

# Quand la technologie LiDAR révèle l'ampleur de cités enfouies

Damian Evans (damian.evans@efeo.net) Christophe Pottier et Dominique Soutif

« FROH IUDQ@DLVH G5 ([WU-PH 2ULHQW DYHGXH GX 3U

7URLV ERQJHV GH OD SDJRGH GH %DQWHD\ &KKPDU DX QRUG  
XQH F«U«PRQLH SRXU E«QLU XQ QRXYHO LQVWUXPHQW /L'

## Le passé vu du ciel

sol que vu du ciel. Pourtant, des avancées significatives ont été très tôt réalisées, Dès le XIX<sup>e</sup> siècle, explorateurs et spénotamment par les chercheurs de l'École française d'Extrême-Orient (EFEO). Au documenter le paysage des lieux qu'Cambodge par exemple, des prospections visitaient, rassemblant ainsi des indices archéologiques aériennes furent entre- en particulier, des vestiges architecturaux prises dès la n des années 1920 par des en brique et en pierre – qui permirent aviateurs et archéologues qui palliaient d'identi er nombre de sites depuis long l'absence de piste par l'emploi d'hydra- temps désertés, enfouis ou simplement vus pro tant des douves encore en eau masqués par la végétation. Au cours d'autour des temples.

XX<sup>e</sup> siècle, cette démarche a été pro-Angkor, qui fut la capitale de l'empire gressivement stimulée, tant par des mer du VIII<sup>e</sup> au XV<sup>e</sup> siècle, doit innovations technologiques que par évidemment sa célébrité à ses grands l'évolution de l'archéologie en tant que sanctuaires – à commencer par Angkor discipline scienti que. Vat – qui ont longtemps monopolisé

L'histoire des missions archéologiques attention des chercheurs. Pourtant, en françaises en Asie du Sud-Est, en cou hors des temples de pierres ou de depuis la n du XIX<sup>e</sup> siècle, illustre bien briques, demeures des dieux, et de quelques l'évolution de l'archéologie du paysage ouvrages civils massifs, cette civilisation et en souligne certaines limites, en paétait par excellence « végétale ». Du plus ticulier en milieu tropical. En effet, la humble des serviteurs jusqu'au souverain, végétation dense caractéristique de les mortels édi aient en effet leurs bâti- type d'environnement a longtemps rendments en matériaux légers aujourd'hui le relief dif cile à appréhender, tant au disparus. En surface, même érodés, seuls

>>>

>>>

les tertres, digues, canaux et bassins témoignent aujourd'hui de ces aménagements. Mais pendant longtemps, la densité de la couverture végétale rendait les prospections sur le terrain difficiles, nous n'avions donc qu'une vision partielle des implantations humaines ce qui constituait pourtant l'une des régions les plus densément peuplées de cette époque [1].

## Des complexes urbains révélés

En 2012, l'EFEO a rejoint un consortium composé de sept partenaires pour entreprendre le premier programme de LiDAR archéologique en Asie, couvrant le nord du Cambodge [2]. Cette expérience a constitué une étape importante dans l'histoire de la télédétection et a déclenché une forte émulation dans le monde archéologique.

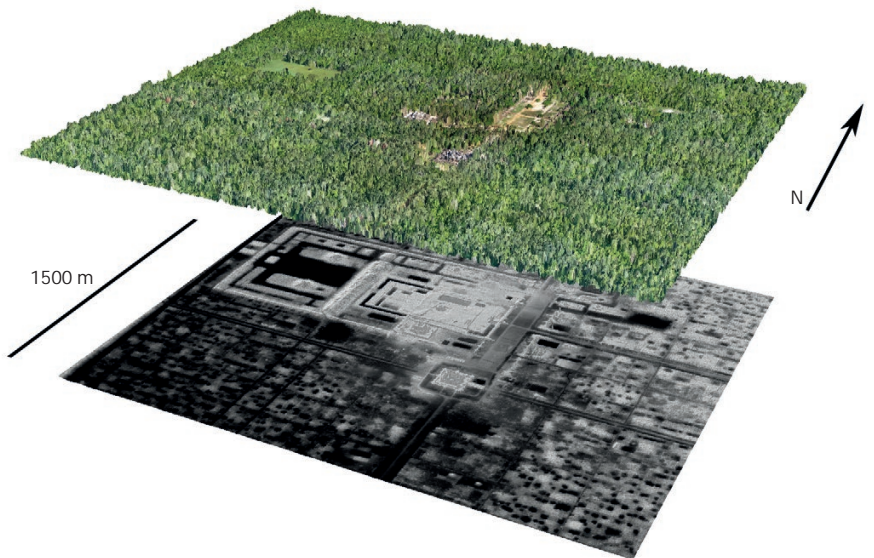
et cérémoniels, mais étaient en fait des zones denses et formellement planifiées au sein de complexes urbains de plus en plus vastes. Ces zones ne ressemblent pas à des « villes » au sens conventionnel, mais sont indéniablement urbaines, ce qui nous invite à repenser la définition même de l'urbanisme dans le passé. Presque invariablement, les populations qui ont construit des villes dans cet environnement tropical difficile l'ont fait d'une

## Paysages et lasers

Dans les années 1990, alors que la péninsule indochinoise sortait en seconde campagne d'acquisition porte à terre, aujourd'hui la couverture végétale à plus de 2 000 kilomètres carrés [3]. Au-delà de la seule période angkorienne, ce sont plusieurs millénaires d'occupation humaine que ces données ont documentés. Elles nous fournissent de nouvelles clés pour suivre l'émergence et le développement des sociétés complexes qui s'épanouissent dans cette région, pour générer des modèles sophistiqués sur l'anthropisation du paysage et pour tester des hypothèses sur le déclin des royaumes et des empires. À ce jour, les lasers nous ont montré comment les zones monumentales étaient pas seulement des centres sacrés. Malheureusement, les limites de la télédétection et les difficultés des prospections sous la forêt tropicale laissent dans nos cartes archéologiques d'Angkor d'importantes lacunes, en particulier dans son cœur monumental densément boisé.

Depuis une dizaine d'années, l'essor rapide du LiDAR (voir l'encadré, p. 67), technologie qui s'était lentement développée depuis les années soixante, a permis de résoudre ce problème. Les instruments de balayage laser aérien offrent aujourd'hui la capacité de voir « à travers » la couverture végétale. Le principe est simple : des millions d'impulsions laser sont envoyées vers le sol, la mesure du temps de retour de chaque signal permet de localiser précisément un point de réflexion dans un espace tridimensionnel. Même si les impulsions sont en grande majorité réfléchies par la végétation, le faible pourcentage qui passe dans les interstices des strates végétales parvient au sol suffit pour créer des modèles remarquablement détaillés du terrain dénudé de la forêt. Il fournit, en quelques heures, de vastes levés topographiques que des décennies d'arpentage n'auraient pu prétendre offrir avec une telle précision.

compris au Cambodge même, où un paysage naturel, souvent au détriment de leurs sociétés sur le long terme. Le LiDAR révèle en effet des transformations à l'échelle régionale, dans lesquelles de vastes zones forestières ont été converties en zones urbaines et agricoles. Avec des rivières entières détournées et des infrastructures hydrauliques de vaste ampleur qui bouleversaient l'environnement, les projets d'ingénierie massifs étaient difficiles à maintenir à terme et, en raison de leur durabilité, ils créaient une sorte d'inertie matérielle qui minait la capacité de ces civilisations à s'adapter aux changements sociaux et environnementaux.



9XH REOLTXH GH OD FLW « / W R% DORH \$ QJH RWLH F & Q F TXL PDUTX  
OD YLOOH G5\$QJNRU 7KRP HVV DXMRXUG5KXL HQYHORSS « SD  
BRQQHQW & YRLU OH U « VHDX XUEDLQ TXL O5HQWRXUDLW HQ  
DX QRUG RXHVW GRQW O5HVHWHQWLHO GHV LQIUDVWUXFWXU  
GHSXLV ORQJWHPSV

Principe de la télédétection par laser

/D W«O«G«WHFWLRQ SDU ODVHU RX /L'\$5 HVW XWLOLV«H GHSXLV OHV DQQ«HV  
 Q5HVW TXH U«FHPPHQW TXH FHWWH WHFKQRORJLH HVW GHYHVFH VXLV DVDPHQW  
 WLTX«H HW DERUGDEOH SDU OHV DUFK«RORJXH V EODPH UH OHV DUHQV YRQ  
 VHFVHXUV «WHQG XV /HV SULQFLSHV GH EDVH GX Les récents progrès réalisés dans  
 SOXW↑W VLP SOHV O5LQVWUXPHQW HVW DWDWDFK« monde par la technologie LiDAR ont  
 YRLU OD SKRWR S b HW «PHW XQH SXOVDWLRQ encourage les médias, et même  
 GDQV QRWUH FDV TXL SHXW -WUH U«IO«FKLH S chercheurs, à annoncer une révolution  
 DX VRO SXLV UHPRQWH DX FDSWXU FH GHUQL scient que » en art Méologie comparable  
 DOOHU UHWRXU TXL G«SHQG ELHQ HQWHQG X GH la Développement de la data in situ par radio-  
 \$LQVL OH FDSWXU HVW LQIRUP« GH OD GLVW Dation dans les années 2000 [4]. Dans  
 O5HQJLQ YRODQW «WDQW OXL P-PH «TXLS« G5X Contexte, il est important d'être prudent  
 HQUHLVWUHQW DYHF SU«FLVLRQ OD SRVLWLRQ par rapport à la méthode de Reconquête  
 SRXYRQV dQDOHPHQW ORFDOLVHU DYHF XQH JU avant tout de ce qui est en cours dans une  
 XQ VIVW<sup>a</sup>PH GH FRRUGRQQ«HV J«RJUDSKLTXHV évolution des méthodes de l'ER des idées,

/D SXOVDWLRQ OXPLQH XVH QH S«Q<sup>a</sup>WUH SDV YUDLPHQW OD J«WDWLRQ JLQ  
 SDV «WUDYHUV HQ U«DOLW« OD OXPL<sup>a</sup>UH VH UD U«IO«FKLH S DU O5LPSRUWH  
 HW SRXU OHV UHOHY«V HQ IRU-WV WURSLFDQHV OP«FDWV UH S DU W L H GHV U  
 LVVXH GH IHXLOOHV 7RXWHIRLV XQ SHWLW SRXU EHQW DJH GHV S OYDWL ROY C  
 J«Q«UDOH PRLQV GH GDQV QRWUH «WXGH O Y D S DU H TILSATION S OUBES  
 WUDYHUV OHV PLQXVFXOHV MRXUV GH OD FDQRS perdues » et de « civilisations oubliées  
 GH UHPRQWHU DX FDSWXU &5HVW OD UDLVLRQ SR Ce qui est pourtant identifiable, c'est  
 HVW GH FRXYULU OH WHUUDLQ G5DXWDQW GH SXOVDWLRQ OD UH VIVW UYU VIVV FOH  
 OHV UHWRXUV SURYHQDQW GX VRO QRXV DY EVOCE instrument, il apparaît que nous  
 LQKDELWXHOH HQ FRPSDUDLVRQ GHV DXWUH VIVW UH VIVV YRQ VIVV VIVV FOH  
 FDUWRJUDSKLH J«Q«UDOH SDU H[HPSOH 'DQV GR de l'effort humain enregistré à la surface  
 ID@RQ VIVW«PDWLTXH « HQYLURQ P<sup>a</sup>WUHV DX de la Terre. Ces paysages que nous  
 ODVHU «WDQW «PLVHV « XQ UHWKPH GH « gîtions raup avant comme « ruyages  
 DLQVL GHV PLOOLRQV GH PHVXUV SDU WUDQF KOU V inhospitaliers » se révèlent de ce  
 EDQGHV G5HQYLURQ P<sup>a</sup>WUHV GH ODUJH 1RW U paella main humaine certains prétendent  
 GH SRLQWV G5LPSDFW DX VRO SDU P<sup>a</sup>WUH FDUU « que même l'Amazonie par exemple, des  
 « O5«FKHOH FHQWLP«WULTXH 'H FHWWH PDQL semble davantage à un jardin qu'à un  
 NLORP<sup>a</sup>WUHV FDUU«V HQ VHXOHPHQW TXHOTXV phénomène naturel [5]. Et seuls les  
 VHPDLQH V GH SRVW WUDLWHPHQW SRXU KDUPR outils comme le LiDAR permettent de  
 GRQQ«HV VSDWLDOHV prendre la mesure de sites archéologiques

/HV GRQQ«HV REWHQXHV FRQVLVWHQW IRQGDPHQW DOHPHQW GDOV OHV UH EDV H  
 GH V«ULHV GH FRRUGRQQ«HV GH WISH ; < = /HV FDSWXUV VRO SDU G5LPSDFW  
 IDLWHPHQW DYHXJOHV « OD QDWXUH GH O5REMHWY«IO«FKLH S DU O5LPSRUWH  
 QRXV XWLOLVLRQV GHV DOJRULWKPHV SHUPHWV DQW GH FORVUHQV OHV SRLQW  
 SRVW WUDLWHPHQW &H TXL LQW«UHVVH WRXW S DU WH FAXO èment standard de la dotte  
 FODVVLDFDWLRQ DXWRPDWLTXH GHV SRLQWV G5LPSDFW DFILS de l'archéologie Des perspectives  
 FDSDFLW« SOXW↑W VWDQGDUG GHV RXWLOV ORJL plus importantes sur un terrain dans  
 LVRO«V OHV SRLQWV G5LPSDFW DX VRO SHXYHQ V monde entier ■ OLV«V SRXU FU«H  
 m VRO QX } UHSU«VHQWDWLYHV GH YXHV GX WHUUDLQ HIFDFHPHQW m G«EDU  
 Y«J«WDWLRQ HW QRXV SRXYRQV H[SORLWHU O Références PDV OXPLQH X[ SRXU  
 UHSU«VHQWDWLRQV GH m WRSRUDSKLH DUFK«RORJLTXH TXL VROV HOVXWV V V  
 SDU OHV DUFK«RORJXH V dJ 8Q LQW«U-W SDUWLE S O V H m b S O J V RU HV V V V  
 WHUHU G5KDELWDWLRQV HQ ERLV GLVSDUXHV GHS Jacques Drongier HPS V HW DX[ YH  
 GH URXWHV FDQDX[ IRVV«V HW VWUXFWXUHV GH FRQVWUHQV 6 DY D V HY X 3 D LY «V  
 GH FHV LPDJHV HVW OLPLW«H SDU OD GHQVLW « GHV (GRQQ et al. PNAS  
 G5LPSDFW DX VRO PDLV SRXU QRV REMHFWLIV QRXV SURGXLRQV GHV LPDJH  
 U«VROXWLRQ GH FHQWLP<sup>a</sup>WUHV TXL QRXV SHUPHWV HQW GH GLVWLQJXH U  
 G5DXVVL SHWLWH WDLOOH TXH GHV EORFV GH SLHUHV VXU OH VRO GH OD IRU-  
 =\$ ) & Ka et al. H PNAS

8QH mbU « YROXLWR  
 VFLHQWLD TXHb }  
 dans la compréhension  
 de la « b »

Les récents progrès réalisés dans le monde par la technologie LiDAR ont encouragé les médias, et même certains chercheurs, à annoncer une révolution scientifique en art Méologie comparable à la révolution de la data in situ par radio-sonde dans les années 2000 [4]. Dans ce contexte, il est important d'être prudent par rapport à la méthode de Reconquête avant tout de ce qui est en cours dans une évolution des méthodes de l'ER des idées,

remontant aux premiers explorateurs. Si, dans certaines régions, les paysages révélés étaient largement inconnus, dans la plupart des cas, le LiDAR vient surtout combler les lacunes de connaissances existantes, loin donc des récits racontés de « villes perdues » et de « civilisations oubliées ». Ce qui est pourtant identifiable, c'est que presque partout où nous regardons avec ce instrument, il apparaît que nous avions sous-estimé l'échelle et l'intensité de l'effort humain enregistré à la surface de la Terre. Ces paysages que nous gîtions raup avant comme « ruyages inhospitaliers » se révèlent de ce point de vue main humaine certains prétendent que même l'Amazonie par exemple, des semble davantage à un jardin qu'à un phénomène naturel [5]. Et seuls les outils comme le LiDAR permettent de prendre la mesure de sites archéologiques

Dans les années à venir, les progrès techniques dans les technologies de drones et du LiDAR devraient nous permettre de combiner au point où ce dernier devient un élément standard de la dotte à partir de l'archéologie Des perspectives plus importantes sur un terrain dans le monde entier ■ OLV«V SRXU FU«H

**Références**  
 1. & 3 R W W L H U TXL VROV HOVXWV V V  
 2. Jacques Drongier HPS V HW DX[ YH  
 3. FR QVWUHQV 6 DY D V HY X 3 D LY «V  
 4. GHV (GRQQ et al. PNAS  
 5. QRXV SURGXLRQV GHV LPDJH  
 6. V V V D Q V of Archaeol Sci  
 7. SLHUHV VXU OH VRO GH OD IRU-  
 =\$ ) & Ka et al. H PNAS

Ce projet est financé par le Conseil Européen de la Recherche (ERC) dans le cadre du programme de recherche et d'innovation de l'Union Européenne Horizon 2020 (contrat de financement n° 639828). Voir le site Web <https://angkorlidar.org>