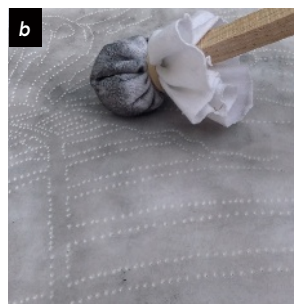
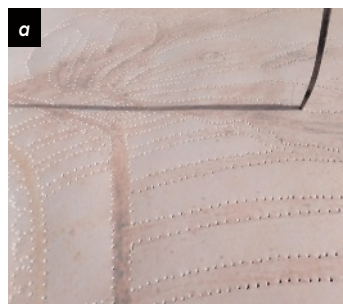


LA TECHNIQUE DU « SPOLVERO »

La *spolveratura*, ou technique dite « du *spolvero* », de l'italien *polvere* (« poudre »), consiste à reporter sur le *gesso* (enduit de préparation de la peinture) les principaux détails d'un dessin préparatoire appelée le *cartone* (« carton »).

La première étape consiste à exécuter le dessin sur une feuille de papier. On recouvre ensuite ce dessin, posé sur une surface molle (carton ou tissu) d'une feuille transparente ; à l'aide d'une pointe, on transperce l'ensemble en y faisant des



Perçage du calque posé sur le dessin (a), tamponnage du calque sur le gesso (b) et le dessin ainsi transféré sur le support de la peinture à venir (c).

séries de petits trous (a). Cette étape, plus complexe qu'il n'y paraît, requiert des choix artistiques nombreux, ce qui exclut son exécution par un apprenti. Dans la troisième étape, on pose la feuille transparente sur le *gesso* et on tamponne avec un petit pochon rempli de poudre noire, généralement du noir de fumée, ses trous ; les tracés du dessin préparatoire sont ainsi transférés sous la forme de petits points noirs (b et c).

Cette technique était utilisée à l'époque de la Renaissance italienne en peinture de chevalet, mais également pour les fresques et les peintures murales. Elle permet aussi de reporter de multiples fois une même composition. Elle porte en français le nom de « poncif ».

Le *cartone d'Isabelle d'Este*, de la main de Léonard de Vinci, aujourd'hui au Louvre, ainsi que le *cartone de La Joconde nue* (auteur non

identifié) du château de Chantilly sont deux exemples caractéristiques. De nombreux trous contournent les mains, le visage, le nez, la bouche, les bords des membres et des vêtements, mais il n'y a aucune marque de poudre noire du transfert. Cela suggère soit qu'ils ont été percés mais non utilisés, soit qu'il ait été fait usage d'une feuille de transfert intermédiaire.

BIBLIOGRAPHIE

P. Cotte et L. Simonot, **Mona Lisa's spolvero revealed**, *Journal of Cultural Heritage*, en ligne le 26 août 2020.

V. Delieuvin et L. Frank, **Léonard de Vinci**, catalogue de l'exposition au Louvre 24 octobre 2019-24 février 2020, Hazan, 2019.

M. Menu et al. (dir.), **Au cœur de la Joconde**, Gallimard/Musée du Louvre, 2006.

P. Cotte et D. Dupraz, **Spectral imaging of Leonardo Da Vinci's Mona Lisa : A true color smile without the influence of aged varnish**, dans *Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision*, Society for Imaging Science and Technology, 2006, pp. 311-317.

> Lisa. Cela indique que dans le projet initial de Léonard de Vinci, le visage était orienté davantage vers la droite. Le *spolvero* marque une double ligne ainsi que des petits traits de jonctions en diagonale. Peut-être s'agissait-il d'une broderie, comme sur le front du modèle dans le *Portrait de Maddalena Doni* (ou *Maddalena Strozzi*), par Raphaël (voir la figure page 44), dont la posture rappelle fortement celle de *La Joconde*. Peint à la même époque et également à Florence, ce portrait témoigne des règles vestimentaires des dames de la bourgeoisie florentine.

UN PETIT DESSIN ÉNIGMATIQUE

La technique LAM a également mis en évidence un petit dessin initial au-dessus de la tête et détaché de celle-ci (voir la figure page 45). Manifestement, le projet a été abandonné par Léonard. Il pourrait s'agir d'une tête d'aiguille à cheveux. Pourtant, les historiens du costume sont formels : aucune aiguille à cheveux n'était de règle dans la ville de Florence entre 1503 et 1510, période probable à laquelle *La Joconde* a été peinte. Les cheveux étaient au contraire enfermés dans un filet et plaqués sur la tête. On trouve des représentations de coiffures avec des draperies et des aiguilles pour les maintenir, mais uniquement pour des personnages irréels tels que des madones, des allégories ou des déesses, comme nous l'a précisé Elisabetta Gnignera, historienne du costume et autrice de

nombreux ouvrages sur les modes de la Renaissance italienne. Le petit dessin initial de Léonard de Vinci reste donc énigmatique.

Comme pour la réflectographie infrarouge, la technique LAM devient moins performante quand la couche picturale est très absorbante. La détection du *spolvero* sur des zones très sombres du tableau est moins évidente. Pour éviter les faux positifs qu'engendre toute technique de détection, l'interprétation des images LAM doit se faire en collaboration avec des experts des techniques picturales, et en complémentarité avec d'autres méthodes existantes d'analyse des œuvres d'art.

Les données multispectrales de *La Joconde* continuent d'être analysées. Elles révéleront peut-être d'autres informations cachées dans la profondeur des couches picturales. Outre les résultats sur *La Joconde*, la technique LAM a également permis de discriminer différentes écritures d'un palimpseste. Rappelons en effet qu'une page de parchemin pouvait être grattée ou lavée pour être réutilisée ; parfois certaines écritures persistent, imprégnées dans le parchemin, mais restent difficiles à lire. Or les images LAM éliminent les textes récents en surface pour isoler les textes anciens imprégnés, avec un taux de réussite supérieur à toutes les autres techniques testées. L'imagerie LAM ouvre ainsi de nouvelles perspectives pour l'analyse et l'interprétation d'œuvres d'art ou de documents archéologiques. ■

Le vrai coût énergétique du numérique

Internet et les clouds qui le sous-tendent reposent sur d'immenses centres de données répartis dans le monde. Le plus grand centre de données du monde est un bâtiment de 120 000 mètres carrés (soit environ 17 terrains de football) à Tahoe Reno, dans le Nevada. À terme, il est prévu que le campus, nommé The Citadel, compte 670 000 mètres carrés de centres de données.



L'ESSENTIEL

> Derrière Internet et les objets connectés que nous utilisons se cache une architecture complexe de réseaux, de centres de données et d'équipements terminaux déployés dans le monde entier.

> Toutes ces infrastructures ont un impact environnemental

considérable et très complexe à estimer dont on commence à mesurer l'ampleur.

> Des pistes se dessinent pour réduire leur consommation énergétique et informer les usagers sur le vrai coût des équipements qu'ils utilisent.

LES AUTEURS



ANNE-CÉCILE ORGERIE
chargée de recherche
du CNRS au sein de
l'Institut de recherche
en informatique et
systèmes aléatoires,
à Rennes



LAURENT LEFÈVRE
chargé de recherche
de l'Inria au sein
du Laboratoire
de l'informatique
du parallélisme,
à l'École normale
supérieure de Lyon

Surfer sur Internet, utiliser une application, regarder une vidéo en streaming, discuter en visio... Toutes ces activités qui paraissent aujourd'hui naturelles à nombre d'entre nous sont loin d'être anodines pour l'environnement.

Depuis le début de l'épidémie de Covid-19, et en particulier durant les périodes de confinement, le télétravail a pris une grande importance dans nombre de services publics et d'entreprises. L'usage des transports s'en est trouvé considérablement diminué. Mais peut-on dire pour autant que le télétravail et l'utilisation massive d'Internet qui y est associée ont été bénéfiques pour l'environnement? Plus généralement, quel est l'impact environnemental du numérique? Et comment le diminuer? Répondre à ces questions n'est pas simple. Pour établir l'impact environnemental d'un système numérique, il faut mesurer son coût énergétique. Mais qu'est-ce que cela signifie pour un système aussi complexe et interdépendant qu'Internet?

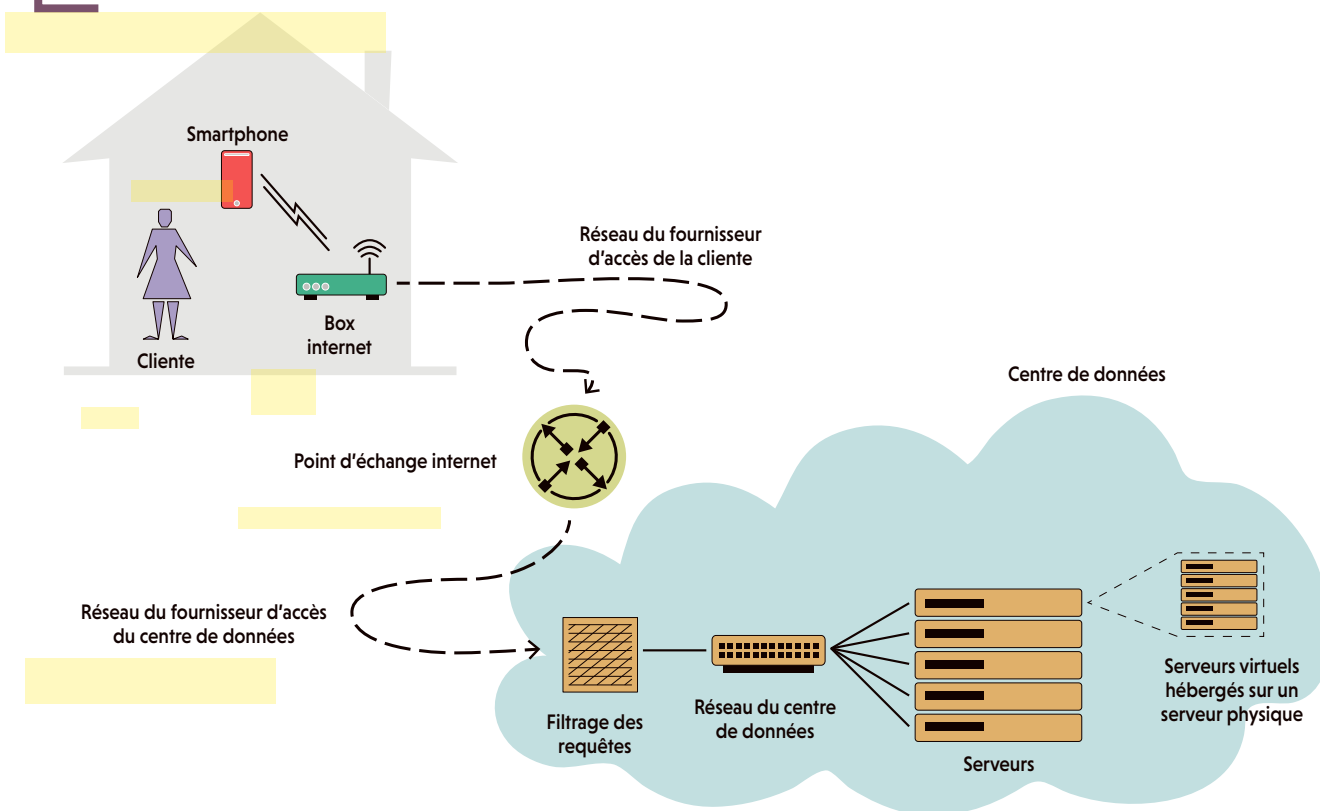
Né il y a cinquante ans, accessible au grand public depuis une trentaine d'années, Internet est devenu un outil quotidien et indispensable pour quelque 4,5 milliards d'utilisateurs dans le monde, soit un peu moins de 60% de la population mondiale. Son succès planétaire fulgurant a entraîné sa croissance très rapide.

Courriers électroniques, messageries instantanées, moteurs de recherche, réseaux sociaux, stockage dans le cloud, vidéo à la demande en streaming, etc. Les services d'Internet ont évolué au cours du temps, et son architecture s'est étendue et complexifiée pour répondre à cette demande. Internet donne

ainsi accès à un monde numérique, électronique, dématérialisé, virtuel... autant d'adjectifs qui lui confèrent un aspect quelque peu magique. Pourtant, ses infrastructures sont bien réelles et consomment de l'énergie et des ressources, très souvent sans que l'utilisateur en ait conscience.

À une époque où dérèglement climatique et épuisement des ressources naturelles interpellent les utilisateurs, les impacts environnementaux d'Internet restent largement méconnus et sont encore peu étudiés. Les études existantes indiquent que ces impacts sont considérables et préoccupants, aussi bien en termes de consommation énergétique, de consommation de matières premières ou d'empreinte carbone. Mais ces études brossent des tableaux variés, avec des chiffres différant parfois fortement de l'une à l'autre.

En 2014, Vlad Coroamă, de l'université technique de Lisbonne, et Lorenz Hilty, de l'université de Zurich, ont ainsi observé, en examinant les articles parus les dix années précédentes sur le coût énergétique d'Internet, une grande disparité des estimations, avec des différences allant jusqu'à quatre ordres de grandeur. En cause, les incertitudes sur les mesures, les approximations faites sur les modèles, mais aussi le périmètre choisi pour l'évaluation: les résultats varient considérablement selon que l'on prend en compte ou non les objets terminaux qui utilisent Internet. C'est pourquoi il est si compliqué de >



> déterminer si le télétravail est bénéfique pour l'environnement ou même simplement si une requête internet coûte autant que trois heures ou dix minutes de bouilloire...

Cependant, depuis quelques années, différentes équipes dans le monde, dont la nôtre, décortiquent les interdépendances d'Internet ou des systèmes qui constituent ce réseau. L'idée est de préciser leur consommation énergétique, de définir des indicateurs pertinents d'efficacité pour ces systèmes et, à partir de là, d'en déduire des solutions pour réduire leur consommation. De nombreux obstacles restent à franchir, mais des pistes commencent à se dessiner.

UNE ARCHITECTURE GIGANTESQUE

Pour saisir la complexité de la question de l'impact environnemental d'Internet, il est nécessaire de comprendre quels sont les systèmes matériels et logiciels impliqués dans son fonctionnement, comment ces systèmes sont utilisés et quelles sont les corrélations entre utilisation, consommation électrique et consommation de matières premières.

Lorsqu'un internaute génère une requête à destination d'un moteur de recherche, il mobilise différents équipements matériels, physiques et virtualisés, et des infrastructures logicielles. Le matériel mobilisé comporte un équipement terminal (PC, smartphone, tablette) pour générer la requête et recevoir les résultats de la recherche, un ensemble de réseaux pour transporter les paquets de données et plusieurs serveurs d'un centre de données pour traiter la requête.

Le traitement d'une requête sur un moteur de recherche mobilise des ressources matérielles sur un smartphone, une box internet, des réseaux, des routeurs, un pare-feu, les équipements réseaux d'un centre de données et un serveur. Ces équipements matériels seront utilisés dans le sens retour pour rapatrier le résultat de la recherche. De plus, des applications, services et protocoles logiciels sont déployés dans chacun des équipements traversés. Plusieurs serveurs peuvent être mobilisés en parallèle pour calculer et agréger les résultats afin d'augmenter la rapidité de la réponse. De même, d'autres serveurs peuvent contribuer à la génération de la requête en récupérant chaque lettre tapée dans la barre de recherche pour afficher des suggestions de recherche. Enfin, une page web donnée peut faire appel à plusieurs services : publicité ciblée, authentification des utilisateurs, affichage d'informations en temps réel provenant de divers fournisseurs de contenus, etc.

Les services logiciels mis en œuvre sur les serveurs sont placés dans des machines virtuelles ou des conteneurs logiciels – émulation d'un environnement complet associé à l'utilisateur, où celui-ci peut lancer ses applications et qui lui garantit certaines protections de sécurité et des performances. À l'heure où les services internet se trouvent dans des clouds – des ensembles de serveurs, de réseaux et de logiciels répartis dans le monde –, les serveurs et réseaux utilisés ne sont pas connus des utilisateurs, mais choisis par les fournisseurs de services en fonction de métriques de performance, d'équilibrage de charge entre serveurs et de qualité de service. Le chemin réseau parcouru par la requête de l'utilisateur est donc très variable et son impact environnemental dépend du lieu d'hébergement des serveurs utilisés (voir la figure ci-dessus et l'encadré page 51).

Les vidéos poussent cette logique de fonctionnement à l'extrême. Selon le rapport *Climat: l'insoutenable usage de la vidéo en ligne*, publié en 2019 par The Shift Project, un *think tank* français qui réfléchit à des pistes pour parvenir à « une économie libérée de la contrainte carbone », les flux de données vidéo représentent 80% du trafic mondial qui circule sur Internet. Ces flux sont majoritairement composés de vidéos en ligne (vidéos à la demande, pornographie, etc.) et en direct (télésurveillance, vidéoconférences).

Alors que les techniques de diffusion hertziennes reposent sur du *broadcast*, c'est-à-dire une diffusion d'un unique émetteur vers beaucoup de récepteurs, la vidéo sur Internet exploite fortement des échanges de type « un >