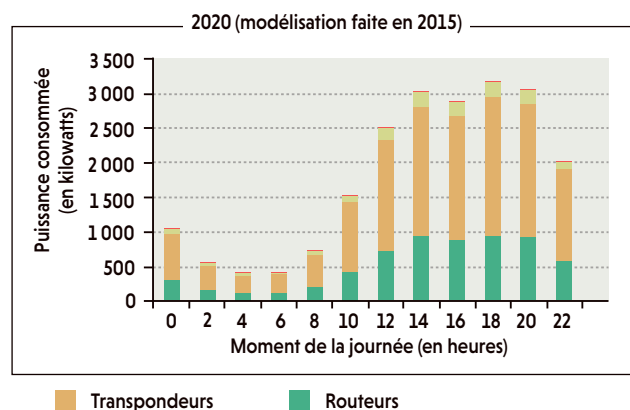
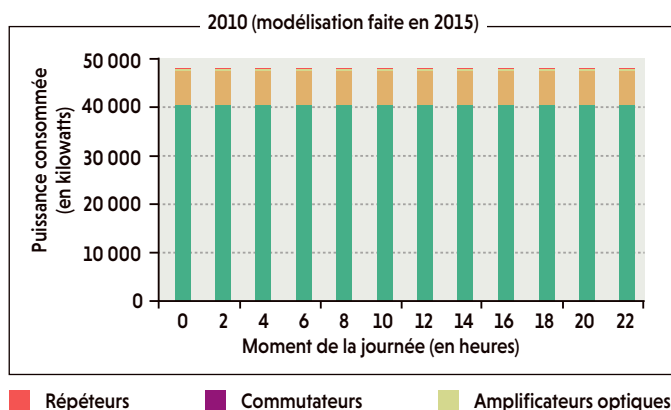




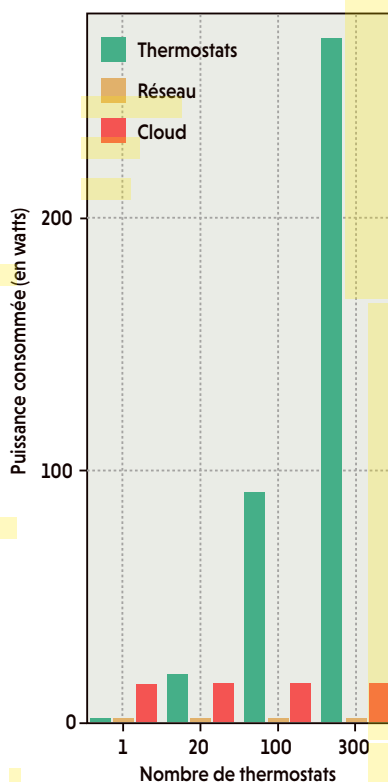
En 2015, le projet de recherche GreenTouch a montré qu'en changeant l'infrastructure des réseaux de communication, il était possible d'améliorer d'un facteur 316 l'efficacité énergétique d'un réseau de communication de 2020 (à droite) par rapport à 2010 (à gauche) et d'adapter sa consommation à l'heure de la journée tout en tenant compte de l'augmentation du trafic. Le scénario proposé permettrait par ailleurs d'augmenter d'un facteur 10 000 l'efficacité énergétique de l'accès mobile au réseau et d'un facteur 256 celle de l'accès fixe.

entraînant alors une consommation inutile (voir l'encadré page 55).

De 2010 à 2015, le projet de recherche international GreenTouch, qui mêlait instituts académiques et groupes industriels, a démontré qu'il était possible de construire une infrastructure des réseaux de l'internet mondial qui réduirait de 98% la consommation d'énergie en 2020 par rapport à celle de 2010, et ce en tenant compte de l'explosion du trafic et pour une qualité de service équivalente (voir la figure ci-dessus). La quantité d'énergie économisée si ce scénario était appliqué en Amérique du Nord, en Europe et au Japon équivaldrait, en empreinte carbone, aux émissions de gaz à effet de serre de 5,8 millions de voitures. Cette construction impliquerait de nombreux changements structurels et technologiques tant au niveau matériel que logiciel. Il reste aux constructeurs et opérateurs à s'emparer de ces innovations et à les déployer petit à petit dans les infrastructures du web...

DES CENTRES DE DONNÉES JAMAIS ÉTEINTS

Les centres de données constituent eux aussi une part non négligeable de la consommation énergétique du numérique. Un centre de données est constitué d'un ensemble de serveurs de calculs, de baies de stockage et d'équipements réseaux. Autour de ces systèmes numériques, une infrastructure physique (bâtiments, systèmes de refroidissement, connectivité et redondance électrique) est nécessaire. Différentes techniques de récupération de la chaleur sont aussi expérimentées et, pour certaines, mises en production. Une métrique couramment utilisée, l'indicateur d'efficacité énergétique ou PUE (pour *power usage effectiveness*), permet de calculer le surcoût énergétique de cette infrastructure (principalement en termes de refroidissement). Les hébergeurs de centres de données essaient de s'approcher du PUE idéal (de valeur 1), où l'impact du refroidissement devient négligeable par rapport à la consommation des infrastructures informatiques. Toutefois, cette course au PUE est artificielle, car elle ne



Si un seul thermostat connecté consomme moins que le cloud grâce auquel il fonctionne (à gauche), un parc de 300 thermostats répartis dans autant de maisons coûte beaucoup plus cher en énergie que les serveurs qui traitent leurs données (à droite). Le réseau qui connecte les thermostats et le cloud, quant à lui, consomme peu en comparaison (en jaune).

> s'empilent et s'enchaînent: 2G, 3G, 4G et actuellement la 5G, en cours de déploiement dans certaines villes (voir l'encadré page 54). Or les anciennes technologies demeurent en place pour assurer la compatibilité avec les équipements les plus anciens. Ainsi, au lieu de les remplacer, les nouvelles technologies s'ajoutent à leur liste. De plus, en général, pour bénéficier de chaque nouvelle technologie réseau sans fil, le client doit acquérir un nouvel équipement: mettre au rebut son smartphone et en acheter un autre, ce qui accélère le renouvellement des équipements.

Bien sûr, chaque nouvelle génération de réseaux accroît les capacités de communication: la bande passante disponible par utilisateur est augmentée. Et cette bande passante supplémentaire est effectivement utilisée, augmentant *de facto* la consommation de données. En avril 2020, l'Arcep (l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse) indiquait ainsi dans son rapport pour l'année 2019 qu'en moyenne, en France, la consommation mensuelle par carte SIM était de 7 gigaoctets, toutes cartes SIM confondues, alors que celle des cartes SIM 4G était à elle seule de 9,5 gigaoctets.

Les protocoles qui assurent l'émission et la réception des données dans ces réseaux ont été conçus pour assurer robustesse, performance et qualité de service des réseaux. Ils ne sont pas prévus pour réduire leurs impacts environnementaux. Aussi toutes ces infrastructures constituent-elles un poste important de la consommation électrique du numérique. En particulier, parmi les équipements liés aux infrastructures, les box (ADSL ou fibre optique) et les réseaux wifi sont souvent allumés en permanence chez les particuliers, même lorsqu'ils ne sont pas utilisés,

présume en rien de l'efficacité et de la pertinence des usages informatiques effectués dans les centres de données.

Les gros centres de données (notamment ceux des «Gafam», Google, Amazon, Facebook, Apple et Microsoft) sont par ailleurs de plus en plus alimentés par des énergies renouvelables, produites localement ou achetées par contrat énergétique. Mais ils ne fonctionnent pas en autonomie pour autant. Apple, par exemple, annonce que le groupe produit autant d'énergie renouvelable (en grande partie photovoltaïque) qu'il ne consomme d'énergie, toutes sources confondues, mais en pratique il n'en consomme qu'une petite partie, car cette énergie n'est majoritairement disponible que le jour et par beau temps, alors que les centres de données fonctionnent en permanence. Apple revend le reste de sa production d'énergie et rachète ce dont il a besoin pour alimenter ses centres de données durant la nuit.

Or le nombre de ces centres ne cesse de croître. À l'échelle mondiale, on observe non seulement le déploiement continu de gros centres de données, mais aussi d'autres plus modestes pour accompagner l'arrivée de l'internet des objets et garantir ainsi de faibles latences entre les serveurs et les objets connectés. Le principal problème associé aux infrastructures numériques est leur faible proportionnalité énergétique, du fait de leur utilisation très variable. En 2015, l'institut Uptime considérait qu'aux États-Unis, 30% des serveurs dans les centres de données étaient comateux, c'est-à-dire allumés pour n'effectuer aucun travail. Or on observe que lorsque l'usage d'un serveur diminue, sa consommation électrique ne tend pas vers zéro, mais vers 50% de sa puissance électrique maximale. Ainsi, lorsqu'un serveur effectue peu de tâches, sa consommation électrique est néanmoins très importante. Cette faible proportionnalité énergétique est encore plus criante sur certains équipements réseaux (commutateurs, routeurs), où la consommation électrique est quasiment constante (100% du pic électrique) quel que soit l'usage.

Les recherches actuelles sur les centres de calcul visent à consolider la charge autant que possible pour la concentrer sur le plus petit nombre de serveurs possible et ainsi éteindre les serveurs complètement inutilisés à un instant donné. Avec notre collègue Issam Rais, nous avons en effet montré en 2018 qu'il suffit qu'un serveur ne soit pas utilisé pendant trois minutes pour qu'il soit intéressant de l'éteindre. Il s'agit donc de mettre au point des stratégies de consolidation qui comportent à la fois des techniques de prédiction des pics d'utilisation pour rallumer les serveurs à l'avance, des algorithmes pour optimiser le nombre de cycles d'allumage/extinction, gourmands en temps et

en énergie, et des mécanismes de migration de machines virtuelles d'un serveur physique à l'autre avec le moins d'impact possible sur les performances perçues par les utilisateurs. D'autres techniques encore visent à contrôler la fréquence et la tension d'alimentation des processeurs pour réduire leur consommation lorsqu'ils ne sont pas utilisés à 100% ou lorsqu'ils doivent attendre des résultats provenant d'autres processeurs.

UNE FOULE D'OBJETS CONNECTÉS

Les équipements terminaux des utilisateurs, enfin, n'ont rien à envier aux deux autres composantes du numérique en matière de consommation énergétique. En 2018, dans le monde, on comptait environ 9 milliards d'appareils connectés à Internet, dont 2 milliards de smartphones et 1 milliard d'ordinateurs. Le reste est constitué des très nombreux objets connectés qui ont fleuri ces dernières années : ampoules, microondes, brosses à dents, téléviseurs, caméras, enceintes, montres, robots...

La prolifération des objets connectés et leur impact considérable sur l'environnement interrogent les habitudes de consommation et les rapports aux nouvelles technologies : sont-ils des gadgets ou des outils pour mieux vivre ? De la cocotte-minute au capteur de glucose pour personnes diabétiques en passant par la brosse à dents et l'ampoule, difficile de définir des critères objectifs et universels pour quantifier l'utilité de ces objets. Leurs impacts sur l'environnement, cependant, sont quantifiables, comme dans le cas de la tablette (voir l'encadré page 53). Cela permet aux consommateurs de comparer les objets de différents >

UNE PISTE POUR OPTIMISER UN RÉSEAU INTELLIGENT

Les réseaux électriques intelligents fonctionnent en général selon une approche centralisée : un équipement maître reçoit les informations de chaque compteur connecté dont il a la supervision. Si l'on souhaite mettre en place une politique d'effacement de charge intelligente et réactive, en cas de surconsommation électrique, l'équipement maître décide des foyers où réduire la consommation afin de repasser en dessous du seuil cible. Dans une approche décentralisée cascado-cyclique, les foyers sont virtuellement connectés ensemble par un « anneau à jeton » : ils sont placés dans un ordre arbitraire et se transmettent un jeton. Quand la sonde de courant détecte un dépassement du seuil, elle envoie une information au foyer qui a le jeton, celui-ci décide ou non de baisser un moment sa consommation et transmet le jeton au foyer suivant, etc. L'approche cascado-cyclique permet de lisser l'effacement sur l'ensemble des foyers et évite d'avoir recours à un équipement central de décision et de gestion des données des utilisateurs.