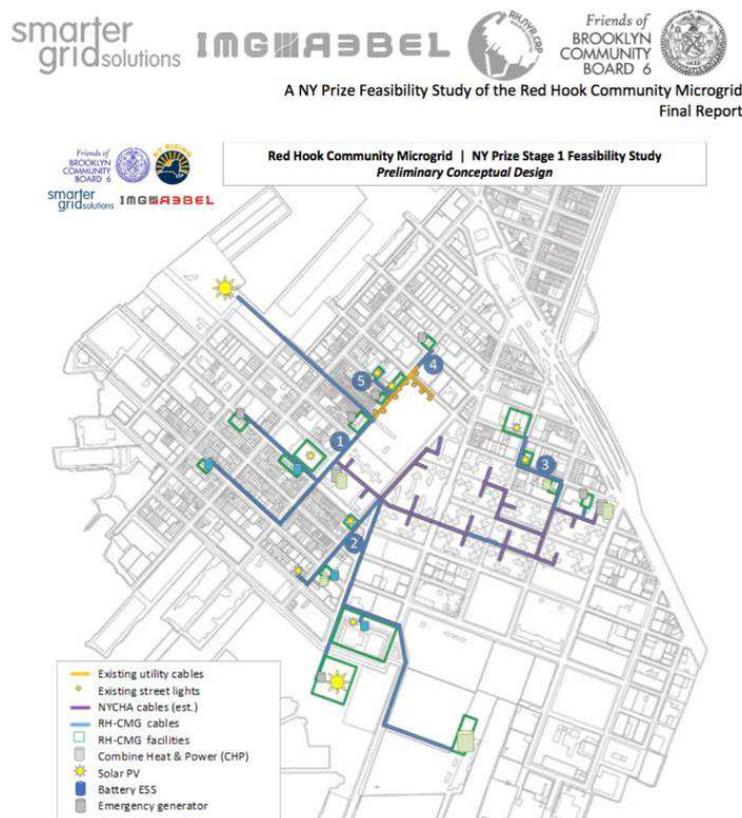


Figure 42. La Red micro-grid de Red Hook =© Red Hook, NYSERDA.

Le projet n'a pas été sélectionné pour la phase 2 des financements par NYSERDA, il n'est donc pas encore réalisé. Il prévoyait d'approvisionner en électricité, chaleur et eau chaude, via une centrale de cogénération au gaz, des panneaux solaires (PV) avec en secours, des générateurs au diesel et au gaz, près de 2800 logements (6300 personnes) du bailleur social New York City Housing Authority (NYCHA), mais aussi les lieux de secours en cas de catastrophe naturelle : le bâtiment de RHI, un grand magasin Ikea, et d'autres sites critiques.

La combinaison du micro-réseau énergétique et du wifi citoyen, comme on le voit sur la carte ci-dessous, aurait été un attelage innovant pour l'autonomie et la résilience du quartier, étant données les prévisions de recrudescences d'événements climatiques intenses mises en avant par les rapports du GIEC. Ceci est d'autant plus pertinent que le micro-réseau a lui-même besoin d'un réseau de communication des données efficace et robuste pour fonctionner, tout comme le réseau de communication a besoin d'électricité. En cas de coupure du micro-réseau lui-même, ce projet prévoyait aussi un système de secours pour chaque nœud du réseau de communication (*RF mesh gateway node*) avec un panneau PV et un système de batterie.

¹³³ Smarter Grid Solutions (ingénierie technique), IMG Rebel (consultant sur les financements), RH-NYR-CRP (stakeholder lead & community co-lead) et FBCB6 (community co-lead & project admin).



Figure 43. Les nœuds du réseau de la micro-grid © Red Hook, NYSERDA.

Depuis 2014, Red Hook WiFi a par ailleurs développé l'énergie solaire pour son réseau Mesh, grâce à des subventions de l'Agence de Développement Economique de New York, Rise. L'agence aide également à développer 5 autres wifi locaux résilients : à East Harlem, Hunts Point, Gowanus, Far Rockaway, et Sheepshead Bay, avec le soutien des institutions locales, la participation des résidents, et la contribution du programme Resilient Communities de la Fondation New America¹³⁴.

Insertion sociale, résilience énergétique et numérique, accès à internet : le projet de Red Hook combine plusieurs dimensions majeures et propose un modèle intéressant pour des communautés de toutes sortes.

¹³⁴ Pour en savoir plus : <https://www.digitalequitylab.org/what-is-digital-equity-part-1/>

7. Une prospective énergie, numérique, territoires

L'entrée dans le 21^e siècle marque l'accélération du basculement climatique et des pollutions de l'environnement ainsi que l'épuisement des ressources. Ce phénomène de catastrophe environnementale est couplé à un processus d'accélération de l'urbanisation à l'échelle du monde et le numérique offre à la crise de l'urbain et de ses services de nouvelles perspectives. Pour l'historienne des sciences Orit Halpern, «les préoccupations concernant le changement climatique, la raréfaction des sources d'énergie et l'effondrement de la sécurité et de l'économie font se tourner les urbanistes, les investisseurs et les gouvernements vers des infrastructures intelligentes envisagées comme lieu de production de valeur et comme salut possible pour un monde sans cesse défini par les catastrophes et les crises¹³⁵ ». Il semble en effet que les scénarios portés par les promoteurs de la ville intelligente s'inscrivent dans une perspective qui vise à repousser les situations de crise (économique, environnementale, politique) par l'espoir d'une meilleure gestion et anticipation des consommations et des productions et cela, sans pour autant que l'épuisement des ressources (minerais, terres arables, sable, eau potable...) et les pollutions diverses ne soient un levier susceptible de réorienter plus globalement notre impact sur le «système Terre», comme aimait à l'appeler un certain Richard Buckminster Fuller.

Dans cette partie, au regard des grandes tendances identifiées sur l'évolution de la consommation d'énergie notamment et de la persistance du « solutionnisme technologique », nous synthétiserons les tendances alternatives émergentes vers un internet plus low tech et sobre, avant d'ébaucher dans une approche prospective, au travers de trois mondes numériques possibles : Croissance et ultracentralisation numérique ; Stabilisation du STN et diversité infrastructurelle : quête d'une difficile résilience, Ultradécentralisation numérique : la fin des data centers ?

¹³⁵ Halpern Orit, 2017, «L'architecture comme machine: la ville intelligente déconstruite» in Andrew Goodhouse (dir.), *Quand le numérique marque-t-il l'architecture ?* CCA, Stenberg Press, p.126.

7.1 Grandes tendances de fond identifiées

Changement climatique, épuisement des ressources, pollutions

« *Low energy demand and low demand for land and GHG-intensive consumption goods facilitate limiting warming to as close as possible to 1.5°C.* »
Rapport du GIEC, octobre 2018, Chap. 2, p.4

Changement climatique et risques

Le rapport du GIEC paru en octobre 2018 souligne le fait que le changement climatique est déjà en cours : accroissement des événements climatiques extrêmes, disparitions d'écosystèmes, montée des océans. La France vise ainsi la neutralité carbone pour 2050, suivant ainsi les recommandations du GIEC :

« *Limiting warming to 1.5°C implies reaching net zero CO2 emissions globally around 2050 and concurrent deep reductions in emissions of non-CO2 forcers, particularly methane* » Chap. 2, p.4

Aujourd'hui, le secteur numérique augmente ses émissions de CO2 de 8% par an (alors qu'il devrait les réduire de 5% par an¹³⁶), et pourrait en émettre autant que le secteur automobile en 2025.

Suivant ce dernier rapport du GIEC, il est possible de rester sous les 1,5° d'augmentation des températures planétaires, en mettant en place immédiatement des politiques ambitieuses de transition, réduisant les émissions de CO2 - et de leurs facilitateurs (*forcers*) - de moitié, notamment par :

- **La réduction des consommations d'énergie, dans tous les domaines, et meilleure efficacité énergétique.** Le numérique va dans la direction opposée : la consommation énergétique globale (produire les équipements et les faire marcher) du secteur était de 2000 TWh en 2013 ; de 3200 TWh en 2018 et prévue à 6 ou 7000 TWh en 2025¹³⁷, en prenant en compte les gains en efficacité énergétique.

La part du Numérique dans la consommation finale d'énergie (elle-même en croissance de 1,5% par an) aura ainsi augmenté de presque 70% entre 2013 et 2020.

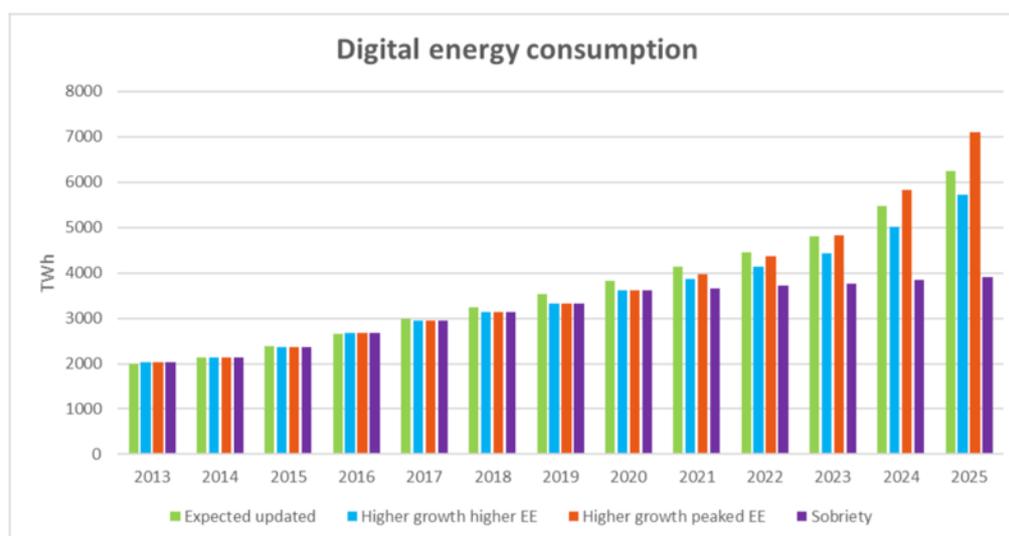


Figure 44. Évolution 2013-2025 de la consommation énergétique du numérique en TWh =© The Shift Project (à partir des données publiés par Andrae et Edler, 2015).

- **Le développement des ENR** (mais aussi du nucléaire car il est décarboné pour certains scénarios (pathways) cités par le GIEC) **et de l'usage de l'électricité** : une partie des acteurs

¹³⁶ Rapport *Lean ICT*, The shift project, *op.cit.*

¹³⁷ *Idem.*

du numérique va dans le sens du développement des EnR dans son mix énergétique mais cela concerne uniquement l’approvisionnement des *data centers* de certains grands acteurs du numérique, et reste ainsi anecdotique à l’échelle du bilan global.

- **L’élimination des usages du charbon, la baisse des usages du fuel et du gaz naturel.** Le charbon est encore utilisé pour produire de l’électricité sur la côte Est des Etats-Unis, qui approvisionne notamment les *data centers* de comté de Loudoun¹³⁸, près de Washington DC. On peut également mentionner son usage très répandu en Chine. La plupart des générateurs de secours fonctionnent au fioul, il est envisagé d’en remplacer certains par des générateurs au gaz pour limiter les pollutions de l’air. Certains projets de fiabilisation de l’approvisionnement électrique des *data centers* se fondent sur le développement d’usines de cogénération au gaz, ou exceptionnellement biomasse. Même si en 2017, la production d’électricité avec du charbon n’a représenté que 1.8% en France, celle-ci s’est engagée à fermer les centrales à charbon d’ici 2022.
- **La protection des sols contre l’artificialisation.** Il n’y a pas de positionnement des industries de stockage de données sur cette question. Les déterminants de leurs implantations ne prennent pas en compte cet impératif environnemental.

Il faut noter par ailleurs que les événements climatiques extrêmes auront des impacts sur les infrastructures numériques¹³⁹, à ce jour assez peu anticipés :

- **Pour les réseaux :**
 - o Risque de submersion marine des dorsales internet, pas toutes équipées pour y résister.
- **Pour les *data centers* :**
 - o Inondations et tempêtes : intégrité du bâtiment et des installations informatiques (exemple : Sandy à New York en 2012, Harvey en 2017 au Texas).
 - o Sécheresses et canicules (par rapport au refroidissement) : pression sur les ressources en eau (concurrence des usages), besoins en climatisation croissants donc en électricité.
 - o Fragilisation des réseaux électriques avec les événements extrêmes : coupures croissantes et recours plus fréquents aux installations de secours.
- **Et en cascade, pour les territoires :**
 - o Aggravation par les *data centers* des phénomènes d’îlot de chaleur urbain (ICU).
 - o Besoins de priorisation sur les besoins électriques, sur les besoins en eau.
 - o Recours croissant aux infrastructures de secours occasionnant des pollutions de l’air (fuel) et des émissions de CO2 (fioul et gaz) supplémentaires.

Exploitation des ressources naturelles, pollutions et impacts sociaux

Au-delà de la production d’émissions carbone et de la question de l’épuisement des ressources, le secteur numérique a des impacts négatifs sur la planète :

- Destructions de paysage et accaparement de terres (Congo, Brésil, Chine...) pour l’extraction des terres rares et des métaux nécessaires à la production des terminaux informatiques, mais aussi pour leur mise en décharge (Ghana, Inde).
- Pollutions de l’air et des sols (Chine).
- Consommations d’eau massives pour l’extraction et pollution des nappes phréatiques.

Quelques chiffres cités par Guillaume Pitron dans son ouvrage sur les métaux rares¹⁴⁰ illustrent cela: « Chaque année, l’industrie électronique consomme 320 tonnes d’or et 7500 tonnes d’argent, accapare 22% de la consommation mondiale de mercure (soit 514 tonnes) et jusqu’à 2,5% de la consommation

¹³⁸ Le comté de Loudoun, avec notamment la ville d’Ashburn, est une des plus grandes concentrations mondiales de *data centers*.

¹³⁹ Voir <http://ix.cs.uoregon.edu/~ram/papers/ANRW-2018.pdf> pour une évaluation des impacts de la montée des eaux sur les réseaux et *data centers* des Etats-Unis.

¹⁴⁰ Pour plus de détails, voir notamment l’ouvrage de Pitron Guillaume, 2018, *La guerre des métaux rares. La face cachée de la transition énergétique et numérique*, op.cit.

de plomb. La fabrication des seuls ordinateurs et téléphones portables engloutit 19% de la production globale de métaux rares tels que le palladium et 23% du cobalt. »

Le secteur numérique a aussi des impacts sur les populations

- Conditions de travail indigne des populations locales
- Pas d'impact économique local positif de ces activités (les bénéfices ne sont pas réinvestis localement)

A noter que la surconsommation numérique revient à l'Amérique du Nord, l'Europe occidentale et le Japon avant tout, mais les conséquences environnementales et sociales se trouvent en Asie, en Afrique et en Amérique du Sud. Des impacts géopolitiques accompagnent ces phénomènes et des nouvelles dépendances s'instituent entre pays perpétuant l'échange écologique inégal et un rapport « colonialiste ».

L'urbanisation du monde

La population mondiale suit une croissance projetée assez justement dans le scénario moyen proposé par le démographe canadien Nathan Keyfitz dès les années 1990, puisqu'elle devrait atteindre un maximum de 10 milliards de terriens et terriennes d'ici la fin du 21^{ème} siècle.

Population: stability in the prospect for stabilization

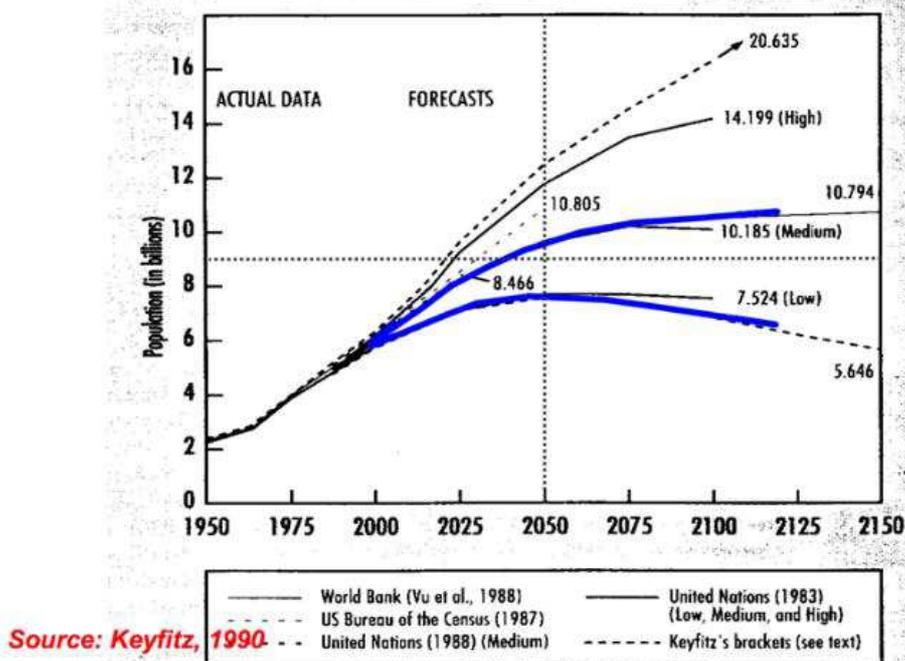


Figure 45. Projections de la population mondiale =© Keyfits (1990) et Criqui (2018).

Ce scénario, également porté par l'ONU, se double d'une urbanisation croissante de la population puisqu'elle sera urbaine à 85% dès 2050, soit un rythme de 70 millions d'urbains additionnels chaque année d'ici là. En parallèle, l'ONU souligne que les villes sont aussi les territoires qui vont le plus souffrir du réchauffement climatique : vagues de chaleur, inondations sur les côtes et dans les terres, nouveaux vecteurs épidémiologiques, pollution de l'air, stress hydrique... Cette croissance démographique viendra alimenter une partie de la croissance du secteur numérique, et concentrer ses infrastructures dans les territoires urbains et périphériques attenants.

Un effet de rattrapage numérique est à attendre dans les pays aujourd'hui peu connectés, en effet de nombreux habitants de la Terre n'ont pas encore accès à l'internet et au numérique ; ainsi on considère que près de la moitié de la population mondiale ne dispose pas d'un accès à Internet.

La persistance du « solutionnisme technologique »

Malgré ses impacts environnementaux nombreux, le numérique continue de se développer à une vitesse vertigineuse. L'internet des objets massif, le *Big Data*, les véhicules autonomes connectés à des data centers (*edge* et/ou *cloud*) et reposant sur des services d'intelligence artificielle et de *blockchain* font partie des scénarios à la mode.

Les prévisions de déploiement d'objets connectés sont délirantes et très variables. 35 Milliards d'objets en 2030 (Institut Idate¹⁴¹), 125 Milliards (IHS Markit¹⁴²), jusqu'à l'équipementier Cisco qui prévoit 500 milliards d'objets connectés à Internet en 2030.¹⁴³ Cisco estime aussi que d'ici 2022, plus de la moitié de toutes les connexions réseau IP dans le monde seront le fait d'appareil IoT ou M2M (*machine to machine*), détrônant les connexions IP depuis les ordinateurs portables ou les smartphones¹⁴⁴. Cette électronique embarquée est de plus un facteur d'obsolescence accélérée de ces objets et équipements.

Malheureusement, ce déploiement numérique massif ne compense pas encore pour l'instant les impacts associés à d'autres domaines : le IT4Green (IT for Green). La contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux reste encore à clairement démontrer. Une étude menée pour Ademe¹⁴⁵ a notamment permis suite à une revue bibliographique poussée de l'état de l'art, de constater une grande hétérogénéité entre les différents documents étudiés, une grande disparité dans les choix méthodologiques effectués, et des faiblesses nombreuses qui constituent de véritables freins à la consolidation des données et des résultats scientifiques.

C'est également Jonathan Koomey, chercheur de l'université de Stanford, et spécialiste mondial reconnu de l'impact énergétique du numérique, qui affirme que les discours inflationnistes et technologiquement isolationnistes ont pu, par le passé, mener à un surdimensionnement infrastructurel dommageable. Il cite notamment le surinvestissement massif en fibre optique aux États-Unis, basé sur un chiffre faux, répété sans être vérifié, dans la seconde moitié des années 1990 et qui a précipité une obsolescence infrastructurelle¹⁴⁶.

La multiplicité des chiffres qui nourrissent la prédiction sont souvent très discutables, voire tout simplement du *bullshit* (BS) nous dit Jonathan Koomey, affirmant : « In fast changing fields, like information technology, BS refutations lag BS production more strongly than in fields with less rapid change. »¹⁴⁷ En effet, la réfutation de données erronées est toujours complexe et en retard par rapport aux effets d'annonce de ces mêmes données notamment dans le champ de la prospective des technologies de l'information où les changements sont très rapides.

Le récit dominant de la *smart city* relève aujourd'hui d'une démarche qui fait quasi entièrement reposer la résolution de problèmes urbains complexes sur les technologies de l'information et de la communication : mobilités, pollution de l'air, gestion des réseaux d'eau ou d'électricité... Cette approche techniciste et computationnelle semble également être un des principaux outils du processus de néo-libéralisation des villes¹⁴⁸, via le déplacement de la maîtrise des données urbaines des autorités publiques vers les entreprises du numérique qui participent et qui exploitent les données qu'elles concourent à produire à des fins marchandes.

¹⁴¹ Institut IDate : <https://fr.idate.org/> [consulté en ligne le 5 novembre 2018].

¹⁴² Howell Jenalea, 2017, « Number of Connected IoT Devices Will Surge to 125 Billion by 2030, IHS Markit Says » <https://technology.ihs.com/596542/number-of-connected-iot-devices-will-surge-to-125-billion-by-2030-ihs-markit-says> [consulté en ligne le 5 novembre 2018].

¹⁴³ MacGillivray Carrie et Turner Vernon, 2017, « IDC FutureScape: Worldwide Internet of Things 2018 Predictions », Web Conference: Tech Buyer. <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=AP43372517> [consulté en ligne le 7 mars 2018].

¹⁴⁴ Cisco, 2018, IoT : <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-l-iot-monte-en-puissance-avec-la-gestion-de-parcs-automobiles-73752.html> [consulté en ligne le 13 mars 2018].

¹⁴⁵ Tinetti Benoit, Duvernois Pierre-Alexis, Le Guern Yannick., Berthoud Françoise, Charbuillet Carole, Gossart Cédric, Orgerie Anne-Cécile, Lefèvre Laurent, de Jouvenel François, Desauvay Cécile, Hébel Pascale, 2016, *Potentiel de contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux : Etat des lieux et enjeux pour la prospective* – Rapport Final ADEME, 145 pages. <https://www.ademe.fr/potentiel-contribution-numerique-a-reduction-impacts-environnementaux> [consulté en ligne le 5 février 2017].

¹⁴⁶ Jonathan Koomey, « Talking Sense About Bitcoin Electricity » 2018, <http://www.koomey.com/post/179556571967> <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=AP43372517> [consulté en ligne le 3 janvier 2018].

¹⁴⁷ *Idem*.

¹⁴⁸ Morozov Evgeny et Bria Francesca, 2018, *Rethinking the Smart city, Democratizing Urban Technology*, Rosa Luxemburg Stiftung, Rapport, New York.

Les visions d'avenir des *big tech* loin d'infléchir la tendance « capitalocène¹⁴⁹ » globale vers une adaptation de l'empreinte écologique des humains à la capacité de charge de la planète¹⁵⁰ poursuit une perspective marquée au sceau du solutionnisme technologique. Pourtant des récits urbains et spatiaux alternatifs à celui de la *smart city* existent et se propagent, où les technologies de l'information et de la communication véhiculent des visions plus techno-critiques, *low tech*, distribuées, respectueuses des libertés, éco-responsables et décroissantes de la ville informationnelle et communicationnelle, à la limite de la fiction et de l'utopie parfois, pour envisager autrement les liens entre le numérique, la ville et le territoire.

7.2 Tendances émergentes

Mouvements de réappropriation citoyenne et relocalisation des infrastructures de réseaux

Un mouvement social, technique et économique profond a émergé depuis le début des années 2000. Pour les réseaux de services urbains, notamment l'eau et l'électricité, des alternatives au modèle de centralisation historique ont pris la forme de centrales de productions et de réseaux de plus petites échelles (très différents de ceux du début de l'histoire de l'électrification) et répondent à des enjeux visant, dans la grande majorité des cas, à promouvoir un mix énergétique diversifié et décarboné, et parfois une gouvernance plus locale et démocratique, ainsi que des comportements plus sobres et décroissants. L'économiste Jean-Claude Berthelémy a transposé l'analyse des communs aux réseaux électriques décentralisés. Il a montré que l'intérêt croissant pour la relocalisation des productions et les mini-réseaux, peut être « interprété comme un exemple d'application des idées développées par Elinor Ostrom sur l'apport des modes de gouvernance polycentriques dans la résolution de la tragédie des communs » (Berthelémy 2016 : 85-106).

Pour le numérique, les initiatives en faveur d'une gestion plus décentralisée ont toujours existé, et se sont développées ces dernières années.

Concernant les micro-réseaux numériques distribués, l'hétérogénéité et la diversité infrastructurelle domine en termes :

- d'interconnexion,
- de gouvernance
- de fonctionnement technique (hard ou software)

Dans la famille des grands ou macro-systèmes techniques, le réseau de fibre est très différent du réseau électrique qui est lui beaucoup plus centralisé et a bénéficié d'un déploiement sur l'entièreté du territoire, comme service public au lendemain de la seconde Guerre Mondiale. L'histoire des réseaux télécoms et l'installation de la fibre à partir de la fin des années 2000 n'ont pas favorisé un déploiement aussi vaste, égalitaire et maîtrisé. Beaucoup d'entreprises télécoms ont installé leurs infrastructures (fibre et fibre noire) en fonction de la rentabilité du marché, favorisant les grandes métropoles, au détriment des territoires ruraux et autres zones blanches.

Le grand système technique numérique pense l'interconnexion de façon très centralisée (l'interconnexion est celle des grands opérateurs). Différemment, les réseaux distribués s'appuient sur les animateurs ou utilisateurs du réseau, ce sont eux qui font évoluer le système technique dont le périmètre est extensible.

Pour l'électricité, deux idéologies s'affrontent. D'un côté, les défenseurs du réseau historique prônent l'intégration des énergies renouvelables dans le système technique existant, via le réseau intelligent, dans une continuité technologique et culturelle macro-infrastructurelle. De l'autre côté, se dessine un changement de paradigme, et une rupture technologique et sociale qui passe par l'expérimentation de

¹⁴⁹ Moore Jason W. (éds), *Anthropocene or Capitalocene ? : Nature, History, and the Crisis of Capitalism*, PM Press, 2016.

¹⁵⁰ Jackson Tim, *Prosperité sans croissance : La transition vers une économie durable* [« Prosperity Without Growth: Economics for a Finite Planet », 2009], De Boeck, 2010.

nouveaux systèmes techniques, les plus distribués et indépendants possibles des grands réseaux électriques existants¹⁵¹.

Pour le numérique, il s'agit d'envisager des grappes de micro-réseaux numériques distribués et interconnectés, dans la mesure où les données sont produites et partagées par les utilisateurs. Il s'agit de créer des réseaux parallèles, plus neutres, sans filtre où les données personnelles sont protégées. Dans ce cas, chaque unité doit maximiser ses capacités en termes de connexion, de gestion, de contenu et de stockage, afin d'assurer une autonomie de fonctionnement. Par ailleurs, l'autosuffisance énergétique des réseaux alternatifs numériques est un sujet encore très peu documenté, la majorité sont connectés aux réseaux électriques traditionnels, à l'exception des quelques expérimentations de petites échelles.

A noter par ailleurs que la petite échelle ne suffit pas à construire une alternative socio-technique soutenable (technologie robuste, non émettrice de gaz à effet de serre, baisse des consommations). Ainsi les micro-réseaux électriques comme numériques, ne sont pas forcément *low tech*, à l'exemple de la blockchain.

Un internet *low-tech*

La notion de *low-tech* ou basses technologies a été développée notamment par Philippe Bihoux dans son ouvrage *L'âge des low-techs*¹⁵². Cette notion recouvre plusieurs dimensions :

- identifier les techniques les plus sobres en consommation et énergie grise et adaptées aux besoins
- favoriser les technologies réparables, recyclables, modifiables
- développer des approches écosystémiques

Penser un Internet *low-tech* passe par plusieurs éléments : construire le matériel, le réparer, le rendre moins consommateur d'énergie sur toute la ligne, le recycler...

- Le projet GreenTouch a prouvé qu'il était possible de faire fonctionner un Internet 1000 fois moins consommateurs d'énergie en actionnant des leviers d'éco-conception, y compris pour lutter contre l'obésiciel (des logiciels de plus en plus consommateurs de ressources)¹⁵³, d'efficacité énergétique concernant aussi bien les réseaux, les terminaux que les *data centers*. Des services comme Greenspector par exemple aident à concevoir des applications moins énergivores, usant moins les batteries.
- Kris de Decker, rédacteur du site Low-Tech magazine, teste lui avec succès la faisabilité d'un site internet *low-tech*¹⁵⁴ tout d'abord en pensant un web-design moins énergivore avec des pages statiques (le site s'actualise une fois par jour, et les nouveaux commentaires apparaissent), des images compressées, mais aussi un hébergement maison sur un serveur alimenté à l'énergie solaire couplé à une simple batterie de stockage. Le mouvement des FabLab, hackerspace, ressourceries et repair café favorisent également la réparation, et le reconditionnement de matériel informatique.

Souveraineté numérique, défense de la vie privée : crispations croissantes autour des données

La localisation, l'accès, le traitement et la protection des données numériques constituent des sujets hautement politiques, aussi bien pour des Etats qui souhaitent protéger leurs intérêts nationaux, que pour les citoyens et citoyennes qui veulent protéger leur vie privée et leurs libertés; ces deux intérêts

¹⁵¹ Lopez Fanny, 2019, *L'ordre électrique, infrastructures énergétiques et territoires*, Editions Metiss Press.

¹⁵² Bihoux Philippe, 2018, « Osons une innovation *low tech*, sobre et résiliente ! », <https://entreprisecontributive.blog/2018/01/07/osons-une-innovation-low-tech-sobre-et-resiliente-par-philippe-bihoux/> [consulté en ligne le 18 février 2018].

¹⁵³ Berthoud Françoise, Drezet Éric, Lefevre Laurent et Orgerie Anne-Cécile, 2015, "Le syndrome de l'obésiciel : des applications énergivores", <https://interstices.info/le-syndrome-de-lobesiciel-des-applications-energivores/> [consulté en ligne le mars 2017].

¹⁵⁴ De Decker Kris, 2015, "How to Build a Low-tech Internet", <https://solar.lowtechmagazine.com/2015/10/how-to-build-a-low-tech-internet.html> [consulté en ligne le 10 novembre 2017].

pouvant être contradictoires dans le cas où l'Etat espionne ses propres citoyens. Les scandales récents sur la possible intervention russe dans les élections américaines, ou le scandale Facebook / Cambridge Analytica sont les émergences récentes de cette double problématique.

Dès 2015, la Russie a par exemple obligé les organismes étrangers à stocker les données personnelles des ressortissants russes sur le territoire russe¹⁵⁵. Quand Google et Apple ont obtempéré, LinkedIn a résisté et se voit désormais banni du pays. D'autres pays tentent de faire de même. Cela implique soit un hébergement dans les *data centers* existants sur le territoire, soit d'en construire un en propre.

En Europe, la RGPD est venue encadrer la gestion des données, sans provoquer à ce stade une croissance de *data centers* nouveaux. Par ailleurs, une fronde anti-GAFAM se fait jour en Europe aussi bien aux niveaux politiques avec Margrethe Vestager¹⁵⁶, commissaire européenne à la concurrence, qu'au niveau de la société civile avec par exemple la campagne de la Quadrature du Net pour « dégoogliser l'Internet ».

Ces différentes dimensions du traitement et du stockage des données sont complexes et leurs impacts sont difficiles à anticiper, mais elles sont à même d'influencer la géographie des *data centers* dans le futur.

¹⁵⁵ Loi Fédérale russe du 21 Juillet 2014 N 242-FZ sur "les changements apportés aux certains actes législatifs de la Fédération de Russie précisant les modalités de traitement des données personnelles sur les réseaux informatiques et de télécommunications"

¹⁵⁶ http://europa.eu/rapid/press-release_STATEMENT-17-1806_en.htm [consulté en ligne le 10 novembre 2017].



7.3 Prospective : 3 mondes numériques possibles

Les réflexions, débats et réglementations internationales sur le numérique laissent poindre une perspective plutôt centralisatrice dont le scénario 1 extrapole la trajectoire même si différentes tendances pourront continuer de coexister dans le scénario 2. A l'opposé du scénario 1, le scénario 3 marque une rupture radicale. L'ensemble des scénarios repose sur des chiffres de prospective mentionnés précédemment.

Scénario 1 : Croissance et ultracentralisation numérique

C'est un scénario qui marque le renforcement monopolistique des *big tech*, les grandes entreprises du numérique, et qui va voir se démultiplier le trafic internet : 100 milliards d'objets connectés pour 2030 (IoT), une augmentation des besoins de stockage et corrélativement des besoins électriques du secteur numérique, consommant comme prédit 51% de l'électricité mondiale en 2030.

Une architecture internet de plus en plus centralisée, sécurisée et contrôlée

C'est l'achèvement du passage du modèle horizontal à vertical, du système « bazar à cathédrale ». L'architecture d'internet devient un ensemble de réseaux dominés par des fins liées à la financiarisation des échanges, à la plateformes des services, à la surveillance et à la cyber-sécurité. L'augmentation des systèmes de filtres marque la fin de la neutralité du net. Ses marges sont criminalisées.

Le modèle des architectures propriétaires l'emporte, les réseaux supportent des machines d'un nombre de constructeurs de plus en plus réduit, pour un meilleur contrôle des flux¹⁵⁷. C'est le renforcement de la vision d'internet comme une autoroute de l'information où domine un modèle technique et économique favorisant les relations entre clients et puissant serveurs monopolistiques.

La gouvernance d'internet est laissée aux mains des acteurs économiques privés avec un fort lobbying des *big tech* qui maintiennent leur pression financière sur le politique avec le renforcement des monopoles existant, notamment sur les données. Cette logique de croissance favorise la centralisation et la consolidation du marché autour des *GAFAM* et des *BATX* dont la puissance capitaliste domine et fabrique l'offre. Il y a très peu d'acteurs de taille intermédiaire, le marché de la colocation s'est aussi consolidé autour d'une dizaine d'acteurs mondiaux.

Spatialité LTS ou la victoire de l'autoroute de l'information

Le système technique numérique suit la logique des grands systèmes techniques (ou LTS¹⁵⁸), il y a historiquement une corrélation entre la grande échelle, les économies qu'elle permet et la centralisation. Avec la croissance du Cloud, largement aux mains des *GAFAM*, deux phénomènes sont attendus. D'abord la multiplication de *data centers* de très grande échelle, tout en développant un système réticulaire associant des objets de plus petites échelles (de colocation ou pas), mais aussi du *edge*.

Les *Big Tech* sont devenus des acteurs majeurs de l'urbanisme et de l'aménagement avec la multiplication de quartiers urbains connectés. Si la filiale urbanisme de Google, *Sidewalk labs*, a été une des premières avec la réalisation du quartier Quayside à Toronto en 2020, les *GAFAM* ont fortement investi les marchés de l'immobilier et de la gestion urbaine, notamment des espaces publics et des trottoirs (*the curb*). Idem pour la production énergétique, Google, Facebook et Microsoft se sont engagés dans la production et la distribution énergétique, devenant des acteurs majeurs du secteur avec le développement de centrales solaires et éoliennes de grande échelle. Ils se sont également spécialisés dans la vente de solutions *micro-grids* et sont devenus des acteurs majeurs du développement de l'autoconsommation individuelle et collective (notamment aux Etats-Unis, mais aussi en Europe).

¹⁵⁷ Francesca Musiani et Valérie Schafer Métropolis, « Le modèle internet en question (années 1970-2010) » in *Flux*, 2011/3 n° 85-86, pp. 62 à 71.

¹⁵⁸ Joerges Bernward, « Large Technical Systems : Concepts and Issues », in Hugues T. P., Mayntz R. (dir.), *The Development of Large Technical Systems*, Francfort, Campus Verlag, 1998, pp. 9-32.

D'un point de vue territorial, certaines zones rurales se sont dédiées à l'accueil de très *grands data centers* (à l'exemple de la ferme des 1000 vaches) avec à proximité le développement de centrales d'EnR ou de centrale biomasse à l'exemple d'ezCloud (un projet de *cloud computing* qui utilise le méthane des fermes). De nouveaux territoires agro-numériques ont émergé avec la systématisation de la récupération de la chaleur pour les serres, notamment dans les régions Centre Val de Loire, Bretagne et dans le Grand Est où les normales climatiques de chaleurs sont restées en dessous de 35°C.

Dans les métropoles et les centres urbains denses, des *data centers* verticaux ou des micros *data centers* se sont immiscés dans de nombreuses dents creuses, ainsi que dans des programmes immobiliers classiques (logement, commerce, tertiaire, culturel) afin de satisfaire les besoins de l'IoT (faibles latences, relais permanents). En Ile de France, la Société du Grand Paris a notamment favorisé la création de 26 *data centers* dans les nouvelles gares de métro (enterrés/semi enterrés). Les *data centers* sont aussi venus se loger dans de nombreux immeubles vacants en deuxième couronne : centres commerciaux désertés, zones d'activités obsolètes, bureaux vides.

Énergie : la fuite en avant

Ce scénario, marque la victoire de l'idéologie de la croissance verte et de la vision grands systèmes techniques. C'est à dire la grande échelle ; un mécanisme spécifique de développement favorisant leur accroissement ; une consommation d'importante quantité d'énergies fossiles ou fissiles ; le maintien de l'échange écologique inégal (extraction de terres rares et fabrication dans des pays où le droit du travail et les règles environnementales font défaut); la production de fortes émissions de CO2 ou de déchets ultimes ; la complexité d'ensembles et de sous-ensembles fonctionnant en réseaux, souvent opaques et gérés de façon très centralisée par des experts ; un contrôle et une régulation des flux en temps réel. Corrélés à la croissance de la société thermo-industrielle, les macro-systèmes techniques assurent la permanence technique et culturelle d'entités infrastructurelles qui sont le socle de l'expansion des grandes puissances économiques mondiales. Il y a des économies d'échelles et financière mais pas d'économie énergétique, aucune baisse de consommation globale n'est observée pour ce secteur malgré la forte utilisation d'EnR. Parmi les effets rebonds, on observe une augmentation globale des consommations électriques du secteur et des émissions de CO2. Ce scénario marque l'échec de la maîtrise des émissions de CO2 et une augmentation de la température planétaire autour de +2,5°C en 2050¹⁵⁹. Dans les zones urbaines, on constate d'importants pics de chaleur et de fortes hausses de consommation et des tensions électriques sur le réseau de basse et moyenne tension.

Scénario 2 : Stabilisation du STN et diversité infrastructurelle : quête d'une difficile résilience

Dans ce scénario, le système technique numérique vise une stabilisation et une maîtrise de ses consommations avec le développement d'une diversité infrastructurelle favorisant un développement numérique à deux vitesses, d'un côté les *big tech* et de l'autre des infrastructures de plus petite échelle, plus collaboratives, notamment soutenues par des investissements publics.

Une architecture de réseau plus hybride et distribuée

Le système technique numérique se diversifie en termes d'architectures réseaux, d'infrastructures et de contenus. Il admet plus d'hétérogénéité, de coexistence et d'hybridations. Tout comme la Chine et la Russie¹⁶⁰ ont développé leurs propres services et applications web (à visée de contrôle domestique et de souveraineté nationale) à côté du web mondial, l'Alternet propose des services alternatifs aux Big Tech, notamment via Framasoft en France, à l'opposé de la visée de censure des systèmes russes et chinois, mais dans une optique de souveraineté locale et citoyenne sur un internet libre et ouvert.

¹⁵⁹L'augmentation des émissions annuelles de gaz à effet de serre (GES) a été continue. En 2025, le monde émettait presque 6% de plus de GES qu'en 2015. Voir : https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2017/12/note_danalyse_les_indc_et_le_budget_carbone_the_shift_project_0.pdf

¹⁶⁰ Limonier Kevin, 2017, « Internet russe, l'exception qui vient de loin », *Le monde diplomatique*. <https://www.monde-diplomatique.fr/2017/08/LIMONIER/57798>

Suite au débat sur la consommation exponentielle de la bande passante et aux effets énergétiques du numérique, une réglementation à l'échelle européenne et nationale a été votée en faveur de la taxation des « Net Goinfres ». Elle a eu comme conséquence de réduire le poids des vidéos et des photos échangées, des sites internet et des publicités d'une part ; et à favoriser le transport local de données grâce à un recours croissant aux systèmes pair-à-pair, entre utilisateurs, mais aussi à plus de stockage de données sur les terminaux utilisateurs (ordinateurs) au lieu d'un recours constant aux données sur cloud (exemple : Spotify, Deezer), ce qui a réduit au passage les coûts de peering des FAI.

On voit également l'émergence d'un acteur public national du stockage et traitement de données, décentralisé en région, pour limiter les dérives monopolistiques d'une poignée d'acteurs privés.

Des *data centers* plus divers et mieux intégrés

Dans ce scénario, il y a une baisse du développement des *data centers*, notamment ceux de très grandes échelles (les *hyperscales*) en zone rurale car leur consommation électrique est trop élevée, leur impact foncier trop lourd et la mutualisation énergétique difficile. C'est également la question des risques climatiques et terroristes qui favorise la recherche d'une résilience et d'une redondance à plus petite échelle. Les *data centers* de petites dimensions se sont partout multipliés car la qualité du réseau le permet, et leur intégration spatiale est plus aisée à cette échelle. Ces *data centers* deviennent parfois des lieux de médiation numérique, pour un apprentissage aussi bien des ressources et contenus d'Internet, que de son fonctionnement technique et de ses infrastructures. La tolérance à la panne des utilisateurs est plus grande car ils et elles en comprennent les raisons et les implications. Les campagnes d'informations en lien avec les problématiques de santé publique sur les dangers de l'ultra connexion et des effets rebonds négatifs du numérique sur l'économie (destruction des emplois, désocialisation, externalisation des bénéfices) ont porté leurs fruits.

La gouvernance est plus locale, les communes, EPCI et régions se sont fortement emparés de cette industrie du stockage et traitement de données, et de ces possibles apports pour les systèmes énergétiques locaux (avec des centrales biomasse partagées, de la récupération de chaleur, etc.). Ce souci écosystémique a favorisé de nouveaux types d'équipements hybrides : fablab, tiers lieux avec des espaces collectifs de stockage et de calcul de données associé à des dynamiques de wifi citoyens et de micro réseau d'énergie (comme à Red Hook) notamment dans les territoires ruraux où la connexion était fragile. Les *data centers* sont devenus de nouveaux lieux névralgiques des territoires. Dans les zones urbaines, la baisse d'activités de la logistique (à la faveur de l'économie plus nationale, locale et circulaire, mais aussi à cause de la drastique baisse des échanges internationaux suite à la crise financière de 2021) a favorisé un retour du commerce en ville et en proche périphérie. De nombreuses zones d'activités et commerciales périurbaines sont devenues obsolètes et ont été transformées en ZA numériques.

On observe un développement numérique qui suit deux logiques. La première est très structurée autour des collectivités qui ont repris la main – depuis les lois de décentralisation de 2022 – sur ce bien commun qu'est le numérique (à l'image des communautés et des coopératives énergétiques). Dans une démarche qui allie souveraineté des données et souci écosystémique, s'est produit un transfert des richesses du secteur des *data centers* dans l'économie locale (production, service, maintenance) ainsi que des économies d'énergie et une recherche de sobriété. La seconde logique suit le modèle pair-à-pair et une topologie de l'Internet pré-commercial, où reflorissent des communautés d'internautes qui développent des alternatives aux géants de la recherche et du partage en ligne (réseau sociaux décentralisés, moteur de recherche et contenu P2P). Mais le modèle est très fragile car si les modèles P2P existent et qu'une partie du stockage a été relocalisé, les grands acteurs du marché IT ont gardé la main, malgré la crise, et continuent de poser leurs conditions (notamment sur le *cloud*). En effet, les grandes entreprises continuent de solliciter dans la majorité des cas les puissants industriels qui dominent le marché à l'échelle internationale sur le calcul, le stockage de l'information et la gestion du trafic. L'équilibre de la coexistence des acteurs publics, du commun et privés, ainsi que du rapport local/global reste très fragile et favorise le développement de deux internets.

Énergie : décroissance électrique, une maîtrise fragile mais des politiques publiques ambitieuses
Le secteur numérique a été contraint de baisser ses émissions de CO₂ de 5% par an¹⁶¹ entre 2025 et 2050, c'est à dire revenir à la consommation énergétique globale (produire les équipements et les faire marcher) du secteur en 2013 qui était de 2000 TWh (pour 3200 TWh en 2018 et 7000 TWh prévu à 2025¹⁶²).

Des réglementations ont permis de contraindre des trafics fortement consommateurs de bandes passantes en limitant certains usages et en taxant ceux qui les proposent. Tout un pan des services (messagerie, blog, navigation, médias sociaux) sont devenus beaucoup plus économe et l'obsolescence programmée fortement pénalisée.

Les localisations *des data centers* sont désormais définies en cohérence avec les Plans Climat Air Energie Territoriaux (PCAET) qui ont désormais inclus les dimensions numériques, ainsi qu'avec les plans locaux « foncier, urbanisme et énergie » qui orientent l'implantation des *data centers* en fonction des potentiels de transformation des territoires, de récupération de chaleur et de connectivité. L'intérêt est de rationaliser et de contrôler leurs implantations urbaines, tout en favorisant une efficacité énergétique territoriale. Par ailleurs, les installations énergétiques des *data centers* sont systématiquement mutualisées avec d'autres programmes.

Scénario 3 : Ultradécentralisation numérique : la fin des data centers ?

Il s'agirait de construire un internet locavore et intermittent. Quand l'énergie est disponible, l'internet est actif. C'est une sorte de *survivalisme IT* et *low tech* qui se mettrait en place dans un scénario d'effondrement. C'est le retour aux principes fondateurs d'internet (horizontal et distribué) fonctionnant en grande partie sur le bon vouloir des communautés d'intérêts, doublés d'une approche technique *low tech* dans le contexte d'un basculement climatique très avancé.

Une architecture internet intermittente

Le Wifi pourrait se développer sur de plus longues distances, avec des portées pouvant aller jusqu'à 100 km¹⁶³. Ce réseau permettrait aux utilisateurs de communiquer entre eux et de consulter les sites Web configurés sur des serveurs locaux¹⁶⁴. Les réseaux tolérants aux coupures ou à tolérance de délai (*Delay* ou *Disruption Tolerant Networks* - DTN) seraient également développés. Ils supporteraient ainsi des coupures et des latences très longues. Différemment du modèle toujours actif des réseaux traditionnels, ces réseaux DTN sont basés sur une communication asynchrone et une connectivité intermittente¹⁶⁵. Ils surmontent les problèmes de connectivité intermittente et de longs délais en utilisant la commutation de messages en différé. Les informations sont transférées d'un emplacement de stockage sur un nœud vers un emplacement de stockage sur un autre nœud, le long d'un chemin qui atteint finalement sa destination¹⁶⁶. Ces réseaux sont notamment utilisés pour les communications spatiales. Basés sur le principe de mules et de messages autonomes (*bundles*), ils reposent sur du matériel disposant de grandes capacités de stockage afin d'assurer l'acheminement des données malgré les coupures de réseaux. Différents déploiements ont été proposés pour la surveillance animale (réseau *zebranet*) ou la fourniture d'accès internet à des populations loin des infrastructures réseaux grâce à des équipements mobiles (motos neige, réseaux de bus ou de facteurs à moto). Ainsi l'infrastructure de transport peut se substituer à une liaison Internet sans fil. Les réseaux Daknet, Saami, DieselNet, et KioskNet, par exemple, utilisent des équipements de transport (bus, motos) comme mules de données dans de nombreux villages et les villes dépourvus de connectivité réseau.

¹⁶¹ Rapport Lean ICT, The Shift project, *op.cit.*

¹⁶² *Idem.*

¹⁶³ Par le biais de modifications de la couche de contrôle d'accès au support (MAC) dans le protocole de réseau et par l'utilisation d'amplificateurs et antennes directives. La plus longue liaison Wi-Fi non amplifiée est une connexion sans fil point à point de 384 km entre Pico El Águila et Platillón au Venezuela, établie il y a quelques années

¹⁶⁴ Pour une connexion à l'Internet, un réseau Wi-Fi longue portée doit être connecté à un « nœud de liaison » ou un « nœud de passerelle » de l'internet (DSL, fibre ou satellite).

¹⁶⁵ Ces réseaux possèdent leurs propres protocoles spécialisés, superposés aux protocoles inférieurs et n'utilisent pas le protocole TCP.

¹⁶⁶ Contrairement aux routeurs Internet traditionnels, qui stockent uniquement les paquets entrants pendant quelques millisecondes sur des puces de mémoire, les nœuds d'un réseau à tolérance de délai disposent d'un stockage persistant (tel que des disques durs) pouvant contenir des informations pendant de longues périodes.

Chaque véhicule « mule » est équipé d'un ordinateur, d'un périphérique de stockage, d'un nœud Wifi mobile, et un nœud Wifi fixe est installé dans chaque village. Les courriels envoyés ou les demandes de pages Web sont stockées sur les ordinateurs locaux du village jusqu'à l'arrivée du bus ou des motos qui transmettent les données sortantes ou entrantes.

Ces réseaux à tolérance de délai (utilisés au milieu des années 1990, avec le protocole UUCP), peuvent fonctionner avec un approvisionnement en énergie intermittent et se combinent bien avec des sources d'énergie renouvelables : des panneaux solaires ou des éoliennes ne peuvent alimenter les nœuds du réseau que lorsque le soleil brille ou que le vent souffle, éliminant ainsi le besoin de stockage d'énergie. Un grand nombre d'applications Internet pourraient être adaptées aux réseaux intermittents, telles que la messagerie électronique, le remplissage de formulaires électroniques, le logiciel de blog, la navigation sur le Web, l'interaction avec des sites de commerce électronique, le téléchargement de fichiers (même volumineux) ou les médias sociaux.

Les applications en temps réel telles que la téléphonie Internet, la diffusion multimédia en continu, les discussions en direct ou la vidéoconférence sont impossibles à adapter aux réseaux intermittents, qui fournissent uniquement une communication asynchrone. Bon nombre de ces applications pourraient être organisées de différentes manières. Les conversations vocales ou vidéo en temps réel ne fonctionneront pas, mais il est parfaitement possible d'envoyer et de recevoir des messages vocaux ou vidéo. Et même si la diffusion multimédia en continu n'est pas possible, le téléchargement d'albums de musique et de vidéos reste possible. De plus, ces fichiers pourraient être « transmis » par la technologie Internet la plus basse possible: un sneakernet. Dans un réseau de sneakernet, les données numériques sont transmises « sans fil » en utilisant un support de stockage tel qu'un disque dur, une clé USB, une carte flash, un CD ou un DVD. Avant l'arrivée d'Internet, tous les fichiers informatiques étaient échangés via un sneakernet, en utilisant une bande ou une disquette comme support de stockage.

Un tel système hybride d'applications en ligne et hors ligne resterait un réseau de communication très puissant. Même si nous envisagions un scénario catastrophique dans lequel l'infrastructure Internet plus vaste se désintégrerait, des réseaux de faible technologie isolés resteraient des technologies de communication locales et régionales très utiles. En outre, ils pourraient obtenir du contenu auprès d'autres réseaux distants par l'échange de supports de stockage portables. Il semble qu'Internet puisse être aussi peu sophistiqué que possible ou aussi sophistiqué que nous pouvons nous le permettre.

Spatialité : micro échelle et longue distance

Il y a plus de serveurs et de machines de petites échelles *low tech* localisés chez les usagers et partout où cela est possible des nœuds relais ou de connexion. C'est un changement d'échelle radical avec la démultiplication de micro-infrastructures distribuées, légères et mobiles pour assurer les relais de connexion avec des systèmes wifi de longue distance ou des *data mules*. Des véhicules nouveaux ont été inventés, combinant autonomie énergétique et équipement numérique et covoiturage.

Le trajet des véhicules mules renforce les linéarités commerciales locales, intensifie l'occupation des espaces publics au moment de leur passage, ainsi que le développement de tiers lieux numériques, lieu de réception internet et de réparation, de sociabilité et de travail.

Le temps hors connexion favoriserait les échanges *IRL (in real life)* et le développement de places agora, lieux de discussion, d'animations et de convivialité.

Les grands *data centers* sont devenus des entrepôts obsolètes, mais le matériel a été déplacé et réutilisé pour du stockage de petite échelle et mieux intégrés.

Baisse des consommations et des EnR majoritaire : follow the wind/follow the sun

Ce scénario reposerait sur un modèle entièrement pair à pair – mobile – basé sur de l'*IoT* avec fonction d'hébergement. Les terminaux hébergent des services pour leurs utilisateurs et rendent des services aux utilisateurs voisins en mode « dégradé ». Les services numériques locaux deviennent ainsi la norme, les services internationaux deviennent l'exception. Les Etats et surtout les communautés d'internautes reprennent la main sur leurs services. Certains aspects ont été explorés au Canada avec le projet GreenStar en 2010 – reprenant le principe du *follow the*

wind/follow the sun¹⁶⁷. Le projet GreenStar déploie ainsi un réseau qui ne fonctionnerait que sur des EnR en acceptant les intermittences sur réseau¹⁶⁸.

The GreenStar Network Map

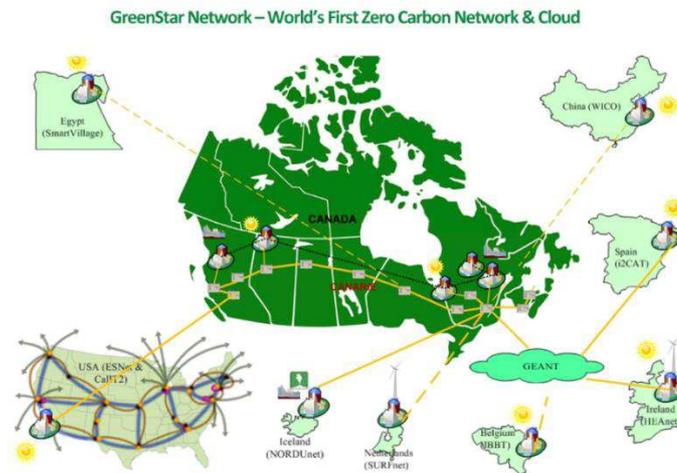


Figure 46. Le réseau internet et cloud de GreensStar =© GreensStar.

En préambule, ce projet canadien cite un rapport réalisé par le gouvernement du Royaume-Uni intitulé : *How climate change could ruin the internet*. Dans ce texte, la secrétaire d'État à l'environnement, Caroline Spelman soulignait que la hausse des températures et le basculement climatique allaient avoir une forte incidence sur la fiabilité des réseaux numériques mais également de distribution d'énergie (fermeture de centrale nucléaire parce que l'eau de refroidissement pourrait être trop chaude, moins de production hydroélectrique à cause des sécheresses, etc.) Dans un scénario d'effondrement, la reconfiguration et le fonctionnement du système technique numérique seraient radicalement différents.

L'Internet tel que nous le connaissons, toujours plus rapide et mobile est le produit d'un approvisionnement énergétique abondant et croissant et d'une infrastructure électrique robuste. Il ne pourra pas survivre si ces conditions changent. C'est ce que montre Kris De Decker ¹⁶⁹ dans son article « How to Build a Low-tech Internet ». Ainsi le serveur internet du site Low Tech Magazine réalisé par Kris de Decker fonctionne sur une architecture à base de processeur basse consommation alimentée par batterie rechargée par panneau solaire. Si l'énergie disponible n'est pas suffisante, le site web est inaccessible.

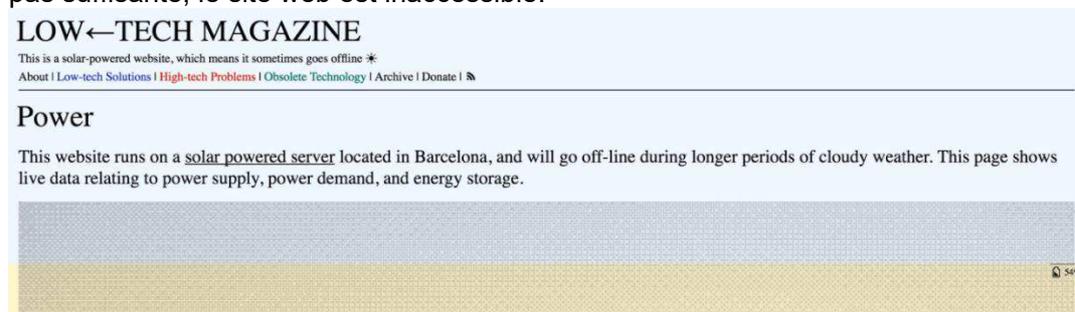


Figure 47. Capture d'écran du site internet réalisé par Kris de Decker, en bas à droite l'indication de son autonomie.

¹⁶⁷ <https://www.glif.is/meetings/2011/rap/arnaud-greenstar.pdf> [consulté en ligne le 5 décembre 2018]

¹⁶⁸ Arnaud St Bill, 2009, « Preparing for Climate Change through Energy Internet and eVehicles », <http://green-broadband.blogspot.com/2011/02/design-principles-for-building-networks.html> Et <https://green-broadband.blogspot.com/> [consulté en ligne le 5 décembre 2018].

¹⁶⁹ De Decker Kris, 2015, "How to Build a Low-tech Internet, <https://solar.lowtechmagazine.com/2015/10/how-to-build-a-low-tech-internet.html> [consulté en ligne le 10 novembre 2017].

8. Recommandations

8.1 Recommandations gouvernance et acteurs

Créer un forum « territoire, énergie, numérique »

Face à la complexité de la question *data center*, à la rapidité de l'évolution du secteur numérique, la faible acculturation des territoires et des collectivités locales au sujet, et les perspectives de développement de *data centers* en France dans les années à venir, il nous semble indispensable de créer un cercle d'échanges et de discussions entre acteurs publics, acteurs de l'aménagement et de l'urbanisme, de l'énergie et opérateurs et gestionnaires de *data centers*, qu'ils soient hébergeurs de colocation, associatifs, GAFAM ou grandes entreprises (via notamment le Gimelec, France data center et l'AGIT), ou chercheur·e·s académiques.

Un tel forum de travail pluridisciplinaire peut être lancé lors d'un événement fondateur qui pose les bases de fonctionnement et les thèmes de travail à approfondir entre acteurs.

Un co-pilotage initial de la démarche par l'Etat nous semble pertinent, afin de donner une tonalité à la fois énergie et aménagement aux réflexions, avec un appui du groupe de chercheurs et chercheuses Eco-Info spécialisé·e·s dans le lien entre numérique et environnement.

Un certain nombre de recommandations détaillées ci-dessous peuvent d'ores et déjà être proposées à la discussion pour ce Forum.

Enrichir l'écosystème numérique avec les hébergeurs et FAI alternatifs

Même si le marché de l'hébergement, comme de l'accès à Internet est aujourd'hui dominé par quelques acteurs majeurs, il nous semble pourtant important de donner une place aux acteurs associatifs et coopératifs de l'Internet, notamment pour les territoires aujourd'hui à la fois les moins bien desservis que ceux qui manquent de compétences numériques et de lien social. Leur faire une place dans le paysage numérique français pourrait permettre de développer une gestion numérique plus locale, plus informée, et surtout, réalisée par ses propres utilisateurs, qui pourraient favoriser des pratiques plus sobres, économes ainsi ajustées aux besoins. Les exemples développés précédemment montrent bien que les enjeux sont multiples, aussi bien techniques qu'économiques et sociaux, et les atouts du développement d'infrastructures numériques alternatives sont nombreux, le premier d'entre eux étant la résilience face aux événements climatiques, les autres étant détaillés dans la première partie du présent rapport.

Les FAI et hébergeurs associatifs, citoyens et coopératifs revendiquent ainsi une place dans l'écosystème numérique et télécoms français pour fournir un internet neutre, ouvert et efficace aux territoires ; notamment dans ceux où l'annonce de la fibre a gelé les investissements sur le cuivre et abaissé la qualité de service et de connexion.

- Les FAI associatifs et coopératifs n'ont aujourd'hui pas d'accès à la fibre des grands opérateurs, pourtant en partie financée par des fonds publics selon les territoires. Ils demandent, via la FFDN¹⁷⁰, la création d'offres activées pour les petits opérateurs dans les RIP et avec Orange. L'amendement Chaize à la loi Elan (du nom du sénateur) proposait ainsi qu'en cas d'absence de fourniture d'accès activé, tout opérateur exploitant des infrastructures de communications électroniques (de la fibre optique) faisait droit aux

¹⁷⁰ Voir la lettre ouverte du 21 janvier /2018 : <https://www.ffdn.org/fr/article/2018-10-21/lettre-ouverte-sebastien-soriano-et-stephane-richard>

demandes raisonnables d'accès activé à ce réseau venant d'autres opérateurs, dans le but de proposer la meilleure couverture possible pour l'utilisateur final. Cet amendement (article 64 ter) visait à accélérer le déploiement de la fibre sur le territoire en permettant aux petits opérateurs d'accéder plus facilement à ces infrastructures, dans les cas où ces réseaux bénéficient de subventions publiques. Il n'a pas été accepté par le gouvernement.

- Sur les wifi citoyens, l'obligation de sécuriser soi-même le partage de son wifi représente un frein majeur pour partager des connexions bien que cela puisse être un vecteur fort d'inclusion numérique. D'une part l'internaute mettant sa connexion à disposition doit garder les traces de ses invités, d'autre part, la loi HAPOPI 2 l'oblige à sécuriser sa connexion, sous peine d'amende ou de coupure.
- Enfin, pour les opérateurs qui développent une offre wifi, des questions se posent sur la disponibilité future des fréquences wifi qui pourraient être rapidement saturées par la croissance prévisible de l'IoT qui fonctionne aussi avec la technologie Mesh. Une piste serait l'ouverture des « fréquences blanches » (fréquences radios non utilisées) en faisant aussi une place aux opérateurs citoyens et associatifs.

Soutenir des réseaux citoyens et coopératifs, c'est aussi soutenir l'hébergement associatif, décentralisé et potentiellement plus frugal, favoriser le développement social et économique local, et permettre une plus grande résilience climatique des territoires.

Lancer un appel à projet pour des territoires d'expérimentation

Dans le livre blanc Numérique et Environnement réalisé par l'IDDRI, la FING et WWF¹⁷¹, la piste 3-4 propose de rendre possible des « territoires d'expérimentation numérique et écologique » (nous rajoutons énergétique), ce qui nous semble intéressant dans l'optique de tester les impacts d'un internet « relocalisé » et plus sobre dans des territoires mal desservis ou souffrant d'exclusion numérique par exemple.

Le livre blanc propose ainsi de :

« Créer – aussi bien en zones urbaines que rurales – des territoires d'expérimentation numérique et écologique pour accueillir les innovateurs qui veulent tester leurs solutions et collaborer étroitement avec les pouvoirs publics, et assurer un partage d'expérience entre ces territoires. Les Territoires d'innovation grande ambition, les Territoires à énergie positive ou ceux qui signeront des Contrats de transition écologique avec l'État pourraient accueillir de tels projets. Ces territoires devraient aussi multiplier les incubateurs, les appels à projets et plus généralement les dispositifs de soutien à l'innovation à la croisée des transitions numérique et écologique. »

Dans l'esprit des permis de faire (loi LCAP, 2016) et des permis d'expérimenter (loi Elan, 2018) pour l'architecture et la construction, certains territoires ou EPCI pourraient candidater à un appel à projet conjoint des acteurs d'Etat (énergie et numérique) afin de mettre en œuvre des projets de médiation et d'apprentissage numérique infrastructurels (réseau et hébergement) permettant à la fois de former des personnes aux métiers du numérique (à l'image des *digital stewards* à Détroit ou New York), d'apporter une meilleure connexion et de meilleurs services localement, tout en prenant en compte l'impact environnemental : réductions des consommations électriques, utilisation d'ENR, réparation et réemploi du matériel informatique, faible empreinte foncière, articulation avec les réseaux de chaleur urbains...

¹⁷¹ https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2018-03/180319_livre_blanc_numerique_environnement.pdf [consulté en ligne le 13 mars 2018].

Créer un service public du numérique et des data centers publics

Il y a aujourd'hui des Sociétés Publiques Locales (SPL) pour le développement du très haut débit en France, comme la SPL Nouvelle Aquitaine THD, et Bourgogne Franche Comté Numérique par exemple. Il y a aussi des syndicats de communes pour déployer les Réseaux d'Initiative Publique (RIP). Le SIPPEREC a ainsi développé plusieurs RIP en Ile-de-France comme THD Europe Essonne ou Irisé.

En revanche, aucune structure publique ou mixte de ce type ne propose des infrastructures ou des services de stockage de données, pour les acteurs publics, la société civile et les citoyens. Pourtant, un besoin de mutualisation, de souveraineté, de proximité et d'intégration aux stratégies foncières et énergétiques locales se fait jour.

Il s'agit donc d'agir sur les compétences et la structuration des acteurs dans les territoires : favoriser l'émergence d'acteurs intermédiaires, éventuellement sous forme de SPL, dans les territoires, offrant des services d'assistance technique pour d'une part, améliorer l'intégration spatiale et énergétique des *data centers* dans les territoires et d'autre part développer et gérer des équipements publics de stockage et de traitement de données mutualisés entre acteurs. Les SPL d'aménagement pourraient, pour certaines, prendre en charge ces nouvelles missions, pour mieux intégrer la problématique des *data centers* dans les projets d'aménagement, dans leurs projets d'équipements publics, mais aussi dans l'accompagnement au développement de tiers-lieux numériques accueillant de petits *data centers* de proximité.

8.2 Recommandations urbanisme / environnement

Favoriser au maximum le recyclage urbain et des bâtiments

Comme le rapport du GIEC cité précédemment le souligne :

« In 2014, the buildings sector accounted for 31% of total global final-energy use, 54% of final-electricity demand, and 8% of energy-related CO2 emissions (excluding indirect emission due to electricity). When upstream electricity generation is taken into account, buildings were responsible for 23% of global energy-related CO2 emissions, with one-third of those from direct fossil fuel consumption (IEA, 2017a) »

Minimiser l'impact de la construction immobilière en termes d'émission de CO2 mais aussi l'impératif d'arrêter l'artificialisation des terres en France incitent à favoriser au maximum la transformation de bâtiment existant et le recyclage de la ville sur elle-même. Il en va aussi pour les *data centers*.

Il s'agit donc d'identifier toutes les friches et bâtiments vacants adaptés à la transformation qui pourrait accueillir de nouvelles surfaces de *data centers* :

- Centres commerciaux ou surfaces commerciales en déclin ou désaffectés¹⁷²
- Centrales thermiques de pointe fermées comme à Porcheville ou Vitry-sur-Seine
- Anciens centraux téléphoniques vacants (le patrimoine d'Orange semble intéressant)
- Bâtiments de bureaux (selon l'Observatoire Régional de l'Immobilier d'Entreprise, il existait en 2014, 3,3 millions de m2 de bureaux vacants en Ile-de-France).
- Anciens sites industriels

Les stratégies de planification locale et les PLU sont les outils pour favoriser ces transformations. La connaissance fine du patrimoine local permet aussi d'orienter et de conseiller les opérateurs de *data centers*.

Pour cela, il s'agira également d'évaluer le coût global et de faire une analyse de cycle de vie d'un bâtiment neuf, comparé à la transformation du bâtiment existant. En effet, il est nécessaire de comparer

¹⁷² L'enseigne Casino va ainsi s'engager dans la transformation d'une partie de ces magasins en data centers : <https://www.reuters.com/article/us-casino-data-revenue-idUSKCN1OJ1P4>

en coût global la possibilité d'une efficacité énergétique meilleure pour bâtiment neuf en phase de fonctionnement (un bâtiment construit pour le data center où tout est optimisé en fonction de cet usage) et l'adaptation d'un bâtiment existant. Quel projet émet le moins de CO2 ? La même problématique se pose pour le renouvellement du matériel informatique, le bilan réalisé à ce jour prouve qu'il faut prolonger la vie du matériel au maximum même si les générations suivantes de matériel consomment moins d'électricité.

Plus d'architecture, plus d'hybridation

- Que de nouvelles maîtrises d'ouvrage émergent pour la construction des *data centers* pour favoriser une diversification des formes, des programmes et de nouvelles mutualisations (les opérateurs classiques ayant tendance à reproduire les mêmes objets, pour ne pas perturber leur modèle économique). Favoriser des réalisations issues d'une maîtrise d'ouvrage public-privée par exemple, en lien avec des concours internationaux ou des appels à projet.
- Encourager la recherche autour de ces infrastructures, en engageant par exemple des appels à recherche financés dont les mandataires seraient des agences d'architecture associées à des laboratoires de recherche, des écoles d'architecture ou des universités.
- Favoriser une réflexion des milieux de l'aménagement et des écoles d'architectures sur le sujet, comme ce fut le cas à Science Po Paris dans le cadre d'un partenariat avec la Société du Grand Paris (SGP), ou à l'Ecole d'architecture de la ville et des territoires à Marne-la-Vallée (EAVT).

Intégrer la question data centers dans les documents de planification spatiale et les stratégies territoriales

Les *data centers* sont aujourd'hui encadrés à l'échelle du bâtiment et au niveau spatial par :

- Le Plan Local d'Urbanisme (PLU) donc :
 - o Le règlement de la zone concernée
 - o La délivrance du permis de construire qui constitue un levier potentiel de négociation pour les constructions, extensions
 - o Les autorisations de changement de destination pour certaines transformations
- Les autorisations ICPE délivrées par l'Etat, qui visent à limiter les nuisances potentielles (bruit, stockage de fioul...) et contraignent ainsi la configuration du bâtiment.
- Pour certains, les obligations d'Opérateur d'Intérêt Vital (OIV)

A l'échelle urbaine, aucun document stratégique type Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD) ou Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT) ne fait mention du phénomène *data centers* comme d'une tendance à anticiper, encadrer, planifier.

Les data centers font finalement partie des transformations silencieuses des territoires.

Pour en faire des transformations visibles, concourant aux projets globaux des territoires, 3 objectifs sont à rechercher :

- Connaître la situation actuelle des *data centers* sur son territoire : les sites, les puissances électriques, les acteurs...
- Anticiper les développements et évolutions possibles : avoir une vision globale des extensions à venir, des nouveaux projets, des évolutions du marché des *data centers*...
- Mieux intégrer les *data centers* dans le territoire :
 - o Localisations adéquates
 - o Intégration architecturale
 - o Intégration écosystémique : énergie, eau, empreinte au sol...

Voici deux pistes pour atteindre ces objectifs.

- a) Inclure la dimension *data center* dans les démarches PLU(i), SCOT, projets de territoires et croiser les stratégies Energie / Foncier / Numérique

Cela sous-entend de :

- Développer la connaissance des *data centers* du territoire via le diagnostic dans les rapports de présentation (PLU, SCOT) et les diagnostics des projets de territoire.
- D'identifier les enjeux spécifiques et stratégiques à travailler dans les PADD et les stratégies de projets de territoires.
- D'aller à la rencontre des acteurs des *data centers* pour pouvoir imaginer ensemble des actions communes par la suite.

Ce travail doit s'effectuer en lien fort avec les Plans Climat Air Energie Territoriaux (PCAET), l'anticipation des risques climatiques propres à chaque territoire (inondations, sécheresses, fragilités aux canicules...) et les éventuels documents de stratégie foncière des territoires, car un des enjeux majeurs pour une meilleure intégration des *data centers* aux territoires est bien le développement de stratégies croisées et articulées Energie / Foncier / Numérique.

- b) Développer des outils et des projets

Au niveau des PLU, l'outil majeur sera le règlement de zone, et ce afin, de favoriser l'intégration formelles des bâtiments : hauteurs, toitures, ouvertures, intégration des installations techniques (types générateurs de secours, climatiseurs...), emprise au sol, intégration paysagère, clôtures, gestion des livraisons...

La question du nombre de places de parking est un sujet à étudier en fonction du type de *data center* (clients extérieurs ou pas ?) et du nombre d'emplois, souvent faible. Elle est à considérer également au regard des mutations possibles du bâti dans le futur : vers une activité potentiellement plus tertiaire ou industrielle ? Dans une zone bien desservie par les transports en communs ou pas ? Le stationnement est un dimensionnant important aussi bien pour l'économie du projet de construction, que pour l'imperméabilisation des sols et l'optimisation de l'occupation de la parcelle.

Une autre question à considérer est celle de la mise en cohérence des obligations OIV (opérateurs d'intérêt vital) imposées par l'Etat avec les réglementaires locales du PLU.

Au sein des SCOT, le Document d'Orientation et d'Objectifs (DOO)¹⁷³ définit les conditions d'un développement urbain maîtrisé. Il pourra intégrer des recommandations précises sur la question des *data centers*, notamment proposer des outils communs de gestion, de réflexion, proposer des démarches et des méthodes, des partenariats. Ces orientations pourront, par exemple, orienter l'implantation des *data centers* comme à Stockholm pour favoriser la récupération de chaleur, l'optimisation foncière, et éviter les concentrations qui fragilisent les systèmes électriques en les localisant au meilleur endroit aussi bien en fonction de leurs critères (connectivité, foncier, énergie) que de ceux des territoires (résilience, intégration, gestion des sols).

Dans le cadre de ces démarches stratégiques, il est aussi envisageable de concevoir des projets expérimentaux ad hoc pouvant préfigurer des stratégies plus globales, ou des projets leviers pour une dynamique collective.

Anticiper l'implantation des data centers hyperscale et du edge computing

Nous avons constaté que les *data centers* sont arrivés, la plupart du temps, sans que la collectivité publique ne puisse anticiper leur installation. D'une part, le phénomène des *data centers hyperscale* (au-delà de 10 000 m² de surface) arrive en France, et d'autre part, le développement

¹⁷³ Le DOO est le règlement du SCoT dont les prescriptions s'appliqueront dans un rapport de compatibilité aux documents dits de rang inférieur et un cadre commun de références, de méthodes et d'actions permettant de concourir à la mise en œuvre des orientations du SCoT.

de micro *data centers* ne fait pas de doute avec la croissance à venir de l'IoT, de la 5G et des véhicules sans conducteurs.

a) Les très grands data centers ou hyperscale

Il s'agit ici de tirer les leçons des installations de très grands *data centers* dans les autres territoires européens et nord-américains : comment négocier avec ces acteurs dans une relation équilibrée ? Comment ne pas sur-dimensionner des infrastructures locales ? Comment ne pas fragiliser les systèmes électriques locaux ?

Il faut pouvoir, à l'échelle d'un territoire régional et métropolitain :

- analyser la pertinence de l'implantation de ces énormes usines à données et cibler les territoires les plus propices à leur installation
- proposer des conditions d'implantation respectant les intérêts du territoire comme de l'opérateur
- évaluer précisément les impacts de ces installations
 - o Création d'emplois directs et indirects, et pérennité.
 - o Service local aux PME, TPE, collectivités locales, habitants.
 - o Impacts sur la consommation de foncier, la concurrence entre usages des sols.
 - o Impacts sur le paysage et le cadre de vie.
 - o Impacts sur le système électrique et hydraulique.
 - o Impacts environnementaux (voir recommandation ci-dessous).

Un travail complémentaire de benchmark européen pourrait être réalisé (Suède, Irlande, Pays Bas) pour apporter davantage d'éléments de réflexion et de stratégie, et produire un guide pratique d'intégration à portée européenne.

b) Le edge computing et les micros data centers

Peu d'acteurs semblent aujourd'hui avoir une vraie visibilité sur ce phénomène, pourtant il est important d'essayer de tracer les contours d'une prospective pour les territoires urbains. Si ces nouvelles installations numériques seront de petite taille (on les compare souvent à la taille d'un réfrigérateur), leur multiplication interroge :

- Devra-t-on prévoir des placards techniques dédiés dans les bâtiments neufs, plus d'équipements sur l'espace public ?
- Est-ce que le patrimoine immobilier vacant des opérateurs télécoms, en particulier Orange, va être réutilisé pour cela ? Est-ce que les *edge data centers* seront implantés au sein des data centers hyper urbains, et doit-on alors anticiper leurs extensions et développement ?
- Comment comptabiliser l'impact électrique local de ces nombreuses petites unités ?
- Est-ce que des renforcements de réseaux fibre et réseaux électriques sont à prévoir ?

Voici certaines des nombreuses questions que l'on peut se poser pour anticiper ce développement dans un futur proche.

Un groupe de travail dédié pourrait être mis en place sur ce sujet entre collectivités locales, experts, urbanistes, opérateurs télécoms et *data centers*, ainsi qu'opérateurs énergétiques, afin de travailler à des réponses communes (voir préconisation sur la création d'un forum).

Mesurer et limiter l'impact environnemental du « smart »

Les villes et les territoires développent depuis une petite dizaine d'années des stratégies numériques souvent regroupées sous le terme de *smart city* ou ville intelligente. Il est fondamental d'alerter sur l'existence et la nature des coulisses de ces projets :

- En amont : consommation de terres rares, d'eau et dégâts environnementaux et sociaux dans les pays extracteurs ; importante énergie grise dépensée.
- En cours : consommations énergétiques et foncières.

- En aval : déchets électroniques, dégâts environnementaux et sociaux dans les pays concernés par la mise en décharge et le recyclage.

Un travail de conscientisation est à poursuivre en la matière, mais aussi un travail d'évaluation des programmes *smart city* des collectivités.

a) Une revue écologique de la *smart city* et de ses programmes

Que ce soit sur des sujets liés aux mobilités, à l'habitat, aux projets urbains, à l'énergie connectée, nous conseillons de prendre en compte – a minima- le besoin en stockage de données afférent à chaque programme pour évaluer l'espace et l'énergie nécessaires à chacun pour son déploiement et son fonctionnement dans le temps.

Pour aller plus loin, il est proposé de suivre la recommandation de la Fing, l'IDDRI et WWF dans leur livre blanc cité précédemment (piste 3-2) : il s'agit d'« engager –au niveau national et dans les territoires- une « revue écologique » de programmes d'innovation numérique, sur le véhicule autonome ou l'industrie du futur par exemple, afin qu'ils intègrent les enjeux environnementaux de façon non superficielle. Le financement public des projets les plus importants devrait être conditionné à l'existence d'une évaluation de leurs impacts écologiques, positifs et négatifs, directs et indirects. »

Cela supposerait, au-delà de l'impact foncier et énergétique du stockage de données pendant le projet, d'évaluer les impacts aux 3 phases citées ci-dessus.

b) Les impacts environnementaux des *data centers* sur les territoires

Il faut pouvoir également, évaluer au cas par cas, les impacts environnementaux des projets de *data centers* sur un territoire. La question de l'accès aux données est toujours complexe face à des opérateurs qui cultivent souvent le secret. En revanche, si le dialogue n'intervient pas avant, le dépôt du permis de construire est l'opportunité de disposer de données sur le projet et d'en faire un levier de négociation. Des simulations et des extrapolations peuvent ensuite être réalisées. Nous avons préfiguré ce que pourrait être cet outil, avec Bastien Marsaud, stagiaire au sein du projet Enernum en 2018.



IUT Lyon 1
 INSTITUT UNIVERSITAIRE DE TECHNOLOGIE LYON 1
 Département Informatique
 43 Boulevard du 11 Novembre 1918 - 69622 Villeurbanne

RAPPORT DE STAGE - 2^{EME} ANNÉE
 DUT INFORMATIQUE

Simuler l'empreinte environnementale
 des centres de données

9 AVRIL - 15 JUIN 2018



LABORATOIRE DE L'INFORMATIQUE DU PARALLÉLISME
 École Normale Supérieure
 46 Allée d'Italie - 69364 Lyon

Maître de stage
 Laurent LEFEVRE

Étudiant
 Bastien MARSAUD

Responsable pédagogique
 Hamamache KHEDDOUCI

Il peut ensuite modifier n'importe quel modèle en cliquant sur les cellules du tableau. Il peut également supprimer un périphérique grâce au bouton sur la droite.

3.1.4 La saisie des autres périphériques

L'utilisateur peut également saisir les périphériques de stockage et les périphériques réseaux dans des écrans similaires à l'écran de saisie des périphériques de calcul. Cependant comme il n'existe pas de base de données pour ces équipements, il n'y a pas d'autocomplétion. L'utilisateur devra se référer au manuel constructeur afin de définir la consommation d'énergie de son matériel.

3.1.5 La gestion de la chaleur

A partir des données entrées, le simulateur calcule automatiquement la dissipation de chaleur dans le centre de données. La méthode de calcul est basé sur un livre blanc de APC, une filiale de Schneider Electric.

Pour répondre à cette quantité de chaleur, l'utilisateur peut choisir différentes formes de refroidissement dans la liste déroulante et les combiner. Comme certaines sources de refroidissement consomment de l'énergie, on laisse à l'utilisateur la possibilité de l'indiquer.



FIGURE 14 – L'écran permettant de choisir la méthode de refroidissement

3.1.6 La réutilisation de chaleur

Si le centre de données réutilise une partie de la chaleur créée par l'équipement informatique, l'utilisateur peut l'indiquer dans un écran dédié. Il peut également indiquer la quantité d'énergie utilisé pour ce retraitement de la chaleur. Cette information est importante car elle est prise en compte par certains indicateurs.

Figure 48. extrait du rapport de stage de Bastien Marsaud, stagiaire au sein du projet Enernum en 2018.

Plusieurs sujets spécifiques aux *data centers* nous semblent importants à traiter :

- L'aggravation des effets d'îlot de chaleur urbain, notamment dans les territoires vulnérables (populations fragiles, âgées...).
- Les consommations d'eau et la pression sur les infrastructures.
- Les consommations énergétiques et la pression sur les infrastructures.
- Les nuisances sonores et conflits d'usage éventuels avec le voisinage.

Intégrer la médiation infrastructurelle dans la politique de développement des tiers lieux et la revitalisation des centre-bourgs

Le rapport livré fin 2018 au gouvernement, traitant des tiers-lieux et intitulé « Faire ensemble pour mieux vivre ensemble »¹⁷⁴ souligne l'enjeu qu'il y a à soutenir et développer les tiers-lieux en France, espaces d'apprentissage, de formation, de vivre et faire ensemble mais également lieu de redéploiement potentiel des services publics. Cette question s'articule par ailleurs avec la dynamique nationale de réflexion sur la redynamisation des villes moyennes et des centre-bourgs.

Nous soulignons ici la pertinence à y inclure et y croiser les questions de médiation numérique infrastructurelle (apprendre à faire son FAI, gérer un stockage de donnée et/ou un cloud privé pour les tiers lieux...) avec celles de transition écologique. Le rapport recommande d'ailleurs de « Faire des tiers lieux la porte d'entrée de la numérisation des territoires » mais aussi des lieux de formation aux métiers du numérique.¹⁷⁵

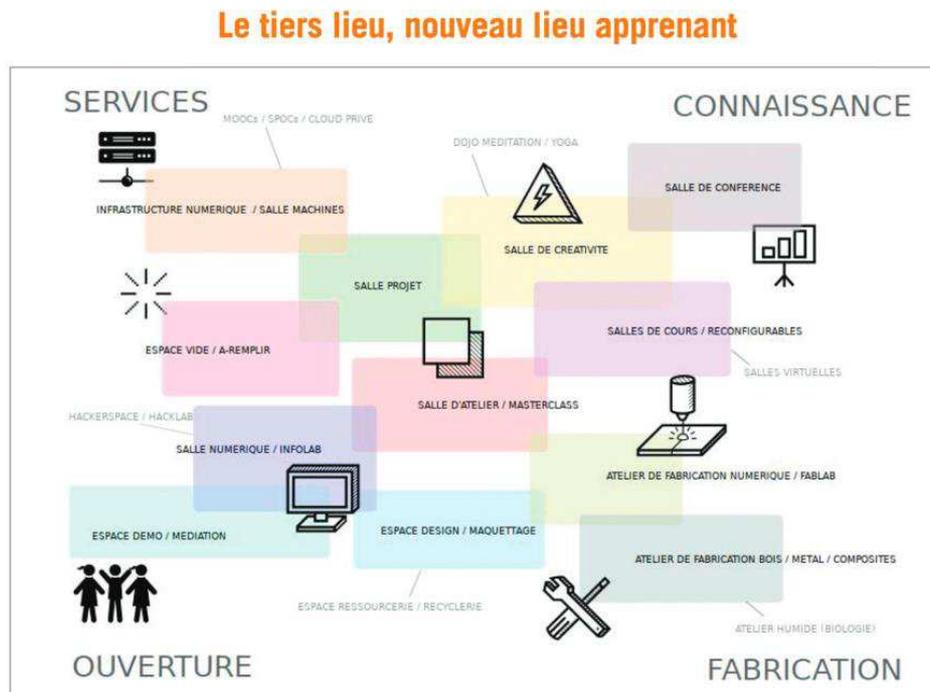


Figure 49. Schéma de fonctionnement tiré du rapport « Faire ensemble pour mieux vivre ensemble ».

¹⁷⁴ <http://s3files.fondation-ta.org.s3.amazonaws.com/Rapport%20Mission%20Coworking%20-%20Faire%20ensemble%20pour%20mieux%20vivre%20ensemble.pdf> [consulté en ligne le 13 mars 2018].

¹⁷⁵ Notamment les Formation aux filières d'avenir du Plan d'Investissement Compétences (PIC) : accès de jeunes non-bacheliers à des métiers en croissance dans le numérique : maintenance du matériel, administration de réseau et sécurité informatique, développement et code ; mais aussi avec les Écoles de la 2^{ème} chance / « Plombiers du numérique » : formation de 3 mois pour des jeunes déscolarisés de 17 à 24 ans : déploiement de fibre optique, rack et câblage, administration réseau simple.

8.3 Recommandations énergie

Soutenir et évaluer la sobriété

Le rapport du Shift project du groupe de travail « Lean ICT » mentionne un certain nombre de préconisations, dont certaines ont déjà été mises en avant, notamment par le groupe Eco-Info.

POUR DÉPLOYER LA SOBRIÉTÉ NUMÉRIQUE

↔ Une transition numérique sobre consiste essentiellement à acheter les équipements les moins puissants possibles, à les changer le moins souvent possible, et à réduire les usages énergivores superflus. La sobriété numérique est une approche « lean », soit au plus juste, qui est aussi source d'efficacité pour les organisations. Son principe étend au niveau sociétal la prise en compte des objectifs poursuivis par les approches techniques de type « Green IT », et confirme leur importance.

Adopter la sobriété numérique comme principe d'action. Réduire l'empreinte énergétique et environnementale du numérique passe par un retour à une capacité individuelle et collective à interroger l'utilité sociale et économique de nos comportements d'achat et de consommation d'objets et de services numériques, et à les adapter en conséquence.

Accélérer la prise de conscience des impacts environnementaux du numérique dans les entreprises et organisations publiques, au sein du grand public (étiquetage, communication, etc) et dans le monde de la recherche.

Intégrer les impacts environnementaux comme critères de décision dans les politiques d'achat et d'utilisation des équipements numériques, ceci dans les pays développés comme dans les pays en développement, dans les organisations publiques comme privées.

Permettre aux organisations de piloter environnementalement leur transition numérique en disposant de références et d'outils leur permettant de prendre en compte l'impact environnemental de la composante numérique des choix qu'elles envisagent, à différents niveaux de pilotage. En tirant parti de l'exemple du REN, appuyer la mise en place d'une base de données publique (sur le modèle de la base carbone de l'Ademe) pour permettre aux acteurs d'analyser leur impact environnemental.

Procéder à un bilan carbone des projets numériques, pour inclure cette donnée dans l'analyse. La pression de l'offre (GAFAM, BATX*), et les attentes de croissance du PIB associées à la numérisation ne peuvent servir de seuls juges dans la sélection des projets. De plus, les gains économiques, environnementaux et sociaux potentiels sont plus importants pour les pays en développement, car les infrastructures sont encore à créer.

Améliorer la prise en compte des aspects systémiques du numérique dans les secteurs clés que sont l'énergie, les transports, l'habitat et l'agriculture-alimentation. Développer une expertise autour de cette approche pour accélérer sa mise en œuvre.

Mettre en place ces mesures à l'échelle européenne et auprès d'organisations internationales, compte tenu de l'envergure mondiale et de la puissance économique des acteurs principaux du numérique.

*GAFAM (Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft), BATX (Baidu, Alibaba, Tencent Xiaomi)

Figure 50. Extrait du rapport Lean ICT, The Shift Project, 2018.

À cela pourrait s'ajouter :

- **Trier les données** : favoriser les données à haute valeur sociale et environnementale ajoutée¹⁷⁶. La question du tri des données se pose comme pour d'autres types de « déchets » car les données polluent, certaines sont à éliminer car sans valeur ajoutée (ou même à ne pas produire), d'autres sont plus intéressantes à conserver car utilisables ou utiles. Appliquera-t-on un jour le principe du pollueur-payeur pour encourager à mieux les trier afin de réduire les espaces de stockage et l'énergie dépensée?
- **Diffuser les pratiques de sobriété dans les marchés publics** liés à l'informatique, comme par exemple avec l'apport du GDS EcoInfo au marché MatInfo4 (marché de l'enseignement supérieur et le recherche) qui touche la plupart des universités et instituts de recherche français : <https://www.matinfo-esr.fr/ecoinfo>

¹⁷⁶ Entretien avec Valérie Peugeot, prospectiviste au Orange Lab, Paris.



Concilier planification énergétique et planification urbaine

- a) Anticiper le programme *data center* dans les projets urbains et les connexions réseaux afférentes, en particulier électriques et en fibre optique. En effet, si cela n'est pas intégré dans le projet dès le départ, les coûts de réseaux peuvent devenir très élevés, voire bloquants. La notion de guichet unique, telle que développé à Santa Clara, en Californie (voir rapport n°1) pourrait ainsi se déployer dans certaines agglomérations ou métropoles et améliorer l'intégration des projets de *data centers*.
- b) Mieux anticiper dans l'ensemble des grands projets franciliens, les besoins électriques.

Ainsi, une vision à 10-20 ans permettrait à Enedis :

- de mieux prévoir les besoins des clients et livrer la puissance demandée sans de trop longs délais,
- d'apporter un avis en matière d'aménagement du territoire pour dire où sont les puissances disponibles. Ce qui permettrait de rationaliser l'occupation du territoire en minimisant la création de nouvelles infrastructures (et donc le coût pour la collectivité).

Cela porte un triple intérêt :

- Pour la collectivité qui pourrait mieux maîtriser les modalités de son développement urbain,
- Pour ceux qui développent des infrastructures comme Enedis, pour pouvoir anticiper intelligemment, sans sur dimensionner et pour répondre au juste besoin,
- Pour le client, ça ne serait pas la compétition du premier arrivé premier servi mais une répartition équitable des coûts, comme le principe de la quote-part dans les Schémas Régionaux de Raccordement au Réseau des Énergies Renouvelables (S3REnR)¹⁷⁷. Ainsi chaque très gros consommateur d'électricité paie (au prorata de sa puissance) une quote-part pour participer au financement des ouvrages du réseau public.

- c) En finir avec la surréservation qui peut être bloquante pour les territoires

Il s'agit ici de limiter l'écart entre la puissance de raccordement demandée et la puissance finalement souscrite, afin d'éviter le surdimensionnement d'ouvrages pour des appels de puissance qui n'auront jamais lieu.

La possibilité d'une clause de révision pour éviter la surréservation semble intéressante.

- d) Partager les données avec la puissance publique.

Pour qu'un programme comme le Data Center Parks de Stockholm soit mis en œuvre, il faudrait d'une part, la mobilisation des collectivités, à la bonne échelle de planification, et d'autre part une adaptation législative pour que les données d'Enedis sur la localisation des puissances disponibles et réservées puissent être mises à disposition des collectivités planificatrices. En effet, si ces données ne peuvent être partagées avec un opérateur privé ou publiquement pour la confidentialité du client, elles pourraient être mises à disposition d'un organisme public, agréé, chargé de l'aménagement du territoire.

¹⁷⁷ C'est une forme de mutualisation des coûts mis en application dans le cadre des Schémas Régionaux de Raccordement au Réseau des Énergies Renouvelables (S3REnR), issus de la loi Grenelle II. Pour des installations EnR (individuelles ou groupées) supérieures à 100 kVA une quote-part est facturée au producteur, en plus du coût de raccordement. Ainsi chaque producteur d'EnR paie (au prorata de sa puissance) une quote-part pour participer au financement des ouvrages créés sur les réseaux publics pour l'accueil de ces EnR.

Que les acteurs de la planification énergétique s’emparent plus fortement du sujet

Une piste consisterait à ce que les énergéticiens producteurs puissent faire réaliser par leurs clients des économies d’énergies et développer des EnR avec une politique et des tarifs incitatifs. Il y a probablement des réflexions à mener pour essayer de mieux orienter, voire contraindre les choix des opérateurs de *data center* et leurs demandes de puissance.

- C’est un sujet qui concerne Enedis, mais aussi RTE pour des grosses puissances (au-delà de 40MW). Historiquement la culture « service public » est de répondre aux besoins du client sans les remettre en question, toutefois à l’heure de l’urgence climatique et environnementale, certaines exigences pourraient être formulées par les énergéticiens qui, en fonction des projets, pourraient prioriser certains sites.
- La facturation des raccordements électriques pourrait être revue, notamment sur le secours ou en cas de multiplication des sites. Pour éviter l’éparpillement des infrastructures, il pourrait être convenu que la valeur à charge du *data center* sur un premier site demandé soit celle prévue par les textes, puis s’il y a un deuxième site demandé, elle double ; et s’il y en a un troisième site, elle triple.

Favoriser et organiser la récupération de chaleur

- Pour l’intégration de la chaleur fatale des grands data centers d’entreprise ou de colocation dans les réseaux de chaleur urbain, il s’agit de prendre en considération très en amont la localisation, comme à Stockholm, et offrir des contreparties pour cela (tarif plus bas, échange énergétique : chaleur contre froid par exemple).
- Pour accompagner les opérateurs de data centers dans la mise en œuvre des projets de récupération de chaleur, leur suivi et maintenance, la création d’un acteur intermédiaire proposant des services d’assistance à maîtrise d’ouvrage, paraît intéressante, avec mandat de développer la récupération de chaleur fatale d’un maximum d’acteurs et pas uniquement les data centers.
- Elaborer des cartographies spatiales précises qui croiseraient :
 - o Les capacités électriques disponibles ou potentiellement disponibles côté Enedis et RTE ;
 - o Les besoins thermiques, réseaux de chaleur en lien avec les nouveaux projets urbains ;
 - o Les réseaux internet, avec les débits disponibles et la qualité de connexion.

Il s’agirait d’orienter au maximum l’implantation des data center dans les zones les plus favorables au regard des paramètres établis.

- Favoriser le développement des data centers d’échelle moyenne dans des programmes mixtes, pour favoriser la mutualisation entre bâtiments comme le cas de l’opérateur Céleste à Noisy-Champs (77) qui utilise la chaleur fatale des serveurs pour chauffer ses bureaux. En effet, la récupération de chaleur pour les bureaux, logements ou des espaces logistiques dans une immédiate proximité est une échelle plus commune de réutilisation.

Développer les ENR et les micro-réseaux

- Favoriser la production d’énergies renouvelables sur site lorsque cela est possible. Intégrer les infrastructures dormantes des data centers dans les systèmes énergétiques locaux (voir section plus bas).

- Développer et faciliter l'autoconsommation collective, dont les premières applications sont issues de la loi du 24 février 2017 et de son décret d'application du 28 avril 2017¹⁷⁸. Les opérateurs de data centers pourraient mettre à disposition leur infrastructures de secours dormantes puisque la loi vise à soulager le réseau en favorisant des projets où les consommations et les productions s'équilibrent en temps réel (voir exemple de Portland General Electric). Au-delà de l'autoconsommation, c'est le développement de micro-réseaux ou réseaux privés pour les data centers qui pourrait se développer. Ils seraient nécessairement connectés au réseau pour des raisons de sécurité en cas d'incident et pour des problèmes de qualité de courant.
- Concernant les tarifs de l'autoconsommation collective, Enedis souhaiterait obtenir une rémunération non plus au kWh acheminé (comme c'est le cas aujourd'hui avec le tarif d'acheminement, cf. TURPE 5), mais à la puissance mise à disposition. Avec les flux bidirectionnels des smart grids, la rémunération au kWh acheminé est pour l'énergéticien contestable car ce système pourrait menacer l'équilibre financier qui leur permet d'assurer les coûts d'investissement et d'entretien¹⁷⁹. En effet, avec la transition énergétique et la multiplication des productions d'EnR sur site, les clients auront de plus en plus besoin de sécurité électrique en cas de souci sur leur micro-réseau (avec une mise à disposition d'une puissance disponible pendant un temps donné). Ce changement aurait pour avantage de limiter les demandes excessives de puissances de raccordement dont sont coutumiers les opérateurs de data center. Toutefois cette mesure reste problématique car elle conduirait à favoriser les gros clients et à pénaliser les clients domestiques qui verraient leur frais de raccordement augmenter (par rapport à leur puissance souscrite).¹⁸⁰

Intégrer les Infrastructures dormantes dans les systèmes énergétiques locaux

Les générateurs d'urgence des *data centers* : un nouveau rôle dans les *smart grids*

- Repérer, mobiliser et mutualiser les générateurs d'urgence ;
- Transformer les générateurs d'urgence en unités de production active (co ou tri génération) ;
- Diversifier et décarboner les ressources primaires de production : gaz, biogaz, biomasse ;
- Développer la complémentarité micro/macro grid, en systématisant le principe smart grid de Portland ou de New York (l'exemple de l'immeuble du New York Times) dont les générateurs de secours sont utilisés par la compagnie électrique locale et rebasculent sur la nano grid du bâtiment en cas de problème d'alimentation.

Favoriser la diversité infrastructurelle

Dans une perspective d'aménagement encourageant l'installation de micro-productions locales et de micro-réseaux interconnectés, il faut bien mesurer que chaque réalité technique implique un système de relation (gouvernance), un fonctionnement opératoire (technique) et une chaîne métabolique (énergie-ressource-environnement) spécifique au territoire d'implantation. Le niveau géographique de la mutualisation et le degré d'autonomie de certaines boucles de services (totale ou partielle), tout comme l'interconnexion, sont un casse-tête stratégique non reproductible. L'hétérogénéité et la diversité infrastructurelle dominent. Les micro-réseaux ou micro-systèmes techniques peuvent se connecter les uns aux autres. Cette relation d'interconnexion s'envisage

¹⁷⁸ Si le cadre légal français de l'autoconsommation collective est trop contraignant pour les projets d'initiative citoyenne, il est pour l'instant plus destiné à des structures professionnelles comme les syndicats d'électrification, bailleurs sociaux, promoteurs immobiliers, aménageurs qui peuvent être la personne morale qui regroupe les auto-consommateurs.

¹⁷⁹ Pour Enedis, le tarif actuel de l'autoconsommation collective est problématique, notamment pour les clients qui sollicitent très peu de kWh sur le réseau de distribution (uniquement quelques heures par an lorsque leur production est insuffisante), car ils ne contribuent pas à un juste usage du réseau. En effet, les infrastructures construites qu'elles soient utilisées 8760 heures par an ou une heure ont le même coût d'investissement et d'entretien.

¹⁸⁰ C'est le calcul qui a été fait au niveau du TURPE 5, il conduisait à une hausse des tarifs à la défaveur des petits clients qui n'utilisent pas systématiquement cette puissance, alors qu'elle serait très favorable dans le cas d'un data center, dont la puissance souscrite va quasiment être utilisée en permanence à 80-90%

entre différentes entités : le bâtiment, l'îlot, le quartier, la ville, le territoire, l'ensemble formant une sorte de mécano énergétique de solidarité territoriale.

Dans cette section trois perspectives dont certaines ont notamment été identifiées par la CRE¹⁸¹ pourraient se développer :

- L'architecture hiérarchique descendante des grands réseaux électriques évoluera vers un modèle articulant des grappes de micro-réseaux (dont certains pourraient être ceux des data centers) ;
- En tant qu'instrument de flexibilité, le stockage par batteries deviendra une composante essentielle du système électrique, des data centers notamment ;
- L'émergence des nouvelles technologies permettra à certains industriels ou consommateurs de prendre le contrôle sur son approvisionnement énergétique et sa consommation, peut-être un jour de sa distribution, avec l'aval de l'autorité régulatrice.

8.4 Recommandations recherche et connaissances

Nous avons identifié les sujets suivants comme stratégiques à approfondir pour assurer une meilleure intégration spatiale et énergétiques des *data centers* dans les territoires :

- Evaluer les risques climatiques spécifiques pour les infrastructures numériques en France ;
- Etudier la faisabilité d'un opérateur intermédiaire sur la récupération de chaleur fatale des data centers (structure juridique, modèle économique, gouvernance...) ;
- Evaluer l'impact écologique des infrastructures de traitement et de stockage de données associatives, coopératives, décentralisées, distribuées et pair-à-pair ;
- Etudier les potentiels et modalités de développement de la médiation infrastructurelle dans les tiers lieux en France ;
- Mener une étude complémentaire sur les enjeux d'intégration urbaine, énergétique et territoriale des *data centers* hyperscale et des micros *data centers* (edge), avec pour ces derniers l'enjeu d'une production hyper locale d'énergie ;
- Simuler l'impact des projets « smart » sur l'environnement : outils à développer pour des revues écologiques de projets.

¹⁸¹ http://fichiers.cre.fr/Etude-perspectives-strategiques/1SyntheseGenerale/Perspectives_Strategiques_du_secteur_de_l_energie_Synthese_generale_FR.pdf [consulté en ligne le 13 mars 2018].

Conclusion

Entre les États-Unis et la France (respectivement 1^{er} et 4^{ème} pays en termes d'implantation de *data centers*), les coopérations entre acteurs divergent. Elles sont en effet plus développées aux États-Unis qu'en France avec des groupes *corporate* entre entreprises qui mènent des expérimentations (Open Compute Project de Facebook, Silicon Valley Council Leadership, BSR) et un guichet dédié dans les collectivités (Santa Clara, Hillsboro, Prineville). Ainsi les exemples de mutualisation sont plus nombreux. Concernant les initiatives énergétiques en faveur des énergies renouvelables on remarque un engagement fort des opérateurs américains pour sortir des mix fossiles et fissiles et réclamer du 100% renouvelable. Les industriels américains de *data centers* sont clairement moteur de la transition énergétique en exerçant une forme de pression sur les vieilles *utilities*. C'est également le volet de production sur site ou à proximité avec de l'autoconsommation individuelle et collective et un engagement des acteurs dans la distribution qui diffèrent de la France. Dans un marché très ouvert, il y a une situation de concurrence très forte entre les acteurs du numérique et les acteurs historiques de l'électricité, les premiers travaillant parfois à ringardiser les seconds, en témoigne les déclaration de Brian Janous, le directeur de la stratégie énergétique de Microsoft : « How do you deliver reliable energy to a more engaged and dynamic customer base when your power supply is increasingly renewable and therefore intermittent, all in a system that has not really changed since the early 1900s? ¹⁸² »

Ce « retard » favorise une dynamique offensive des GAFAM sur le marché de l'énergie avec un mélange des genres qui inquiète puisque ce sont ces grands consommateurs d'électricité qui créent eux-mêmes l'augmentation de leur demande électrique par l'augmentation du marché de la donnée et de son stockage dont ils tirent des bénéfices immédiats. Dans cette politique de l'offre, leur potentielle arrivée sur le marché de l'énergie qui fonctionnera de plus en plus à partir de la gestion de données *smart grid* interroge.

Si la performance énergétique des *data centers* est globalement améliorée (avec la course à un PUE le plus proche de 1), elle reste insuffisante par rapport à la croissance des données à stocker. Les difficultés en termes de mutualisation et la recherche d'un intérêt commun entre opérateurs de *data centers* et territoires montrent bien que le secteur et son impact territorial restent guidés par des objectifs économiques et financiers.

La finalité et l'éthique d'une société *big data* et de la *smart city* restent insuffisamment interrogées par les politiques publiques et les collectivités, prises au piège de l'illusion de croissance de la numérisation du monde dont quelques effets sont attendus sur leur territoire. Le projet de la *smart city*, initié par IBM et Cisco, est accompagné par ses plus efficaces ambassadeurs et extractivistes de données : Google, Amazon, Facebook, Apple, Microsoft. Ces Big Tech participent depuis une décennie à transformer profondément non seulement l'économie et les pratiques sociales, mais aussi les espaces et l'infrastructure numérique. Au-delà du *smartphone*, de l'internet, des logiciels et des réseaux sociaux qu'ils ont contribué à fonder et dont ils représentent les services majeurs (moteur de recherche, vente en ligne, cartographie géolocalisée, réseaux sociaux, hardware et software), ils partent aujourd'hui à l'assaut de l'architecture, des villes et des territoires avec la donnée comme monnaie d'échange. *Sidewalk Labs*, l'entité d'Alphabet (Google) dédiée à la *smart city* réalise un quartier à Toronto et va tester sur ses futurs habitants une boucle numérique fermée : collecter les données, les traiter, ajuster le projet, et de nouveau collecter, traiter, ajuster... pour optimiser en permanence le fonctionnement du quartier, de A à Z comme le nom du groupe le suggère. Apple développe une filiale *Apple Energy*, agréée par l'État américain, afin de pouvoir maîtriser son approvisionnement énergétique. Facebook et Microsoft se positionnent fortement sur le développement de l'énergie et de micro-réseaux électriques sur leurs propres sites de bureaux et de *data centers*, mais aussi ailleurs, avec la fondation de *Microgrid Investment Accelerator* qui finance et commercialise des micro-réseaux électriques partout dans le monde. La diversification des GAFAM vers les services urbains n'est pas complètement nouvelle, mais la convergence de leur position monopolistique sur la collecte et le stockage des données personnelles, sur les logiciels, le commerce et la communication, sur les médias et la culture, c'est-à-dire tous les

¹⁸² <https://blogs.microsoft.com/green/2017/05/17/how-microsoft-technology-is-enabling-an-autonomous-grid/> [consulté en ligne le 13 mars 2018].

échanges de biens et d'informations, des contenus aux réseaux de diffusion et espaces de stockage, comporte d'importants risques démocratiques. Leur volonté d'incarner, chacun à leur façon, cet idéal de performance urbaine à travers un nouveau quartier, un nouveau siège, une nouvelle ville, semble cependant monter d'un cran leur prétention à concurrencer les collectivités locales et l'État.

Une autre *smart city* est pourtant possible, qui serait plus sobre et mesurée dans ses outils et dans ses pratiques, plus proche de l'intérêt des citoyens et préoccupée par les injustices sociales. Depuis que monte la puissance monopolistique des GAFAM, et même avant, des mouvements de réappropriation de l'infrastructure internet, de réseau et de stockage, se renforcent comme nous l'avons montré. Il est intéressant de voir que l'infrastructure Internet (pas seulement ses usages) suit aussi le mouvement de réappropriation que l'on constate dans le domaine de l'énergie avec la volonté de nombreux citoyens de choisir leurs sources d'énergie (locale et renouvelable), de remunicipaliser les services ou de s'engager dans des communautés énergétiques. Cette autre *smart city*, plus collaborative et pair à pair, se diffuse par la petite échelle. Elle est pilotée par des groupes citoyens qui réfléchissent à la maîtrise de leurs données et à un internet de l'énergie plus distribué et décentralisé. C'est l'exemple de la commune de Prats-de-Mollo-la Preste qui est en passe d'atteindre l'autonomie énergétique avec l'accompagnement de la Régie Électrique Municipale, puis de la S.E.M Prats'EnR et qui cherche à mettre en place un système de transition énergétique en s'appuyant sur le modèle de la technologie *blockchain* pour penser les transactions et les échanges. Des réseaux de recherche-action comme La Myne ou Daisee qui réfléchissent à l'utilisation des blockchains publiques pour le développement de circuits énergétiques courts pour pouvoir récupérer non pas seulement la production mais là aussi la gestion (et les données) liées à l'autoconsommation et donc la plus-value pour les groupes locaux qui l'assureraient (en lien avec le grand réseau). Les principes de ces micro-réseaux distribués (et interconnectés) sont très différents du principe de *smart grid* développé par les grands opérateurs de réseau classique qui pensent les micro-productions locales comme une réserve d'import-export au profit de l'équilibre du grand réseau. Au-delà d'un internet de l'énergie distribué, des expérimentations encore peu nombreuses se dessinent pour des centres de données de proximité, plus *low tech*, autonomes et gérés localement : c'est notamment le cas de celui d'une expérimentation à l'Université Rutgers dans le New Jersey.

Une partie du monde de l'architecture et de l'urbanisme tend encore à minimiser, aujourd'hui, le soft power immense de la *smart city* sur notre façon de penser le futur des villes et territoires. Le numérique n'augmente pas, il transforme. Ce n'est pas un exosquelette urbain que l'on peut porter et enlever à loisir, mais un système perversif qui modifie peu à peu les formes urbaines, en s'appuyant sur une infrastructure qui prend de plus en plus de place (unités de production énergétiques, centre de stockage, câbles océaniques, réseaux terrestres, mais aussi usines de production du matériel électronique, décharges numériques...). Si la question de la matérialité du système technique numérique, et son impact environnemental (l'énergie comme les minerais rares) commencent à être davantage évoqués, la course effrénée à l'innovation technologique continue n'en finit pas de limiter l'imaginaire numérique urbain à un discours univalent qui rend indissociable numérique, progrès, hyper technicité et « croissance verte », alors même que de nombreuses alternatives existent.

L'accompagnement des territoires dans l'accès à un internet libre et ouvert est aussi indispensable qu'une réflexion plus large sur l'objet *data center* et le système numérique associé : pour mieux mesurer l'impact environnemental des choix techniques au regard de la plus-value sociale attendue, et pour aller vers des pratiques numériques plus raisonnées, sobres et décroissantes.

ANNEXES

Annexe 1 : normes et encadrements

Classification INSEE

Le code NAF des *data centers* est « Sous-classe 63.11Z : Traitement de données, hébergement et activités connexes ». ¹⁸³

Cadre réglementaire

- **Réglementation ICPE**

Plusieurs équipements des *data centers* sont soumis à la réglementation ICPE, définie dans le livre I et le livre V du code de l'environnement. Cela est surtout vrai pour les *data centers* de tailles importantes. Bien que tous les *data centers* ne sont pas soumis aux mêmes rubriques de la nomenclature ICPE dans leurs autorisations d'exploitations, plusieurs rubriques reviennent régulièrement et illustrent les principaux points sensibles des *data centers*:

- La rubrique 2910 liée aux « installations de combustion ». Cette rubrique concerne les groupes électrogènes des *data centers*. Le *data center* a besoin d'une autorisation si ses groupes électrogènes ont une puissance supérieure à 20 MW.
- La rubrique 4734 liée à l'entreposage de "produits pétroliers spécifiques et carburants de substitution" ou la rubrique 1432 liée au "Stockage en réservoirs manufacturés de liquides inflammables". Ces rubriques concernent les cuves de fuel. Le *data center* a besoin d'une autorisation pour plus de 1000 tonnes de produits stockés (rubrique 4734) ou plus de 100 m³ (rubrique 1432)
- La rubrique 2925 liée à la charge d'accumulateurs. Pour cette rubrique, seule une déclaration est nécessaire.
- La rubrique 2920 liée aux "Installations de compression fonctionnant à des pressions effectives supérieures à 10⁵ Pa et comprimant ou utilisant des fluides inflammables ou toxiques". Cette rubrique concerne les groupes froids des *data centers*. Une autorisation est nécessaire si la puissance absorbée est supérieure à 10 MW.

Le décret du 14 novembre 2014 complétant l'article R. 512-8 du code de l'environnement, stipule qu'à partir du 1^{er} janvier 2015, en cas de rénovations ou de nouvelles constructions, les installations ICPE d'une puissance thermique totale supérieure à 20 MW doivent réaliser des études pour étudier la rentabilité d'une récupération de la chaleur fatale via un raccordement à un réseau de chaleur ou de froid.

- **Réglementation OIV : Opérateur d'importance vitale**

Les *data centers* sont également contraints par la réglementation relative aux OIV (Opérateur d'Importance vitale), définie dans le code de la défense à l'article R 1332-1. Les obligations des opérateurs d'importance vitale sont présentées dans l'instruction générale interministérielle N°6600/SGDSN/PSE/PSN du 7 janvier 2014. Cette réglementation vise à protéger les installations « dont l'indisponibilité risquerait de diminuer d'une façon importante le potentiel de guerre ou économique, la sécurité ou la capacité de survie de la nation » (article L 1332-1 du code de la sécurité)

¹⁸³ <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/nafr2/sousClasse/63.11Z?champRecherche=false> Cette sous-classe comprend la fourniture d'infrastructures destinées aux services d'hébergement, de traitement des données et d'autres activités similaires. Elle inclut les activités d'hébergement spécialisées comme les services d'hébergement de sites web, d'applications ou de services de diffusion continue (streaming) ou encore la mise à la disposition de clients d'installations informatiques à temps partagé sur gros ordinateurs. Les activités de traitement des données comprennent les services de traitement complets et la préparation de rapports spécifiques à partir des données fournies par le client, les services spécialisés de saisie et de traitement automatisé des données, y compris les activités de gestion de bases de données.

- **Code de conduite européen sur les *data centers***

Il ne s'agit pas d'une réglementation mais d'un texte regroupant les bonnes pratiques pour les opérateurs de *data center*. L'idée est de récompenser les opérateurs qui s'inscrivent dans une logique d'amélioration et d'efficacité. Ce code de conduite a été lancé en 2008 et est revu tous les ans. Il doit à terme servir de base pour l'écriture de normes. C'est le Gimélec qui participe à la rédaction de ce document pour la France. Ce code vient ainsi d'être passé en guide technique (technical report) européen CEN/CENELEC dans le cadre de la série EN 50600 (mentionnée plus loin) et devrait prochainement être porté du guide européen en guide technique international ISO/IEC (série des normes ISO/IEC 22237). Ce document note les bonnes pratiques de 1 à 5 : 5 représentant ce qui est difficile à atteindre. Ces bonnes pratiques sont relatives à des sujets tels que le matériel utilisé (onduleur, système de refroidissement, serveurs), le suivi de la consommation des appareils ou encore la localisation du *data center* (région chaude ou tempérée).

Ce code de bonne conduite s'accompagne également en parallèle d'un travail de normalisation de la filière. On peut citer par exemple le comité technique de normalisation CLC/TC 215 qui travaille sur la série de norme EN 50 600 qui fixe un cadre général traitant des centres de données. Ce travail de normalisation à l'échelle européenne et international est le premier pas vers une législation relative à ces infrastructures : on ne peut pas sortir un décret sans définir le *data center* au préalable.

- **ASHRAE 90.4**

L'*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, organisation internationale technique créée en 1894, publie des standards mondiaux en matière de génies thermiques et climatiques (chauffage, ventilation, air climatisé, production de froid). Elle publie un standard spécifique pour les *data centers* : le standard 90.4.

- **Règlements et planification**

Il n'existe aucun règlement spécifique aux *data centers*, ni dans les plans locaux d'urbanisme (PLU), ni dans les SCOT. En Ile-de-France, ces infrastructures numériques ne sont jamais prises en compte en tant que telles dans la planification territoriale (SCOT et PLU), à part quelques mentions dans les PADD, mais sans déclinaison réglementaire. Si le SCOT est la déclinaison territoriale des orientations du SDTAN, il évoque avant tout les questions de couverture numérique.

Les SCORAN, stratégies de cohérence régionale pour l'aménagement numérique fixent les grandes orientations souhaitées par les acteurs régionaux, afin de garantir que chaque territoire soit couvert par un schéma directeur territorial d'aménagement numérique.

Les SDAN (schémas directeur de l'aménagement numérique)¹⁸⁴ se concentrent sur l'accès au très haut débit et au déploiement de la fibre optique dans les territoires. Ils peuvent mentionner les *data centers* mais davantage comme des clients de la fibre, au même titre que les autres entreprises, que comme faisant partie des infrastructures stratégiques du numérique, et sans évoquer les dimensions spatiales et énergétiques.

Les SDUS (Schéma directeur des usages et services numériques) accompagnent le développement de nouveaux services : e-santé, e-administration ou e-éducation, en lien avec les besoins des administrés.

¹⁸⁴ L'article 23 de la loi n° 2009-1572 du 17 décembre 2009 relative à la lutte contre la fracture numérique a introduit dans le CGCT un article L. 1425-2 qui prévoit l'établissement, à l'initiative des collectivités territoriales, de schémas directeurs d'aménagement numérique (SDAN) au niveau d'un ou plusieurs départements ou d'une région.

Annexe 2 : projets de recherche en cours sur l'efficacité énergétique des *data centers*

- **ANR (Agence Nationale de la Recherche)**

L'ANR a financé certains projets sur l'efficacité énergétique dans les *data centers*. Actuellement le projet **DATAZERO** analyse la conception de *Data centers* robustes utilisant de l'énergie renouvelable.

http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-15-CE25-0012

CTRL Green : Administration Autonome de Green *data centers*

<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Projet-ANR-11-INFR-0012>

- **Union Européenne**

DOLFIN (smart grid et Demand Response)

« DOLFIN foresees a group of energy-aware Data Centres, operating in geographically dispersed locations, in a collaborative manner. Over this group, DOLFIN will design, implement, and deploy a solution that will allow the dynamic reallocation of the workload and Virtual Machines to Data Centres, where ICT resources and/or cooling facilities are more energy/cost effective.

DOLFIN *data centers* will be inter-connected with the smart grid network, providing responses on the changing demands for energy. In this respect, DOLFIN will contribute in energy stabilisation of the power distribution system.”

GEYSER

“The GEYSER Vision is based on the premise that Data Centres will act as accomplished energy prosumers within tomorrow’s Smart Cities. They will be adept at using (a mix of) of available energy sources as well as catering for flexible management of the ICT workload. This will enable the Data Centre to optimize its energy demand by continuously selecting the most attractive energy profile available.”

<http://www.geyser-project.eu/project>

GreenDataNet

“GreenDataNet intends to design, validate and demonstrate a system-level optimization solution allowing a network of urban *data centers* to collectively improve their energy and environmental performance, and act as a resource for smart grids.”

Ce projet concerne l'intégration et la gestion des ENR dans les *data centers*

<http://www.greendatanet-project.eu/media.html>

RENEW IT

The main objective of the RenewIT project is to develop a simulation tool to evaluate the energy performance of different technical solution integrating RES in several European climate regions.

<http://www.renewit-project.eu/the-project-data-centres-renewable-energy-tool/>

NESUS : Des projets de réseautage comme le projet Nesus adressent la problématique des systèmes ultrascale avec un développement durable. www.nesus.eu

Annexe 3 : détail des calculs de surface et de puissance pour les data centers de Plaine Commune et Saclay

Les chiffres donnés pour la puissance électrique disponible viennent, dans l'ordre :

1. De la communication de l'opérateur du *data center* étudié (parfois c'est la puissance disponible sur site qui est donnée, parfois la puissance des serveurs dont on peut extrapoler la puissance totale disponible).
2. De la puissance des groupes électrogènes présents sur le site. Pour les sites les plus importants, ces chiffres peuvent être trouvés dans les arrêtés d'autorisation d'exploiter des ICPE. (ne pas confondre puissance thermique et puissance électrique (voir ci-dessous)).
3. D'une extrapolation faite en utilisant la concentration électrique moyenne des salles serveurs : La concentration électrique moyenne des salles serveurs dans les data centers est d'environ 1700 W/m². La densité énergétique varie beaucoup entre les différents sites et les générations de data center. La moyenne utilisée ici a été calculée sur la base du patrimoine francilien d'Interxion, comportant des *data centers* de différentes époques. En 2014, cet opérateur a communiqué sur la concentration électrique de ses salles qui varie de 900 à 2500 W/m² avec une valeur moyenne de 1700W/m².

Les chiffres donnés pour les surfaces viennent:

1. Pour la surface des parcelles : Les surfaces proviennent du cadastre, ou le cas échéant sont mesurées à partir de Géoportail.
2. Pour les surfaces de plancher (SdP) : Les surfaces proviennent des permis de construire que nous avons pu consulter.
3. Pour les surfaces IT : Les surfaces peuvent provenir des rapports d'arrêtés d'autorisation d'exploiter des ICPE, des permis de construire ou de la communication de l'opérateur de data center. En dernier recours nous avons recours à une extrapolation, ce qui est possible si l'on dispose de la puissance IT du site.

Les éléments utilisés pour les extrapolations sont les suivantes :

1. Il faut faire la distinction entre la puissance des serveurs et la puissance disponible pour le site. Il est difficile d'être parfaitement exact sur ces valeurs mais on peut partir sur la tendance suivante : $P_{disponible} = 3 * P_{IT}$
 - Cette approximation s'explique par la présence de la climatisation qui peut représenter jusqu'à 50% des consommations électriques d'un site, et sur le besoin en redondance électrique du site. Cette hypothèse s'appuie sur des cas de *data centers* bien documentés et notre rencontre avec M. Khun, architecte qui a réalisé de nombreux projets pour Interxion.
2. Une hypothèse purement théorique est utilisée en dernier recours. En se penchant sur les sites dont on connaît déjà la surface IT, on peut voir qu'il ressort en moyenne que $\frac{Surface\ IT}{Emprise\ au\ sol} = 0.73$

Moyenne pour 9 valeurs avec un écart type de 0,13 (soit 18%).

 - Cette hypothèse n'est valable que pour des data centers se trouvant dans un bâtiment dédié.
 - Cette hypothèse est utilisée uniquement pour avoir un ordre de grandeur pour les data center dont nous ne connaissons que l'emplacement. L'emprise au sol est mesurée sur Géoportail.

3. Il est également possible de déterminer la puissance disponible du site par l'information disponible sur les groupes électrogènes. Un exemple avec les groupes électrogènes de Data4 sur le site de Marcoussis à l'aide de documents présents dans le permis de construire :

Le data center DC3 est équipé de 3 groupes électrogènes de 2500 kVA chacun, dont un en redondance. Dans le Permis de construire, on trouve que la puissance thermique installée est de 4794 kW pour chaque groupe électrogène, soit 14,382 MW de puissance thermique installée pour ce bâtiment.

Cette valeur est calculée à l'aide :

-Du PCI du fioul : 42720 J/kg

-De la consommation spécifique du moteur : CS=0.202 kg/kWh

-De la Puissance nominale du moteur : Pn=2000 kW

Calcul de la puissance thermique : $P_{th} = PCI * CS * P_n$ (attention aux unités de temps)

On trouve donc que ces groupes électrogènes ont un rendement de $\frac{P_{elec}}{P_{th}} = \frac{2000}{4797} = 0,42$

Il faut donc fournir 4797 kW thermique pour obtenir une puissance électrique de 2000 kW. Le groupe électrogène a donc un rendement de 42%.

Dans les dossiers ICPE, la puissance annoncée est celle de la puissance thermique maximale. Pour avoir une approximation de la consommation électrique du site, il faut donc prendre en compte ce rendement de 42%.

Annexe 4 : entretiens réalisés par Cécile Diguët et Fanny Lopez.

Mark Alatorre, ingénieur, *California State Energy Commission*, Sacramento, Californie.

Guy Allee, ingénieur, Intel, Portland, Oregon.

David Ashuckian, directeur adjoint de l'*Efficiency Division, California State Energy Commission*, Sacramento, Californie.

Wazim Aziz, directeur regional Zayo, ville de New York, New York.

Roger Baig Viñas, fondateur de Guifi net, Barcelone.

Crystall Ball, responsable relation publique de *Bonneville Power Administration (BPA)*, Portland, Oregon.

Daniel Balouek, chercheur au Laboratoire RD12, *Distributed Systems and Resource Management, Cloud/Edge Computing et IoT*, Rutgers university, New Jersey.

Benjamin Bayart, cofondateur de la Quadrature du Net, co-président de la fédération des Fournisseur d'Accès à Internet associatifs (FFDN), Paris.

Gustav Bergquist, vice-président et chef des opérations à Multigrind Data Centers, Stockholm.

Eric Bothorel, député LaREM, chargé du numérique, Paris.

Thomas Bourgeois, spécialiste CHP, *Pace Energy and Climate center*, ville de New York, New York.

Edward Ted Borer, responsable des opérations techniques, de la micro-grid et du *data center* de l'université Princeton, New Jersey.

Don Bray, ingénieur, directeur de service, *Silicon Valley Energy*, Sunnyvale, Californie.

Anders Broberg, Stokab, Responsable de la Communication, Stockholm.

Eric Carter, directeur de la transmission et des comptes clients, *Bonneville Power administration*, Portland, Oregon.

Axelle Champagne, directrice générale adjointe, pôle développement économique et innovation, EPCI Paris Saclay.

Matthew J. Chancellor, responsable régional, PacifiCorp, Bend, Oregon.

Mathieu Chazelle, ingénieur, architecte, fondateur d'Enia architectes, Paris.

Yen Han Chen, urbaniste, responsable du département urbanisme, ville de Santa Clara, Californie.

Richard Clark, manager du campus de *data center* de Vantage, Santa Clara, Californie.

Mark Clemons, directeur du développement économique, Hillsboro, Oregon.

Frédéric Coeille, directeur général de Zayo *data center*, Paris.

Gary Cook, responsable du département IT à Greenpeace, rédacteur en chef des rapports sur l'impact énergétique des technologies numériques, San Francisco, Californie.

Colin Cooper, directeur du développement urbain, ville de Hillsboro, Oregon.

Fabrice Coquio, PDG Interxion groupe France, Paris.



Colin Corby, chef de projet, *California State Energy Commission*, Sacramento, Californie.

Clara Cuso, coordinatrice au sein du réseau de télécommunication Guifi net, Barcelone.

Romarc David, direction du numérique de l'Université de Strasbourg, Paris.

Kris De Decker, fondateur du site internet low tech *lowtech magazine*, Barcelone.

Pierre-Jean Delhoume, responsable énergie, Uniper, Paris.

Michael Downey, chef de projet infrastructure et *data centers*, Gensler architects, San Francisco, Californie.

Fabienne Dupuy, adjointe au Directeur territorial Enedis en Seine-Saint-Denis.

Antoine Dussouich, directeur général adjoint à la Stratégie, à la Performance et aux Nouveaux Services de l'Établissement public d'aménagement (EPA) Paris-Saclay (ex-EPPS).

Scott Edelman, responsable du programme d'occupation des sols et du développement, Prineville, Oregon.

Jason Eisdorfer, directeur des programmes des services énergétiques, *Oregon Public Utility Commission*, Portland, Oregon.

Mickael Evrard, délégué général de l'Agence locale de l'énergie et du climat (Alec) de Plaine Commune, Saint-Denis.

Ben Falber, responsable des projets de stockage énergétique, *New York State Energy Research and Development Authority* (NYSERDA), ville de New York, New York.

Erik Ferrand, fondateur et président de Qarnot Computing, Paris.

Steve Forrester, directeur municipal, Prineville, Oregon.

Efraïn Foglia, fondateur de Guifi net, Barcelone.

Anish Gautam, ingénieur, *California State Energy Commission*, Sacramento, Californie.

Damien Giroud, responsable France solutions datacenter, Schneider Electric, Paris.

Jim Gallagher, directeur général du *Microgrid Initiatives program* pour le Département de l'énergie, ville de New York, New York.

Wendy Gerlitz, directrice des politiques publiques, *NW Energy Coalition*, Portland, Oregon.

John Gilbert, directeur de Rudin management, promoteur immobilier (propriétaire du bâtiment 32 av. of the Americas), ville de New York, New York.

Jim Grady, responsable technique, 365 datacenters, edge *data centers*, ville de New York, New York.

Joel Guignard, chef d'Agence Marché d'Affaires Ile de France chez GRDF, Paris.

Barry Hooper, directeur du service construction au département de l'environnement de la ville de San Francisco, Californie.

Lisa Hunrichs, urbaniste, Portland Metro, Portland, Oregon.

Caroline Humbey, chargée de projet urbanisme sur la Courneuve, plaine commune agglomération, Saint Denis.

Fred Jalali, manager énergie de *Zayo Data center* à Santa Clara, Californie.

David Kinney, responsable technique, *Telehouse data centers*, ville de New York, New York.

Eric Klann, ingénieur municipal, *Prineville*, Oregon.

Simon-Pierre Kuzar, EPAPS Oin Paris Saclay, Paris.

Christina Lee, ingénieur responsable de la sécurité du transport, *Bonneville Power administration*, Portland, Oregon.

Claire Le Strat, Responsable Transition énergétique, Communauté d'agglomération Paris-Saclay EPCI, Saclay.

Virginia Lew, directrice du bureau *Energy Efficiency Research, California State Energy Commission*, Sacramento, Californie.

Stefan Lindbom, Ellevio, Stockholm.

Brigitte Loubet, cheffe des pôles Énergie, conseiller spécial chaleur à la direction régionale et interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie (DRIEE), Paris.

Michael Lozano, ingénieur, *California State Energy Commission*, Sacramento, Californie.

Ted Mahl, architecte et directeur de l'agence *CAC Architects*, San Francisco, Californie.

Hervé Mallet, directeur énergie à la direction technique & SI d'Orange France, Paris.

Vincent Margout, délégué à la qualité et au développement durable, Grand Paris Aménagement, Paris.

Daniel Meltzer, vice-président Leasing, *Sabey*, ville de New York, New York.

Chris Meyer, directeur du *Building Standards Office, California State Energy Commission*, Sacramento, Californie.

Kevin Mori, ingénieur, *Efficiency Division, Codes and Standards group, California State Energy Commission*, Sacramento, Californie.

Anu Natarajan, conseillère développement durable, cabinet de la Maire de la ville de Santa Clara, Californie.

Skip Newberry, président et directeur général de *Technology Association of Oregon*, Portland, Oregon.

Riki Nishimura, chef de projet urbain, *Gensler architects*, San Francisco Californie.

Mark T. Osborn, ingénieur, fondateur et associé de *Cadmus Energy Services*, Portland, Oregon.

Manish Parashar, professeur et chercheur au *Department of Electrical and Computer Engineering*, Laboratoire RDI2, Rutgers University, New Jersey.

Julie Peacock, conseiller principale en matière de politiques, *Oregon Public Utility Commission*, Portland, Oregon.

François Pellegrini, professeur à l'université de Bordeaux, membre de la Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL), Paris.

Christophe Perron, fondateur et président de *Stimergy*, Paris.

Jacques Perrochat, directeur France solutions datacenter, Schneider Electric, Paris.

Valérie Peugeot, prospectiviste, Orange Labs, membre de la CNIL et de la VECAM - ancienne vice-présidente du Conseil National du Numérique, Paris.

Gaëlle Pinson, cheffe de projet numérique : data centers et smart-city, Société du Grand Paris, Paris.

Guillaume Planchot, directeur du développement réseaux de chaleur et de froid IDEX, Paris.

Michael Poleshuk, vice President, Equinix, IBX Operations, région nord, ville de New York, New York.

Jeff Raker, responsable de projet d'investissement, Portland Metro, Portland, Oregon.

Ted Reid, responsable de l'urbanisme régional, Portland Metro, Portland, Oregon.

David Rinard, directeur développement durable, Equinix (siège), San Jose, Californie.

Ivan Rodero, professeur et chercheur au Laboratoire RD12, *Department of Electrical and Computer Engineering*, Rutgers University, New Jersey.

Michael Rohwer, directeur adjoint TIC, *Future of Internet Power, Business for Social Responsibility (BSR)*, San Francisco, Californie.

Betty Roppe, Maire de Prineville, Oregon.

André Rouyer, responsable du comité infrastructure et numérique au Gimélec, Paris.

Erik Rylander, responsable du Data Center Cooling and Heat recovery Stockholm Exergi, Stockholm.

David Schirmacher, président de 7x24 Exchange International, président de *Reset Advisors*, ancien vice President des opérations pour Digital Realty, ville de New York, New York.

Arman Shehabi, chercheur au Berkeley Lab, *Energy Analysis and Environmental Impacts Division of the Energy Technologies*, Berkeley, Californie.

Phil Stenbeck, directeur de l'urbanisme, ville de Prineville, Oregon.

Eric Sieberath, directeur de cabinet adjoint à la Communauté Paris-Saclay (EPCI), Saclay.

Thibaut Siméon, Cofondateur de *Critical Building*, Fontenay-aux-Roses.

Bruno Spiquel, activiste chez Scani, Paris.

Doug Staker, vice-président du développement de *Demand-energy, Enel*, ville de New York, New York.

Wendy Stone, responsable client de la Silicon Valley Power, compagnie municipale d'électricité, Santa Clara, Californie.

Bill Strong, vice-président régional des opérations d'Equinix, San Jose, Californie.

Elizabeth C. Taveras, ingénieur, cheffe de projet, *New York State Smart Grid Consortium*, ville de New York, New York.

Letha Tawney, directrice de l'innovation pour les énergies renouvelables, *World Resources Institute*, Portland, Oregon.

Laurent Trescartes, Cofondateur et directeur de *Critical Building*, Fontenay-aux-Roses.



Paul Vaccaro, vice-président responsable des opérations et de l'ingénierie, Informart *Data center*, Hillsboro, Oregon, Oregon.

Patrick Vassallo, *conseiller* communautaire délégué au développement local de *Plaine Commune* et maire adjoint à l'économie sociale et solidaire, Saint-Denis.

Stanley Voronov, senior manager, IBX Operations, région nord, ville de New York, New York.

Alain Vaucelle, chargé de recherche mission TIC pour *Plaine Commune*, Saint-Denis.

Kevin Whitener, responsable smart grid du projet *Dispatchable Standby Generation* à Portland General Electric, Portland, Oregon.



Bibliographie sélective

Agence Anyoji et Beltrando, *Cahier de prescriptions urbaines, paysagères et architecturales, étude de programmation urbaine et économique*, décembre 2012. Archive du service de la ville.

Alec, 2013, *Les data centers sur Plaine Commune*. <http://www.alec-plaineco.org/les-data-centers/> [consulté en ligne le 5 décembre 2017].

Alix Nicole, Bancel Jean Louis, Coriat Benjamin, Sultan Frédérique (éds), 2018, *Vers une république des biens communs*, Paris, Les liens qui libèrent.

Andrae Anders S. G. et Edler Tomas, 2015, "On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030", *Challenges* 6, 2015, pp. 117-157.

Arnaud St Bill, 2009, « Preparing for Climate Change through Energy Internet and eVehicles », <https://green-broadband.blogspot.com/> [consulté en ligne le 5 décembre 2018].

Association Négawatt, 2017, *Scénario NégaWatt 2017 – 2050*. https://www.negawatt.org/IMG/pdf/synthese_scenario-negawatt_2017-2050.pdf, p.8. [consulté en ligne le 6 décembre 2017].

Baig Roger, Dalmau Lluís, Roca Ramon, Navarro Leandro, Freitag Felix, Sathiaselan Arjuna, 2016, "Making Community Networks Economically Sustainable: The Guifi.net Experience", in *Proceeding GAIA 16, Proceedings of the 2016 workshop on Global Access to the Internet*. <http://people.ac.upc.edu/leandro/pubs/baig-sigcomm.pdf> [consulté en ligne le 5 novembre 2018].

Baig Roger, Freitag Felix, Navarro Leandro, 2016, "Cloudy in guifi.net: Establishing and sustaining a community cloud as open commons." <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X1732856X> [consulté en ligne le 20 novembre 2017].

Barroso Luiz André et Hölzle Urs, 2007, "The Case for Energy-Proportional Computing", *IEEE Computer*, Vol 40, Issue 12, décembre.

Bernward Joerges, 1998, « Large Technical Systems : Concepts and Issues », in Hugues T. P., Mayntz R. (dir.), *The Development of Large Technical Systems*, Francfort, Campus Verlag, pp. 9-32.

Bertho Catherine, 1984, « Les réseaux téléphoniques de Paris – 1879-1927 », in *Réseaux*, volume 2, n°4 1984, pp 25-53.

Berthoud Françoise, Lefevre Laurent, Gossart Cédric, 2015, "ICT is part of climate change ! Can we reduce its impact and apply good practices and tools to other society domains?", "Our Common Future Under Climate Change" International Conference, Paris.

Berthoud Françoise, Drezet Éric, Lefevre Laurent et Orgerie Anne-Cécile, 2015, "Le syndrome de l'obésiciel : des applications énergivores", <https://interstices.info/le-syndrome-de-lobesiciel-des-applications-energivores/> [consulté en ligne le mars 2017].

Bihouix Philippe, 2018, « Osons une innovation low tech, sobre et résiliente ! », <https://entreprisecontributive.blog/2018/01/07/osons-une-innovation-low-tech-sobre-et-resiliente-par-philippe-bihouix/> [consulté en ligne le 18 février 2018].

CDC, CGE, CGET, 2015, *Guide sur le cloud computing et les datacenters à l'attention des collectivités locales*.

Cisco, 2018, *Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016-2021*. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.html> [consulté en ligne le 10 janvier 2017].

Cisco, 2016, *Internet of Things at-a-glance* : <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/se/internet-of-things/at-a-glance-c45-731471.pdf> [consulté en ligne le 25 mars 2017].

Cisco, 2018, *IoT* : <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-l-iot-monte-en-puissance-avec-la-gestion-de-parcs-automobiles-73752.html> [consulté en ligne le 13 mars 2018].

De Decker Kris, 2018, "How to Build a Low-tech Website? ", <https://solar.lowtechmagazine.com/2018/09/how-to-build-a-lowtech-website.html>, [consulté en ligne le 10 novembre 2018].



De Decker Kris, 2015, "How to Build a Low-tech Internet, <https://solar.lowtechmagazine.com/2015/10/how-to-build-a-low-tech-internet.html> [consulté en ligne le 10 novembre 2017].

Digital Equity Laboratory, 2018, « What is Digital Equity? — Part I: Communications Resilience, » <https://www.digitalequitylab.org/what-is-digital-equity-part-1/> [consulté en ligne le 10 novembre 2018].

DGE-CDC-CGET, 2015 *Guide sur le Cloud computing et les data centers à l'attention des collectivités locales*. https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/secteurs-professionnels/numerique/guide-cloud-computing-et-datacenters-2015.pdf [consulté en ligne le 10 janvier 2017].

Dobigny Laure, 2017, *Le Choix des énergies renouvelables. Socio-anthropologie de l'autonomie énergétique locale en Allemagne, Autriche et France*, thèse sous la dir. d'Alain Gras, Université Paris I.

Dobigny Laure, 2009, « L'autonomie énergétique : acteurs, processus et usages. De l'individuel au local en Allemagne, Autriche, France », in Dobré, M., Juan, S. (éds), *Consommer autrement. La réforme écologique des modes de vie*, Paris, L'Harmattan, p.245-252.

Ener'cet, 2016, *L'efficacité énergétique dans les data centers. Etude gisement du parc français*, Etude ENER'CET réalisée avec l'ATEE, l'ADEME, le CRIP, l'AGIT, le GIMELEC et le CESIT (aujourd'hui France Data centers). <http://www.orace.fr/efficacite-energetique-data-centers-etude-de-gisement-parc-francais/> [consulté en ligne le 10 janvier 2017].

European Commission, 2008, *Code of Conduct on Data Centers Energy Efficiency*.

Feltin Gabrielle, Bouterin Bernard, Canehan Xavier, 2017, « Indicateurs pour un datacenter efficient ? Mesurer pour améliorer ! », JRES.

(de) Filippi Primavera, 2015, « Cloud computing » dans *Abécédaire des architectures distribuées*, Méadel Cécile et Musiani Francesca (éds), Presses des Mines, Paris, p. 49.

(de) Filippi Primavera et Tréguer Félix, 2015, « Expanding the Internet Commons: the subversive potential of Wireless Community Network », dans *Journal of Peer Production, Issue No. 6: Disruption and the Law*. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01306630v2/document> [consulté en ligne le 5 décembre 2018].

Flipe Fabrice, Dobré Michelle, Michot Marion, 2013, *La face cachée du numérique L'impact environnemental des nouvelles technologies*, L'échappée.

Ganeshalingam Mohan, Shehabi Arman, Desroches Louis-Benoit, 2017, *Shining a Light on Small Data centers in the U.S*, Energy Analysis and Environmental Impacts Division, Lawrence Berkeley National Laboratory.

Goat Cypher, 2018, « La Mezzanine : histoire d'un centre d'hébergement associatif au format libre ! » <https://www.aquilenet.fr/services/h%C3%A9bergement-serveur/> <https://tetaneutral.net/adherer/> [consulté en ligne le 10 décembre 2018].

Graham Stephen et Marvin Simon, 2001, *Splintering Urbanism*, Londres, Routledge.

Groupe EcoInfo, 2012, *Impacts écologiques des Technologies de l'Information et de la Communication - Les faces cachées de l'immatérialité*, Editions EDP Sciences.

Halpern Orit, 2017, « L'architecture comme machine: la ville intelligente déconstruite » in Andrew Goodhouse (dir.), *Quand le numérique marque-t-il l'architecture ?* CCA, Stenberg Press, p.126.

Howell Jenalea, 2017, « Number of Connected IoT Devices Will Surge to 125 Billion by 2030, IHS Markit Says » <https://technology.ihs.com/596542/number-of-connected-iot-devices-will-surge-to-125-billion-by-2030-ihs-markit-says> [consulté en ligne le 5 novembre 2018].

Huguet, François, 2016, *(Re)coudre avec du sans fil. Enquête sur des pratiques de médiation infrastructurelle*, thèse sous la direction d'Annie Gentès et de Jérôme Denis, Paris ENST.

Ferreboeuf Hugues, 2018, Rapport *Lean ICT*, The shift project, 2018. https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2018/05/2018-05-17_Rapport-interm%C3%A9diaire_Lean-ICT-Pour-une-sobri%C3%A9t%C3%A9-num%C3%A9rique.pdf [consulté en ligne le 5 avril 2018].

Iddri, FING, WWF France, GreenIT.fr, 2018, *Livre blanc Numérique et Environnement*.

http://fing.org/IMG/pdf/Livre_blanc_numerique_environnement_livreblancecolonum.pdf, 2018. [consulté en ligne le 15 avril 2018].

Institut de Veille Sanitaire, 2003, *Impact sanitaire de la vague de chaleur d'août 2003 en France. Bilan et perspectives*, octobre 2003.

Jackson Tim, 2010, *Prosperité sans croissance : La transition vers une économie durable* [« Prosperity Without Growth: Economics for a Finite Planet », 2009], De Boeck, 2010,

Jonathan Koomey, « Talking Sense About Bitcoin Electricity » 2018, Use <http://www.koomey.com/post/179556571967> <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=AP43372517> [consulté en ligne le 3 janvier 2018].

Lasalle Jones Lang, 2016, *Data center Outlook. Strong Demand, Smart Growth*, rapport JLL Americas Research.

Limonier Kevin, 2017, « Internet russe, l'exception qui vient de loin », *Le monde diplomatique*. <https://www.monde-diplomatique.fr/2017/08/LIMONIER/57798>

Lopez Fanny, 2019, *L'ordre électrique, infrastructures énergétiques et territoires*, Editions Metiss Press.

MacGillivray Carrie et Turner Vernon, 2017, « IDC FutureScape: Worldwide Internet of Things 2018 Predictions », Web Conference: Tech Buyer. <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=AP43372517> [consulté en ligne le 7 mars 2018].

Méadel Cécile et Musiani Francesca (éds), 2015, « Les réseaux Mesh » dans *Abécédaire des architectures distribuées*, Presses des Mines, Paris, Collection.

Moore Jason W. (éds), *Anthropocene or Capitalocene ? : Nature, History, and the Crisis of Capitalism*, PM Press, 2016.

Moriset Bruno, 2007, « Les forteresses de l'économie numérique. Des immeubles intelligents aux hôtels de télécommunications », *Géocarrefour*, Vol. 78/4, 2003.

Morozov Evgeny et Bria Francesca, 2018, *Rethinking the Smart city, Democratizing Urban Technology*, Rosa Luxemburg Stiftung, Rapport, New York.

Musiani Francesca, 2015, « Stockage distribué » dans *Abécédaire des architectures distribuées*, Méadel Cécile et Musiani Francesca (éds), Presses des Mines, Paris, Collection I, p.209

Musiani Francesca, Schafer Valérie, 2011, « Le modèle Internet en question, 1970-2010 », in *Flux*, n°85-86, pp. 62-71.

Association Négawatt, 2017, *Scénario négaWatt 2017 – 2050*. https://www.negawatt.org/IMG/pdf/synthese_scenario-negawatt_2017-2050.pdf, p.8. [consulté en ligne le 15 mai 2018].

Navigant, 2015, *Community Microgrid Case Study and Analysis Report*, Rapport préparé pour le New York State Smart Grid Consortium. http://nyssmartgrid.com/wp-content/uploads/CommunityMicrogridCaseStudyandAnalysisReport_2015-08-133.pdf [consulté en ligne 10 octobre 2017].

Orgerie Anne-Cécile, Dias de Assunção Marcos et Lefèvre Laurent, 2014, "A Survey on Techniques for Improving the Energy Efficiency of Large Scale Distributed Systems", *ACM Computing Surveys*, Volume 46, Numéro 4.

Picon Antoine, 2015, *Smart Cities a Spatialised Intelligence*, Wiley.

Pitron Guillaume, 2018, *La guerre des métaux rares, la face cachée de la transition énergétique et numérique*, Editions : Les liens qui libèrent.

Région Ile-de-France, 2012, Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Energie de l'Île-de-France, http://www.srcae-idf.fr/IMG/pdf/SRCAE_-_Ile-de-France_version_decembre_2012_vdefinitive_avec_couverture_-_v20-12-2012_cle0b1cdf.pdf [consulté en ligne 10 octobre 2017].

Shehabi Arman, Josephine Sarah, Sartor Dale A, Brown Richard E, Herrlin Magnus, G Koomey Jonathan, Masanet Eric R, Nathaniel Horner, Inês Lima Azevedo, William Lintner, 2016, *United States Data center Energy Usage Report*, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-1005775.

Tinetti Benoit, Duvernois Pierre-Alexis, Le Guern Yannick., Berthoud Françoise, Charbuillet Carole, Gossart Cédric, Orgerie Anne-Cécile, Lefèvre Laurent, de Jouvenel François, Desaunay Cécile, Hébel Pascale, 2016, *Potentiel de contribution du numérique à la réduction des impacts environnementaux : Etat des lieux et enjeux pour la prospective* – Rapport Final ADEME, 145 pages. <https://www.ademe.fr/potentiel-contribution-numerique-a-reduction-impacts-environnementaux> [consulté en ligne le 5 février 2017].

Veltz Pierre, 2015, *Petite ensaïclaypédie*, Editions La Découverte, Paris.

Whitney Josh / Anthesis et Delforge Pierre /NRDC, 2018, *Data center Efficiency Assessment*. <https://www.nrdc.org/sites/default/files/data-center-efficiency-assessment-IP.pdf> [consulté en ligne 10 octobre 2018].

Table des figures

Figure 1. Intérieur d'un <i>data center</i> Oracle et celui de la clinique de Cleveland réalisé par l'agence Gensler, Crédits=© 2016.....	9
Figure 2. Tendances de consommation électrique 2010-2030 : scénario du pire. Crédits=©Etude Andrae/Edler.....	19
Figure 3. Les données du véhicule dit autonome, 2017. Crédits=© Intel.Corp.	20
Figure 4. Courbe des technologies émergentes, 2017, Crédits=© Gartner.....	21
Figure 5. Schéma croisant les échelles, les usages et les modes d'implantation spatiale des <i>data centers</i> Crédits=©Cécile Diguët.	27
Figure 6. Intérieur Equinix, Crédits=© Equinix.	30
Figure 7. <i>Data center</i> de Gensler à Chengdu, Crédits=© Gensler, 2017.	30
Figure 8. 32 avenue of Americas et 60 Hudson Street Crédits=© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.	32
Figure 9. Tour Sabey Crédits=© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.....	33
Figure 10. 111 8th Avenue, Chelsea, New-York City. Crédits=© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.	34
Figure 11. Pittock Block, Portland Crédits=© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.	35
Figure 12. <i>Data centers</i> au centre de Paris : Téléhouse 32 rue des Jeuneurs, Téléhouse 137 boulevard Voltaire, Zayo 19-21 boulevard Poissonnière =© Google Map.	35
Figure 13. Carte des <i>data centers</i> à Plaine Commune.	37
Figure 14. Site Eurocopter Crédits=© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.....	40
Figure 15. Plan du site Eurocopter Crédits=© Eurocopter.....	40
Figure 16 La zone d'activités numériques Crédits=© Ville d'Hillsboro, 2018.....	43
Figure 17 <i>Data centers</i> d'OVH et d'Adobe à Hillsboro Crédits=© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.	43
Figure 18 <i>Data center</i> d'Infomart, Hillsboro, Crédits=© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.....	44
Figure 19 Campus Vantage Crédits=© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.....	45
Figure 20. <i>Data center</i> d'Apple et Facebook, Prineville Crédits=© Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.	47
Figure 21. Amazon Web Services, Umatilla. Crédits © Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.	48
Figure 22. Carte des <i>data centers</i> , Saclay 2018.	51
Figure 23. Campus Data 4. Crédit=©Data 4 (gauche) Cécile Diguët et Fanny Lopez (droite), 2018... ..	53
Figure 24. Toiture du 111 8th avenue Crédit =©Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.	65
Figure 25. Intérieur du 111 8th avenue. Avec cuve de fioul et stockage thermique. Crédit =©Cécile Diguët et Fanny Lopez, 2018.	65
Figure 26. Carte de l'étude Ademe 2017 sur la récupération de chaleur fatale, p 39.....	66
Figure 27. Chaudière numérique Stimergy installé dans un bâtiment à Échirolles AVEC L'OPAC 38, Stimergy. Crédit =© Stimergy, 2018.....	69
Figure 28. Chauffage Qarnot Computing installé à Bordeaux. Crédit =© Qarnot, 2018.....	70
Figure 29. Figure 29. Microsoft data centers parc Crédit =© Microsoft, 2018.	71

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.





L'IMPACT SPATIALE ET ENERGETIQUE DES *DATA CENTERS* SUR LES TERRITOIRES

Résumé

Face à la croissance massive des échanges de données et des besoins de stockage, l'impact spatial et énergétique des *data centers* va être de plus en plus structurant pour les territoires. Leur diversité d'usages, d'acteurs, de taille et d'implantations rend aujourd'hui complexe la lecture de leurs dynamiques et de leurs effets spatiaux.

Le présent rapport s'attache donc à donner une image du paysage des *data centers* en France et dans trois territoires des Etats-Unis, représentant chacun des situations spatiales et énergétiques différentes (ville dense, espace périphérique, rural).

Facteur potentiel de déséquilibre des systèmes énergétiques locaux, objets dont l'accumulation urbaine et la dispersion rurale questionnent, les *data centers* font ici l'objet d'une analyse approfondie pour mieux appréhender les nouveaux territoires numériques en construction, les solidarités énergétiques à construire et les alliances d'acteurs à mettre en place.

Auteurs de l'étude :

Cécile Diguët IAU ÎDF et Fanny Lopez Eavt

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

www.ademe.fr

