



découvert avec l'aide d'un Pascuan qu'elle se lit en boustrophédon (comme un bœuf laboure un champ) inversé. La première ligne se lit de gauche à droite, puis on tourne la tablette de 180° pour lire la ligne suivante dans le même sens. C'est unique!

Une autre découverte importante eut lieu dans les années 1930, quand deux lycéens de Leningrad (aujourd'hui Saint-Petersbourg), en Russie, se rendirent compte de plusieurs répétitions dans les textes. On mit alors au jour des variations de glyphes ainsi que des ligatures, c'est-à-dire quand deux signes sont combinés en un seul, ce qui permit de dresser un catalogue exhaustif. Peu après la Seconde

Guerre mondiale, certains proposèrent de voir des généalogies sur des tablettes. Plus récemment, on a identifié des représentations de calendriers, avec notamment le glyphe d'une pleine lune, un cercle, avec à l'intérieur, un homme assis sur une petite montagne. Étonnamment, ces motifs correspondent assez bien aux mers lunaires!

Grâce aux travaux de Konstantin Pozdniakov, et de son père, les quelque 600 signes reconnus auparavant ont été réduits à seulement 52 signes indépendants, dont le pectoral. Plus encore, leurs travaux, fondés sur des analyses statistiques, tendent à montrer que le *rongorongo* serait en grande partie une écriture syllabique.

Enfin, des études récentes ont révélé que les scribes faisaient beaucoup d'erreurs dans les dessins préparatoires à la gravure des signes. Les analyses continuent et peut-être un jour comprendra-t-on le *rongorongo*. Et vous? Vous en savez désormais (presque) autant que les spécialistes, vous pouvez alors vous rendre à Figeac et essayer à votre tour de déchiffrer le *rongorongo*! ■

Les trois expositions consacrées à l'île de Pâques, dont celle de Figeac, jusqu'au 4 novembre 2018 : www.iledepaquesexpo.fr



Retrouvez la rubrique
Art & science sur
www.pourlascience.fr

LES AUTEURS



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

FAIRE D'UN SMARTPHONE UN MICROSCOPE PERFORMANT

Réaliser sur le terrain des observations microscopiques de qualité avec un simple téléphone portable est désormais possible – et à la portée de toutes les bourses.

Faire un examen microscopique d'une goutte de sang en pleine jungle quand on soupçonne une crise de paludisme? Jusque récemment, c'était impossible sans du matériel coûteux, encombrant et fragile. Mais cela va changer. Car en associant à un smartphone un dispositif optique approprié, petit et réalisable à peu de frais avec une imprimante 3D par exemple, on peut obtenir un microscope mobile de bonne qualité et ayant la résolution requise, de l'ordre du micromètre.

Comme la plupart des autres microorganismes, le parasite responsable du paludisme a une taille de l'ordre de quelques micromètres. Impossible donc à observer à l'œil nu: avec un pouvoir de résolution angulaire de l'ordre de 1 minute d'arc, l'œil parvient tout juste à distinguer des détails d'au moins 50 micromètres (ou 0,05 millimètre).

Une loupe grossissant dix fois ne suffit pas, et il faut donc s'orienter vers un instrument d'optique plus perfectionné, le microscope.

COMBINER DEUX LENTILLES

Un microscope optique comporte en général un objectif qui permet d'obtenir une image agrandie mais inversée d'un objet, que l'on regarde ensuite sans accommoder à travers une loupe appelée oculaire (voir l'encadré page ci-contre). En combinant ainsi les grossissements des deux lentilles (ou systèmes de lentilles), on atteint facilement les valeurs suffisantes ($\times 100$ ou $\times 400$, voire plus) pour observer des microorganismes.

Or les téléphones portables d'aujourd'hui intègrent un appareil photo de bonne qualité. Ne suffit-il pas d'ajouter à un tel appareil un «objectif» pour le transformer en microscope? Et de s'inspirer de Manu Prakash, à l'université

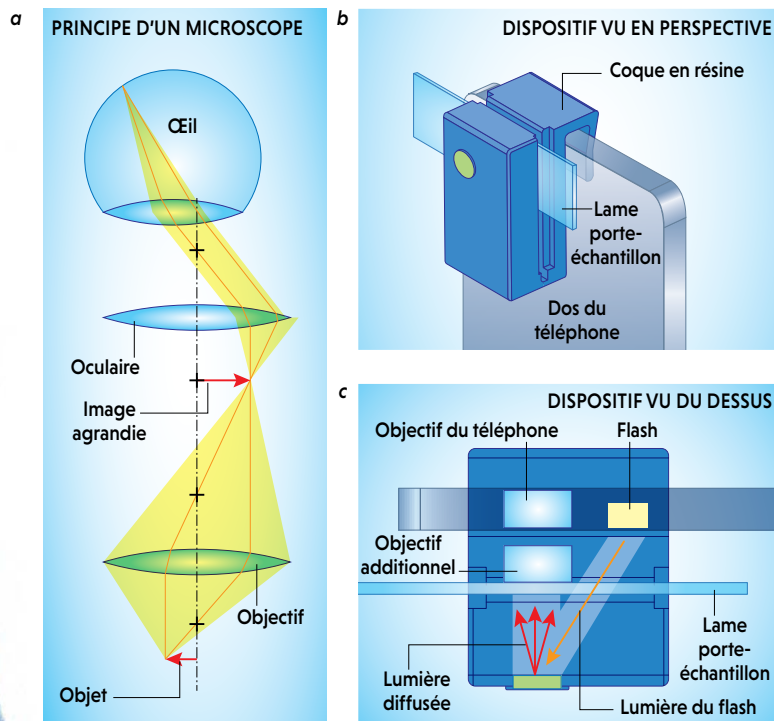


Stanford, qui a utilisé une toute petite bille de verre, peu coûteuse, pour réaliser un microscope-origami (voir la bibliographie)?

Hélas, l'une des difficultés en microscopie est d'obtenir une bonne résolution sur un champ de vision large, ce qui demande de corriger les aberrations: aberrations chromatiques liées à la présence de différentes longueurs d'onde dans la lumière que les verres dispersent comme dans un prisme, aberrations géométriques dues aux rayons qui sont très inclinés par rapport aux surfaces des lentilles et qui vont rendre floue l'image. Ce dernier point est en pratique rédhibitoire

LE TÉLÉPHONE-MICROSCOPE PORTABLE

La microscopie optique nécessite deux lentilles (ou deux systèmes de lentilles) l'une faisant office d'oculaire, l'autre d'objectif (a). Un dispositif simple et peu coûteux consiste à associer à un téléphone portable moderne, muni d'un écran et d'un objectif photographique, un deuxième objectif identique (b, c). L'image formée sur le capteur électronique du téléphone est alors agrandie sur l'écran. La coque en résine, obtenue par impression 3D, comporte des tunnels qui guident la lumière du flash de l'appareil : cette lumière est d'abord diffusée par une paroi avant de traverser le capteur.



pour l'utilisation de billes de verre : la zone de netteté au voisinage de l'axe optique est trop limitée.

On peut aussi s'orienter vers des systèmes à plusieurs lentilles, voire placer un ensemble objectif-oculaire devant le téléphone qui sert alors d'œil. Mais ces systèmes sont coûteux, peu robustes et ne profitent pas pleinement du champ de vision angulaire élevé des smartphones (jusqu'à 60 degrés) : l'image qu'ils forment n'occupe pas l'intégralité de la surface du capteur de l'appareil photographique et donc, *in fine*, de l'écran du téléphone.

En 2014, trois chercheurs de l'université de Californie à Berkeley, Neil Switz,

Michael D'Ambrosio et Daniel Fletcher, ont proposé d'utiliser en externe le même objectif que celui du smartphone, mais renversé. Un tel objectif est peu coûteux compte tenu de sa production en série, et le champ de vision est exploité pleinement. En plaçant l'échantillon à observer dans le plan focal de l'objectif externe, on obtient une image inversée de même taille dans le plan image de l'objectif interne, c'est-à-dire là où se trouve le capteur de l'appareil photo. Il n'y a donc pas de grossissement au niveau du capteur, mais, à cause de la taille réduite des pixels du capteur (1,4 micromètre), la résolution est quand même micrométrique !

L'image étant affichée sur l'écran de l'appareil, qui est beaucoup plus grand que le capteur, elle est grossie. Avec un iPhone 4S (écran de 33 centimètres carrés, capteur de 16 millimètres carrés), on obtient au mieux un grossissement de 14,4. Mais comme il y a plus de pixels sur le capteur (3264×2448) que sur l'écran (960×640), on peut zoomer électroniquement. On atteint ainsi un grossissement effectif d'environ 60 fois. ➤

Les auteurs ont récemment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> Il faut aussi tenir compte de la diffraction de la lumière, qui produit sur le capteur des taches un peu plus grandes qu'un pixel. *In fine*, Daniel Fletcher et ses collègues ont obtenu une résolution de l'ordre de 5 micromètres sur un champ de vision de 10 millimètres carrés.

BIEN ÉCLAIRER L'ÉCHANTILLON

Utiliser un objectif supplémentaire identique à celui du téléphone ne suffit pas, cependant. Il faut aussi placer et éclairer l'échantillon correctement! Pour le positionnement, le développement des techniques d'impression 3D a changé la donne, car on peut produire en série et pour un coût modique des coques où s'insèrent, par un simple clip, l'objectif, la lame porte-échantillon et le téléphone. Reste le problème de l'illumination.

En microscopie optique, l'éclairage le plus souvent utilisé est en transmission (la lumière traverse l'échantillon). Les raisons sont multiples et liées à la nécessité d'avoir assez de lumière au niveau de l'œil malgré le fort grossissement, à l'encombrement du système d'éclairage, au fait qu'on s'intéresse à l'intérieur de l'échantillon (des cellules biologiques par exemple) plutôt qu'à sa surface...

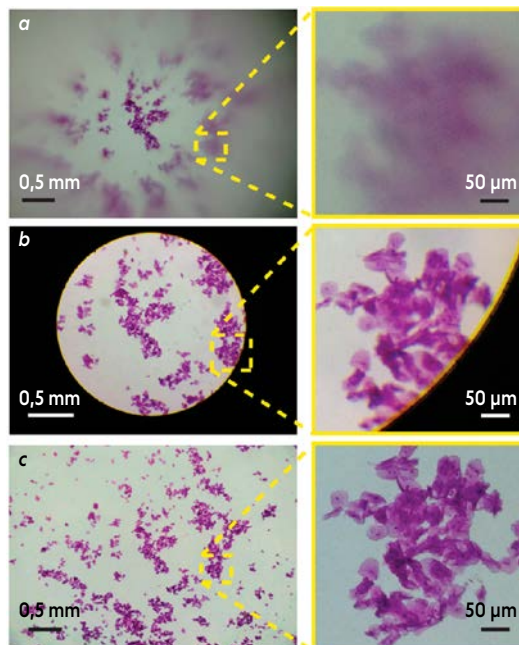
Dans les microscopes à base de smartphone, on faisait appel jusqu'à tout récemment à une source externe, par exemple une simple LED dont l'éclairage est rendu à peu près uniforme en intercalant un filtre diffuseur sur le trajet optique. Cet ajout était-il nécessaire? Jeremy Thompson, Brant Gibson et deux collègues, aux universités RMIT et d'Adélaïde, en Australie, ont tout récemment montré que non.

Cette équipe a eu l'idée d'utiliser le puissant flash qu'intègrent la plupart des smartphones et de créer dans la coque support des tunnels qui guident la lumière du flash vers une paroi de la coque, puis acheminent la lumière ainsi diffusée jusqu'au capteur photo en passant à travers l'échantillon (voir l'encadré page précédente). Ainsi, nul besoin d'ajouter un quelconque miroir ou écran dans le dispositif, que l'on peut donc toujours fabriquer en monobloc.

La résine noire dont est faite la coque absorbe certes de la lumière, mais elle en diffuse suffisamment pour éclairer convenablement l'échantillon. Des 45 milliwatts nominaux du flash ne subsistent que 2 microwatts au niveau de l'échantillon. L'atténuation est forte, mais cet éclairage correspond à la puissance que l'échantillon recevrait à environ 2 mètres

DES IMAGES DE BONNE QUALITÉ

En associant un objectif supplémentaire identique (mais en position inversée) à celui du téléphone portable, on obtient des images microscopiques de bonne qualité (c), meilleures que celles obtenues en associant au téléphone une petite bille de verre (a) ou un dispositif constitué d'un oculaire et d'un objectif (b). Il s'agit ici d'images de cellules épithéliales colorées. On constate notamment qu'avec le dispositif à deux objectifs, le champ de vision est plus vaste et sans distorsions, comparé au champ de vision des deux autres dispositifs.



du flash. Cette illumination suffit, tout en évitant de saturer le capteur de l'appareil photographique.

Par ailleurs, grâce à la diffusion de la lumière, les rayons qui éclairent l'échantillon sont d'inclinaisons très variées, ce qui permet de bien profiter de l'ouverture de l'objectif. La taille de la surface diffuse et sa distance à l'échantillon sont choisies en conséquence.

Mieux encore, ce microscope ambulant peut fonctionner même quand le flash est éteint. En effet, en l'absence d'éclairage direct, on obtient quand même, sous certaines conditions, une image: la lumière ambiante peut se réfléchir plusieurs fois sur les faces de la lame porte-échantillon, qui sert alors de guide de lumière, jusqu'à être diffusée par l'échantillon lui-même. Grâce aux tunnels au sein de la coque de résine, seule cette lumière diffusée traverse les objectifs et atteint le capteur photographique.

L'image ainsi obtenue est donc sur fond noir. C'est particulièrement utile pour observer des objets presque transparents, comme le sont notamment certains organismes aquatiques.

L'équipe australienne a ainsi démontré que leur microscope mobile permet d'observer des noyaux cellulaires, du zooplancton, des spermatozoïdes... sur fond noir ou sur fond clair, selon les cas. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Orth et al., **A dual-mode mobile phone microscope using the onboard camera flash and ambient light**, *Scientific Reports*, vol. 8, article 3298, 2018.

N. A. Switz et al., **Low-cost mobile phone microscopy with a reversed mobile phone camera lens**, *PLoS One*, vol. 9(5), article e95330, 2014.

J.-M. Courty et É. Kierlik, **Un microscope pour moins d'un euro**, *Pour la Science* n° 443, pp. 86-88, septembre 2014.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 490 (août 18)
réf. PL490



N° 489 (juillet 18)
réf. PL489



N° 488 (juin 18)
réf. PL488



N° 487 (mai 18)
réf. PL487



N° 486 (avril 18)
réf. PL486



N° 485 (mars 18)
réf. PL485



N° 484 (févr. 18)
réf. PL484



N° 483 (janv. 18)
réf. PL483



N° 482 (déc. 17)
réf. PL482



N° 481 (nov. 17)
réf. PL481



N° 480 (oct. 17)
réf. PL480



N° 479 (sept. 17)
réf. PL479

À retourner accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science,
au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres
correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ 0 1 x 9,90 € = 9,90 €
2^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
3^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
4^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
5^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
6^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris
Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.
Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :



RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR