

aussi augmenter leur vitesse de travail, car les distances entre les transistors deviennent plus petites. Ainsi, le nombre de mémoires sur une puce évolue à peu près proportionnellement au nombre de transistors que l'on peut y mettre, en gros selon la loi de Moore de 1975, alors que la puissance de calcul qu'on en tire augmente plus vite que ce nombre de transistors, car elle bénéficie à la fois des progrès en nombre de transistors et en vitesse des processeurs. La vitesse de calcul des puces, mesurée en hertz, a d'ailleurs considérablement augmenté depuis les premiers microprocesseurs. C'est l'explication la plus simple des progrès supérieurs du calcul, comparé au stockage, au cours des cinquante dernières années.

On le voit sur cet exemple, la loi de Moore générale simplifie bien trop les choses et, d'ailleurs, si l'on regarde de près, aucun domaine de l'électronique n'a progressé à un rythme parfaitement régulier. Le cas de la vitesse des processeurs est caractéristique. Elle a progressé de 15% par an de 1978 à 1988, puis de 40% par an de 1988 à 2004, et de seulement 2% par an depuis.

Les capacités de calculs dont nous disposons ont permis le développement des réseaux et en particulier d'internet, et c'est pourquoi une autre mesure est aujourd'hui devenue importante, celle de la circulation de l'information dans les réseaux.

TRAFIC RÉSEAU : LE ZETTA AUSSI

Cette circulation des données a elle aussi atteint l'ordre de grandeur du zettaoctet. Les évaluations des experts n'aboutissent pas au même nombre pour l'année 2021. Ils concluent que le nombre d'octets qui circulent chaque seconde sur les réseaux entre ordinateurs, téléphones, tablettes, box-internet, petits objets connectés, etc. est compris entre 5 et 40 zettaoctets. On peut tout de même en déduire que, comme pour la mémoire, nous en sommes à 10^{22} en ordre de grandeur. Puisqu'il faut bien évidemment exécuter largement plus de 1 instruction pour faire circuler 1 octet d'information entre deux machines d'un réseau, ces évaluations du trafic d'internet confirment que pour le calcul en instructions par seconde, les ordres de grandeur 10^{23} et 10^{24} sont un minimum qui ne fait aucun doute.

Notons que les flux vidéo représentent plus de la moitié de ce trafic. Cela est en grande partie dû à l'explosion récente de la consommation de vidéos par internet, engendrée par le développement de la fibre optique et des offres de YouTube ou Netflix, du «replay» d'émissions télévisées, et plus récemment des visioréunions par Zoom et autres services du même type. L'importance en volume de tout cela écrase les autres types de consommation de la bande passante.

BIBLIOGRAPHIE

Wikipedia, **Zettabyte Era**, consulté en mai 2021 (https://en.wikipedia.org/wiki/Zettabyte_Era).

Ademe, **La face cachée du numérique**, janvier 2021 (<https://bit.ly/3lq6N7A>).

A.-C. Orgerie et L. Lefèvre, **Le vrai coût énergétique du numérique**, *Pour la Science*, n° 518, pp. 48-59, décembre 2020.

Arcserve, **The 2020 Data Attack Surface Report**, 2020 (<https://bit.ly/3jq0KNs>).

Cisco Annual Internet Report (2018-2023), mars 2020 (<https://bit.ly/37oRt2A>).

L. Dedryver, **Maîtriser la consommation du numérique**, Rapport n° 2020-15 de France-Stratégie, octobre 2020 (<https://bit.ly/3fqGz0X>).

J. Hennessy et D. Patterson, **Computer Architecture : A Quantitative Approach**, Elsevier (6^e édition), 2019.

D. Efnusheva et al., **A survey of different approaches for overcoming the processor-memory bottleneck**, *International Journal of Computer Science and Information Technology*, vol. 9(2), pp. 151-163, 2017.

J.-P. Delahaye, **Les chiffres de la complexité informatique**, *Pour la Science*, n° 314, décembre 2003.

Sur ce sujet, il semble que certaines personnes manquent singulièrement de bon sens. Quand vous envoyez un courriel ne contenant que du texte, sauf s'il est très long, vous faites circuler environ un kilo-octet de données, alors que lorsque vous parcourez des pages internet en surfant, vous faites circuler des images et aurez rapidement fait se déplacer plus d'un méga-octet de données. Et cela n'est rien comparé à ce qui se passe quand vous regardez un film en «replay» ou en utilisant un site de vidéo à la demande : en une heure, vous aurez fait circuler un giga-octet de données au minimum. Il y a donc, en gros, mille fois plus de dépense électrique pour le surf sur internet et un million de fois plus pour une heure de vidéo en flux continu (*streaming*) que pour un courriel.

POUR ÉCONOMISER, REGARDONS MOINS DE VIDÉOS !

À partir de 2009, la presse a largement repris l'affirmation, tombée d'on ne sait où, qu'un courriel ou une requête sur un moteur de recherche dépense autant d'électricité qu'une ampoule allumée pendant une heure. Si c'était vrai, regarder une vidéo de une heure, ce qui demande un million de fois plus de transfert de données qu'un courriel, engendrerait une consommation invraisemblable que ni vous, avec votre facture d'électricité, ni le centre qui gère l'envoi de la vidéo ne pourrait supporter.

D'après un rapport de France-Stratégie (*voir la bibliographie*), le numérique consomme aujourd'hui 4000 térawattheures (TWh) par an dans le monde, alors que la production totale d'électricité est de l'ordre de 26000 TWh par an (un réacteur nucléaire produit environ 8 TWh/an). Certes, le numérique consomme de l'énergie, mais il en fait économiser beaucoup, car envoyer des documents par internet évite l'envoi des mêmes documents par la poste, et les réunions virtuelles évitent de nombreux déplacements.

Ceux qui évitent d'envoyer des courriels ou limitent le nombre de requêtes sur les moteurs de recherche pour éviter de polluer la planète se trompent d'ennemi. S'ils veulent avoir une action sensible, c'est à la vidéo qu'ils doivent penser !

Les chiffres de l'ère numérique du zetta sont le résultat du formidable travail des chercheurs et ingénieurs de l'électronique et de l'informatique. Cela a changé l'univers dans lequel nous vivons et, même si ces chiffres montrent qu'une part importante d'énergie doit être consacrée au monde nouveau et virtuel que nous avons créé, nous devons avoir pleinement conscience de tout ce que cela nous apporte. Par exemple, reconnaissons que la pandémie de Covid-19 aurait été bien plus difficile à vivre sans l'existence des réseaux et leur gigantesque puissance. ■



Les Époux Arnolfini, 1434, Jan Van Eyck, peinture sur bois (82,2 × 60 cm), National Gallery, Londres.

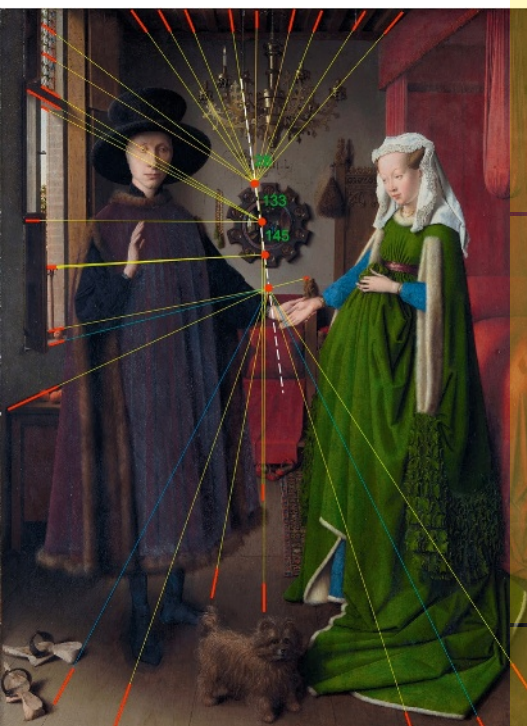
LA PERSPECTIVE, UNE INVENTION FLAMANDE ?

Pour *Les Époux Arnolfini*, Jan Van Eyck aurait utilisé une « machine à perspective » complexe pour restituer au mieux l'espace de la scène représentée et la rendre conforme à la vision humaine.

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à Pour la Science



Les arêtes de la scène convergent en quatre points de fuite alignés.

En 1434, Giovanni Arnolfini, un marchand toscan établi à Bruges, et sa femme posent devant le peintre flamand Jan Van Eyck. Au centre du tableau qui les immortalise, un miroir convexe, un « miroir aux sorcières », montre les protagonistes de dos et révèle deux autres personnages, dont un serait l'artiste. *Les Époux Arnolfini* (voir la reproduction page ci-contre), au départ une scène privée, est devenue l'une des toiles les plus célèbres du monde sur laquelle les historiens se perdent en conjectures. Ainsi, l'identité des personnages ne fait pas l'unanimité.

Un autre point débattu par les experts concerne la perspective. Traditionnellement, cette dernière aurait été théorisée dans l'Italie de la Renaissance par Filippo Brunelleschi et Leon Battista Alberti, dans les années 1430, avant de gagner toute l'Europe. Jan Van Eyck n'en aurait donc pas eu connaissance, et il ne l'aurait approchée que de façon empirique et approximative. Gilles Simon, du laboratoire Loria, à l'université de Lorraine, à Nancy, n'est pas d'accord et pense au contraire que le Flamand maîtrisait très bien la perspective.

L'informaticien s'est livré à une analyse des *Époux* (et de quatre autres œuvres) et a présenté ses travaux en août 2021 lors d'une conférence internationale, Siggraph 2021. Plus précisément, il a calculé une carte probabiliste des points de fuite à partir des différents éléments du tableau. Probabiliste, car elle

tient compte d'une incertitude sur les extrémités des arêtes extraites de l'image. Résultat ? Les lignes fuyantes ne convergent pas vers un point unique, comme cela devrait être le cas dans une perspective linéaire typiquement italienne, mais en quatre points régulièrement espacés et alignés le long d'un axe vertical légèrement incliné (voir la figure ci-contre).

Gilles Simon en déduit que Van Eyck a peint son tableau en quatre bandes, chacune réunissant l'ensemble des arêtes associées au même point dans une perspective exacte. L'informaticien en conclut que l'artiste a utilisé un dispositif optique similaire à celui qu'affectionnera Léonard de Vinci quelques décennies plus tard : l'idée est de regarder à travers un œilleton grâce auquel on parvient à une projection d'une scène sur une surface plane. L'appareil de Van Eyck avait quatre trous pour représenter la scène depuis différents points de vue simultanément ! Avec cet outil et d'autres astuces visant à se rapprocher au mieux de la vision humaine, le Flamand serait donc un précurseur des médias d'art nomades comme la réalité augmentée ! ■

G. Simon, *Jan Van Eyck's perspectival system elucidated through computer vision*, *ACM in Computer Graphics and Interactive Techniques*, à paraître, 2021.
hal.univ-lorraine.fr/hal-03287031



L'auteur a publié :
Pollock, Turner, Van Gogh, Vermeer et la science...
(Belin, 2018)

LES AUTEURS



**JEAN-MICHEL COURTY
ET ÉDOUARD KIERLIK**
professeurs de physique
à Sorbonne Université, à Paris

RAISIN FLAMBÉ AUX MICROONDES

Dans un four à microondes, de fortes concentrations d'énergie peuvent apparaître dans la région qui sépare deux aliments très proches.

U

ne expérience rendue populaire par YouTube consiste à placer dans un four à microondes un grain de raisin coupé en deux, mais dont les deux hémisphères sont encore reliés par un petit morceau de peau, épargné lors de la découpe. Lorsqu'on allume le four, des flammes apparaissent entre les deux moitiés (voir l'illustration). À quoi cela est-il dû ?

La plupart des explications prétendent que les deux hémisphères de raisin agissent comme une antenne et que le courant électrique intense circulant alors dans la peau serait à l'origine du plasma, le milieu gazeux chaud et ionisé formé entre les deux parties du fruit. Des expériences récentes, réalisées par trois physiciens au Canada (voir la bibliographie), montrent qu'il n'en est rien : le plasma est dû à la présence, au point de contact entre les deux

moitiés du grain, d'un champ électromagnétique intense qui vaporise la matière et ionise les atomes de sodium et de potassium présents dans la chair du raisin.

UN ÉCHAUFFEMENT INHOMOGÈNE

Pour mieux comprendre le phénomène, commençons par l'expérience suivante. On place une belle pomme de terre crue dans un four à microondes, actionné pendant une vingtaine de secondes. On coupe ensuite cette pomme de terre en deux et on observe la température intérieure à l'aide d'une caméra thermique. Que constate-t-on ? L'échauffement est très hétérogène, les deux endroits les plus chauds étant au cœur de la pomme de terre et distants d'environ 2 centimètres. Comme l'échauffement de la chair résulte

de l'absorption des microondes, il est proportionnel à l'intensité du champ électromagnétique à l'endroit considéré : cela signifie que le champ microonde présente les mêmes inhomogénéités d'intensité que la température.

Pourquoi le champ est-il si hétérogène au sein de la patate ? Serait-ce la conséquence de l'onde stationnaire formée par le champ électromagnétique dans le four et qui a pour effet de chauffer différemment les aliments selon l'endroit où ils se trouvent ? La réponse est non, pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, la pomme de terre est posée sur un plateau tournant et se déplace ainsi à travers les nœuds (minima) et les ventres (maxima) de l'onde stationnaire du champ microonde. Elle subit donc un chauffage uniforme en moyenne.

