

Working Paper

> N°04/2019

**Territoires numériques et
transition énergétique :
les limites de la croissance**

Cécile Diguët
Fanny Lopez

SciencesPo

CITIES AND DIGITAL TECHNOLOGY CHAIR

The “Cities and Digital Technology” Chair of Sciences Po’s Urban School has been launched in March 2017 to better grasp the impact of digital technologies on urban governance. Funded by four sponsoring firms (Cisco, La Poste, RTE, Caisse des Dépôts), the Chair aims to create new research fields exploring the interaction between digital technology and cities in an empirical and comparative perspective.

Territoires numériques et transition énergétique : les limites de la croissance

Cécile Diguët, urbaniste à l'Institut Paris Région, et chercheuse associée au LIAT (Laboratoire Infrastructure Architecture et Territoires) de l'école d'architecture Paris Malaquais

Fanny Lopez, Maître de conférence à l'École d'architecture de la ville et des territoires et chercheuse au LIAT (Laboratoire Infrastructure Architecture et Territoires)

Résumé

Les infrastructures numériques physiques, et les data centers en premier lieu, souffrent d'une invisibilité persistante qui minimise la perception de leurs impacts spatiaux et énergétiques sur les territoires. Elles peuvent même être présentées comme un levier pour la transition énergétique en cours. Pourtant, au-delà d'une part croissante dans la consommation d'énergie mondiale, les data centers impactent très concrètement tous types d'espaces, des cœurs métropolitains aux périphéries d'activités, en passant par les territoires ruraux et périurbains. Cela pose plusieurs questions, notamment : l'intérêt d'une planification numérique, énergétique et foncière ; l'acculturation des collectivités locales sur les infrastructures numériques ; les nouvelles solidarités énergétiques à imaginer.

Mots clés : data center, transition énergétique, territoires numériques

Introduction

Les *data centers* sont présents partout en centre-ville, en zone périphérique, dans les territoires ruraux, les régions reculées et désertiques. Qu'ils soient connectés aux réseaux électriques, autonomes ou intégrés dans des cercles d'échanges énergétiques de périmètres variables (îlot, quartier, ville, territoire), ils redéfinissent à chaque fois le projet énergétique des territoires dans lesquels ils s'implantent, car leur consommation d'électricité est très élevée. Le principe d'accroissement exponentiel des données depuis l'explosion du numérique a pour corollaire une augmentation des besoins en espace et en énergie. Le programme *data center* pose des questions spatiales et énergétiques stratégiques, alors même que l'empreinte environnementale de la *smart city* et de nos vies numériques reste insuffisamment débattue¹. L'industrie des centres de données semble entretenir sciemment un effacement qui limite ou repousse les questionnements sur la viabilité de nos pratiques et de leur miroir énergétique. Est-ce que le dévoilement de ces infrastructures de stockage et de leur fonctionnement énergétique ne participerait pas à révéler le caractère insoutenable du système technique numérique et son économie mondialisée, qui fonctionne sur l'invisibilité et la distance ? En analysant différentes situations d'implantation de centres de données aux États-Unis et en France², nous proposons de replacer au centre des débats la démesure énergétique et spatiale du monde numérique³.

La démesure énergétique des *data centers* à l'heure des transitions

Paradoxalement à l'imaginaire de dématérialisation inscrit dans la tradition de l'utopie cybernétique qui a fait d'internet une sorte de territoire magique où les flux circulent sans physicalité, rien n'est plus consommateur d'espace, d'énergie et de ressources que les technologies numériques. Le secteur informatique (matériels, réseaux, centres de données) consommait 7% de l'électricité mondiale en 2013⁴. 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.

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). Il est doté de systèmes de refroidissement et de récupération de chaleur ainsi que des équipements de secours : batteries, onduleurs, groupes électrogènes. Un *data center* peut contenir différentes technologies en fonction des besoins applicatifs, par exemple des serveurs

¹ 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.

² Respectivement le premier et le cinquième pays en termes d'installation de *data centers*.

³ Cet article est issu d'une recherche : Cécile Diguët et Fanny Lopez (co-direction) *From the Cloud to the Ground, L'enjeu éco-systémique des infrastructures numériques*, Financement : Ademe APR 2017, Institut de recherche de la Caisse des dépôts et des consignations, Fondation Tuck (2017-2019).

⁴ *On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030* ; Anders S. G. Andrae and Tomas Edler ; 2015

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 d'administrations 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*.

S'ils sont présents partout dans le monde, l'implantation des *data centers* se concentre aux États-Unis, en Europe et en Asie. Ils seront l'un des plus importants postes de consommation électrique du XXI^e siècle, portés par une démultiplication du trafic internet⁵, l'explosion des échanges de données, la croissance du cloud et les prévisions de 100 milliards d'objets connectés pour 2030... Leur croissance effrénée et irraisonnée questionne l'obsolescence programmée de leurs systèmes informatiques ainsi que la dilapidation énergétique associée à l'économie numérique globalisée. Une grande quantité d'électricité est nécessaire non seulement pour leur fonctionnement mais aussi pour climatiser les salles machines et les racks. En termes d'équipement, chaque centre de données - généralement connecté par sécurité à une double arrivée d'électricité - est équipé de générateurs de secours et de salles de batteries assurant une autonomie en cas de coupure sur le réseau. Les coupures restant relativement rares, cette démultiplication infrastructurelle crée une redondance dont la mise en utilité pose aujourd'hui question.

Alors que la recherche de sobriété énergétique est mise en avant pour réduire les émissions de CO², les consommations électriques croissantes des *data centers* réjouissent les acteurs énergétiques. Les centres de données 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. Ils peuvent cependant avoir d'autres exigences.

⁵ Cisco, *Network Traffic Forecast*, Rapport, 2016.

Les centres de données de colocation⁶ s'inscrivent prudemment dans la dynamique de transition énergétique, en trouvant un équilibre entre énergie à bas coût et 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 (ENR). En revanche, les grands acteurs du numérique sont souvent beaucoup plus exigeants, pour leurs propres centres de données, mais aussi pour ceux qui hébergent les localisations métropolitaines de leurs clouds. Certains comme Facebook, Autodesk et Salesforce se sont rassemblés dans des organisations telle que la BSR (Business Social Responsibility), qui, à travers son programme « The future of Internet Power », fait pression sur les centres de données de colocation pour aller vers plus d'énergies renouvelable et de transparence. D'autres industriels appartiennent à REBA, la *Renewable Energy Buyers Alliance*, Alliance des acheteurs d'énergies renouvelables, en vue de négocier des tarifs et des offres avec les acteurs de l'énergie. Les plus connus, Google, Facebook ou 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. Les industriels américains de *data centers* sont donc clairement moteurs de la transition énergétique en exerçant une forme de pression sur les compagnies traditionnelles. Sur la côte Ouest, les GAFAM envisagent également de plus en plus de développer leur autonomie énergétique et leurs propres infrastructures de production sur site ou à proximité. C'est le cas de Microsoft, fortement engagé dans le développement de micro-réseaux autonome ou encore d'Apple qui a créé sa filiale *Apple Energy*.

En France, les coopérations entre les acteurs du numérique et de l'énergie apparaissent moins développées : on trouve d'un côté le Gimelec, touchant aux dimensions avant tout électriques du numérique, de l'autre France Data Center qui tente de représenter l'industrie des *data centers* sans, à ce stade, de positionnement fort sur les dimensions environnementales et la sobriété énergétique, bien qu'un groupe de travail entre professionnels ait été créé mi-2019 sur le « data center, levier de la transition énergétique ». C'est l'alliance Green It (AGIT) qui semble porter plus fortement ce positionnement dans une double logique : l'utilisation du numérique pour la transition écologique, et la réduction de l'impact environnemental du secteur numérique dans sa globalité. Cependant, la position dominante d'EDF et de l'énergie nucléaire ne pousse pas les acteurs du numérique à exiger le passage aux énergies renouvelables, et les GAFAM n'y sont pas assez présents pour exercer une telle pression. En outre, l'AGIT rencontre des difficultés à intégrer les grands opérateurs de la colocation à cet engagement environnemental.

Ces acteurs se reposent notamment sur l'amélioration globale de la performance énergétique des bâtiments (avec la course à un PUE⁷ le plus proche de 1). Elle reste cependant insuffisante

⁶ Les *data centers* de colocation font de l'hébergement au détail. On peut citer Equinix, leader américain du marché, Digital Realty ou encore Interxion, leader européen.

⁷ C'est le *Power Usage Effectiveness*, il 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 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.

par rapport à la croissance des données à stocker et les mutualisations énergétiques sont des exceptions. La recherche d'un intérêt commun entre opérateurs de *data centers* et territoires est encadrée par les objectifs financiers des entreprises numériques, et une frilosité des acteurs de la colocation. Comme nous l'a rappelé un ancien directeur de Goldman Sachs, passé chez Digital Realty⁸, opérateur international majeur de colocation, le centre de données est un produit immobilier de très haute rentabilité financière et la localisation est au cœur de sa valeur.

Les stratégies d'implantation des data centers

Deux critères de localisation sont véritablement structurants pour les data centers :

- 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.⁹

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 Vélizy¹⁰. La proximité des 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.

⁸ Entretien avec David Schirmacher, à New-York, 22 janvier 2017.

⁹ 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.

¹⁰ Entretien avec Frederick Coeille, directeur général de Zayo France.

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.

Ces critères d'implantation permettent de mieux comprendre comment de nouveaux territoires numériques se sont consolidés. On peut en distinguer trois : le monde rural, les périphéries métropolitaines et les cœurs métropolitains.

Les Big Tech l'assaut du monde rural

Le monde rural et les territoires périurbains intéressent fortement les opérateurs de grands *data centers*, pour leur caractère isolé, leurs disponibilités foncières, mais aussi pour les avantages fiscaux que leur offrent les collectivités en recherche d'un nouveau souffle économique. En termes d'aménagement, le résultat est souvent celui du mitage territorial, dans une relation parfois déséquilibrée entre opérateur et collectivité locale.

A Prineville, dans un territoire rural et désertique, Facebook a construit son premier *data center* 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 y totalisera bientôt une surface totale de 200 000 m². Les *data centers* y sont arrivés masqués. 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. Betty Rope, la maire de cette commune de 10 000 habitants estime cependant que Facebook « *sont de bons, très bons voisins*¹¹ », qui sont venus, avec Apple, redynamiser une économie détruite par la crise de 2008 et le déclin de l'industrie du bois (21% de chômage), d'abord avec les chantiers de construction qui continuent, ensuite avec les emplois directs et indirects induits qui

¹¹ Entretien avec Betty Rope, maire de Prineville, à Prineville, 27 octobre 2017.

s'élevaient, selon elle, à 500 fin 2017. Facebook fournit en effet beaucoup de services à ses employés. En outre, personne n'aurait imaginé dix ans plus tôt que la puissance électrique nécessaire dans la ville serait passée de 10 à 500 MGW. Facebook et Apple co-investissent en conséquence dans 5 fermes solaires de chacune 15 MGW, non loin de leurs implantations. Et chacun paye des « frais de projets » annuels pour s'installer puis se développer, et contribue à investir dans les infrastructures locales (postes sources, usine de production d'eau, d'assainissement). Ici, les géants du numériques sont donc considérés une aubaine avant tout, un vecteur d'emploi et de développement économique.

Si ce modèle rural numérique ne concerne pas encore la France à cette échelle, des territoires ruraux suédois, irlandais ou finlandais sont confrontés à ces situations car ils proposent foncier et énergie bon marché ainsi qu'incitations fiscales diverses. Les GAFAM questionnent ici la stratégie numérique européenne en la matière, puisqu'il est fait état, par les professionnels français, de techniques de dumping fiscal en particulier.

En France, des territoires comme Saclay au sud de Paris pourraient être concernés par de telles dynamiques en raison de leur connectivité (dorsale le long de l'A10), de la présence de centres de recherches, d'universités et de grandes écoles de rayonnement international, d'un bon approvisionnement électrique (poste de St Juste, autre poste source en construction sur le Plateau de Saclay), mais aussi d'opportunités foncières aux emprises généreuses. Ces territoires devront pouvoir élaborer, avec les opérateurs d'énergie, des stratégies pour tirer le meilleur parti de ces installations en termes énergétiques (mutualisations) et spatiaux (occupations préférentielles d'espaces de délaissés par exemple).

Les périphéries du numérique : une planification à construire

Les périphéries métropolitaines, souvent anciennement industrielles, constituent des 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 : les *data centers* remplacent alors les usines. 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 municipale. Saint Denis et Aubervilliers, au nord de Paris, semble davantage subir ce développement, tandis que la ville d'Hillsboro, à côté de Portland (Oregon) a pu négocier le tournant de la délocalisation de ses industries électroniques en Asie.

En France, la présence des *data centers* à Plaine Commune date de la fin des années 1990. La présence de vastes parcelles disponibles à prix abordables à proximité immédiate de Paris, la bonne disponibilité électrique, 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) ont favorisé le développement de ces infrastructures. Les *data centers* présents sur Plaine Commune sont majoritairement des grands *data centers* d'une superficie moyenne comprise entre 1000 et 5000 m². Si un ralentissement du nombre

de constructions de *data centers* a été constaté depuis 2010¹², d'important chantiers sont en cours : le *data center* d'Interxion sur l'ancien site d'Eurocopter¹³ à la Courneuve, ainsi que l'extension du *data center* d'Interxion rue Rateau, qui devrait atteindre 9000m² de salles informatiques et le *data center* d'Equinix à Saint Denis avec 13 000 m² de salles informatiques sur une parcelle de plus de 6 ha. Ce sont donc plus de 88 000 m² qui seront dédiés au stockage numérique avec plus de 360 MGW disponibles. 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. Pour autant, l'agglomération rappelle que les *data centers* impactent fortement le territoire et soulèvent des inquiétudes eu égard à la pérennité du système électrique local ; à des éventuelles nuisances soulevés par des groupes citoyens (bruit, danger lié au stockage du fioul, ondes électromagnétiques) ; et, dans un contexte de concurrence entre usages au cœur de la métropole, aux très grandes zones infranchissables que représentent les *data centers*, correspondant à un très faible nombre d'emplois.

Accentuant le caractère mono fonctionnel des territoires, 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 des enclaves numériques, souvent protégées par des clôtures défensives sans grande urbanité. Certains exemples d'intégration réussie sont cependant à souligner comme le projet du quartier Chapelle International, sur une ancienne emprise ferroviaire de Paris, qui comprend dans sa partie logistique un *data center*. De l'autre côté de l'Atlantique, certaines municipalités se sont saisies du développement de ces bâtiments en adoptant des positionnements proactifs pour les attirer et en tirer des bénéfices directs. Au sud de la Silicon Valley, c'est la ville de Santa Clara qui concentre le plus de *data centers* sur son territoire. Une cinquantaine d'entre eux consomment 70% de l'énergie fournie par la compagnie publique municipale, la Silicon Valley Power créée en 1896, offrant 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. Santa Clara fournit également un réseau de fibre noire¹⁴ pour les entreprises, complétant une offre parfaite pour le monde numérique. Si elle perpétue d'une certaine façon son rôle de territoire servant du cœur métropolitain et des centres de décision, Santa Clara (tout comme San José) accueille 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 au *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

¹² Trois raisons principales : le foncier n'est plus aussi disponible et bon marché qu'auparavant ; le secteur de la colocation s'est consolidé (rachats d'entreprises et de bâtiments existants) ; les opérateurs avaient anticipé la croissance du marché en construisant d'immenses surfaces, une partie d'entre elles attendent toujours les clients.

¹³ Aujourd'hui, l'agglomération souhaiterait améliorer l'intégration du *data center* dans la ville (clôtures, entrées, végétalisation, façade urbaine non aveugle), mais les échanges complexes et peu nombreux avec Interxion qui a déjà son projet architectural ficelé selon ses intérêts ne laissent présager aucun changement majeur au bénéfice de la collectivité.

¹⁴ La fibre noire désigne une infrastructure à fibres optiques (câbles et répéteurs) installée mais encore inutilisée.

urbaine (comme à Hillsboro). Les infrastructures sont plus compactes et architecturées, à l'image du campus de Vantage, construit plus haut sur une parcelle densifiée sur Walsh boulevard, qui compte désormais six *data centers*. La ville de Santa Clara offre plusieurs particularités notables. Les consommations énergétiques importantes des *data centers* permettent à la municipalité de réinvestir les bénéfices dans les services publics et les équipements locaux (la vente d'électricité représente 80% des revenus de la Silicon Valley Power). Les services techniques de la commune sont très mobilisés, avec un traitement des demandes d'installation intégré et rapide. En échange, des efforts sont demandés aux *data centers* pour une meilleure intégration architecturale et urbaine. Santa Clara a réussi à cantonner les *data centers* dans la partie industrielle et maintenant tertiaire de la ville, afin d'éviter les conflits d'usage avec les habitants. La municipalité est ainsi parvenue à porter une vision anticipatrice et organisée de leur développement.

Les Gateways hyper urbains, nœuds stratégiques des réseaux

Les cœurs métropolitains, aux Etats-Unis comme en Europe, et les villes-mondes comme Londres et New-York encore davantage, 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 plus ou moins de surfaces dédiées au stockage de données.

A New York, plusieurs immeubles de Lower Manhattan, poursuivent, avec Internet, leurs destinées communicationnelles et ont su adapter le patrimoine immobilier historique que sont les sièges des grandes compagnies de télégraphe et de télécom comme le 32 avenue of Americas (siège de AT&T) et le 60 Hudson Street, (siège de Western Union), respectivement construit en 1914 et 1928. A la fin des années 1990, les deux bâtiments ont pris le tournant du numérique et 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 le début des années 2000 et les attentats du 11 septembre 2001, les *data centers* ont commencé à se délocaliser dans le New Jersey tout proche, plus avantageux que New-York en termes de prix de l'énergie comme de l'immobilier, mais aussi d'une moindre vulnérabilité climatique. En 2012, l'ouragan Sandy a en effet mis à l'arrêt plusieurs *data centers* de Manhattan. Il reste toutefois de nombreux *data centers* à New-York à l'exemple de la tour Sabey construite par la NY Telephone Company en 1975, comme central téléphonique de Verizon au pied du pont de Brooklyn. Ce bâtiment haut de 32 étages, offre 102 000 m² de surface disponible et continue à se développer.

Trois sujets sont particulièrement intéressants ici : le recyclage de bâtiments existants de grands services urbains en cœur de métropole ; la compacité infrastructurelle de ces bâtiments machines, 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 bureaux, studios radios, *data centers* et 70 opérateurs télécoms (30% de la surface), siège du Tribeca Film Festival sur 186 000 m².

A Paris, ce sont avant tout les bâtiments industriels anciens à structure métallique construits pour l'industrie textile, la presse ou les grands magasins qui ont été mobilisés pour un usage de *data center*. C'est aussi une partie du patrimoine immobilier des télécoms qui héberge aujourd'hui des données. 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 (Zayo, Telehouse). L'opérateur Téléhouse s'est aussi installé dès les années 1990 dans un ancien grand magasin, boulevard Voltaire, à proximité de la mairie du 11^{ème} arrondissement, sur une surface totale de 7000 m² et avec une puissance disponible de 5 MGW. Le patrimoine industriel parisien 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 (Quartier central des 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 d'autres occupations, mais surtout de la facilité, en comparaison, de se développer dans des territoires plus adaptés, avec moins de contraintes urbaines, environnementales et de voisinage. Les pouvoirs publics sont parfois désemparés face à l'arrivée de ces nouvelles infrastructures dévoreuses d'espace et d'énergie. D'un pays à l'autre les positionnements et les stratégies diffèrent.

Des pouvoirs publics locaux en prise avec un secteur complexe et opaque

Face à la constitution de ces territoires numériques, plusieurs positionnements ont été observés. La grande autonomie des villes américaines leur a permis de réguler et tirer un bénéfice local de l'industrie des *data centers*. A l'inverse, au Nord de Paris, le développement s'est fait dès la fin des années 1990, sans que techniciens ou élus n'anticipent la suite, ou n'aient de volonté d'intégrer les *data centers*. Enfin, le cas de Prineville illustre le déséquilibre du rapport de force avec les Big Tech.

Accueillir et réguler : le guichet unique de Santa Clara en Californie

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 administrer le développement de ces infrastructures numériques de façon proactive¹⁵ en mettant en place un guichet unique.

¹⁵ Entretien avec Yen Chen, responsable de l'urbanisme à la ville de Santa Clara, Santa Clara. Novembre 2017.

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.

De plus, les bénéfices réalisés par la Silicon Valley Power grâce aux importantes consommations électriques des *data centers* sont réinvestis par la municipalité de Santa Clara 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.

Subir mais promouvoir : Prineville (Oregon), le pot de fer contre le pot de terre

Si les *data centers* des GAFAM en particulier 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. En outre, le secret qui entoure l'implantation des *data centers* et se rapproche davantage de celui qui concerne d'habitude des implantations militaires ou secret défense, empêche de maîtriser le développement et la planification de son territoire.

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 non loin, 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.

Subir : l'exemple de 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 (agence locale de l'énergie) 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 ICPE¹⁶ 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 des consommations électriques réelles des *data centers*, et des puissances réservées ou en file d'attente. Ce manque de connaissance constitue une grande difficulté pour traiter les projets et les autorisations d'urbanisme, avec une vision globale alors que la consommation énergétique de ces nouveaux venus perturbe parfois les territoires.

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, 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 2014¹⁷. 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 de RTE et Enedis a permis des investissements très lourds dans l'infrastructure.

¹⁶ ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

¹⁷ 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.*

Dans les trois terrains américains étudiés, 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 fortes opportunités foncières (71% de la production d'électricité de l'Oregon sont générés par des centrales hydroélectriques classiques et d'autres ressources énergétiques renouvelables.)
- La densité urbaine de la ville de New York et la progressive transformation des bâtiments emblématiques des télécom en *data center*, dans un contexte post Sandy 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).

Les GAFAM exercent une pression sur les compagnies électriques historiques

Pour Gary Cook de GreenPeace, auteur du rapport *Clicking Clean*¹⁸, 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 a signé 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.

¹⁸ <http://www.greenpeace.org/usa/global-warming/click-clean/>

Sur la côte ouest, les GAFAM semblent 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 »¹⁹, 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.

Les vellétés d'autonomie des opérateurs de data centers

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.

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 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 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 quoi*²⁰. » Par

¹⁹ <https://www.apple.com/fr/environnement/climate-change/>

²⁰ Entretien avec Fabrice Coquio, président d'Interxion groupe France, Paris.

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 kWh²¹). Sabey passe par une ESCO²² 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.

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.*²³ » 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 interpellait 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 électriques*²⁴ ».

²¹ Contre par exemple 22 cents le kWh par 365 data centers, localisé aussi à Manhattan (entretien avec Jim Grady, janvier 2018)

²² ESCO : Energy service company

²³ Entretien avec Fabrice Coquio (*idem*)

²⁴ *Idem*.

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 clients*²⁵. »

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 Renouveau 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.

Comme le rappelle David Rinard, directeur développement durable d'Equinix²⁶, 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...

Une partie du monde de l'architecture et de l'urbanisme tend encore à minimiser, aujourd'hui, l'impact énergétiques et spatial du monde numérique sur les villes, le territoire et le climat. 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 pervasif qui modifie peu à peu les formes urbaines, en s'appuyant sur une infrastructure qui mobilise de plus en plus de ressources et de place

²⁵ Entretien avec André Rouyer, Délégué des Infrastructures du Numérique, Gimelec, Paris.

²⁶ Entretien avec David Rinard directeur développement durable d'Equinix, San José.

(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.