

À la quête de l'image aérienne gigapixel

Titre original : **Gigapixel Frame Images**, par le professeur Gordon Petrie *I.*
Article anglais originellement paru dans les numéros de janvier/février
et mars 2006 de la revue *GEOinformatics*.

Le Saint-Graal des avionneurs serait-il enfin en vue ? Depuis quelques années, l'intérêt et la publicité autour des clichés numériques mosaïques de la taille du gigapixel a nettement augmenté. Un intérêt partagé entre photographes amateurs et professionnels d'un côté, et astronomes de l'autre. Cet article revient sur les améliorations techniques qui ont permis l'arrivée des clichés gigapixels ; il aborde également les conséquences possibles de cette réussite dans le domaine de la photographie aérienne et de la télédétection.

Comment, grâce à la mise à disposition de clichés gigapixels, surmonter les limitations de résolution liées aux tailles des capteurs CCD équipant les caméras numériques actuelles ? Ces limitations ont amené le développement de dispositifs multi-optiques/multi-capteurs ; cependant, même en utilisant ces caméras composites, la résolution finale obtenue ne dépasse guère la centaine de mégapixels, ce qui demeure encore un peu limité.

La première partie de cet article décrit les progrès ayant permis la constitution d'images gigapixels dans le domaine de la photographie tant amateur que professionnelle ; la seconde partie traite des applications en imagerie astronomique. Dans les deux cas, une analyse essaiera de définir la façon dont ces nouvelles techniques pourraient s'appliquer à la photographie aérienne.

Quatre approches principales

Dans le domaine de la photographie amateur et professionnelle, quatre types d'approches pour réaliser des mosaïques gigapixels existent. Avant de les détailler, les voici brièvement exposées :

– Une image gigapixel résulte de la numérisation haute-résolution, typiquement sur un scanner photogrammétrique, d'un cliché argentique pris avec une caméra grand-format ;

– La deuxième solution consiste à prendre, à l'aide de capteurs CCD de petit format, une multitude de clichés d'une manière rigoureuse et coordonnée ; ces images sont ensuite assemblées à l'aide d'un logiciel de traitement d'image adéquat pour former une image composite qui présente la résolution souhaitée ;

– Une troisième approche consiste à modifier des boîtiers existants ou à en construire des spéciaux pour pouvoir placer des capteurs CCD linéaires dans le plan focal d'une optique et parcourir celui-ci pour acquérir une image de grandes dimensions ;

– Enfin, la quatrième approche ressemble aux appareils photo panoramiques : un capteur CCD linéaire tournant balaye la scène et produit une image 360° de taille gigapixel.

Caméras grand-format

La technologie de base des caméras argentiques à grand format est évidemment bien connue des photogrammètres et des photo-interprètes qui ont travaillé depuis trente ou quarante

I Département de géographie et de géosciences de l'Université de Glasgow. g.petrie@geog.gla.ac.uk

ans dans le domaine du renseignement ou de la cartographie pour la Défense. Pour ne prendre qu'un exemple, durant les années 1970, la société américaine Itek produisait une gamme de caméras photogrammétriques Metritek équipées soit :

- d'un objectif de focale 30 cm et d'un film 23x46 cm ;
- d'un objectif de 21 cm de focale et d'un film au format 23x34,5 cm.

Avec des films type Kodak 3414 panchromatiques, des images atteignant une résolution de 75 à 80 paires de lignes par millimètre ont pu être produites. Les avions porteurs volaient à des altitudes de l'ordre de 20 000 mètres, voire plus dans le cas de certains avions de reconnaissance type RB 57 ou U 2. D'autres spécimens de ce type de caméras ont été conçus par Hycon, au format 23 x 46. Par exemple, le boîtier HR-732, équipé avec un objectif de focale 60 cm, a été utilisé intensivement par la NASA à bord de ses avions U2 civils ER2 (Figure 1a). Le Metritek 30 a fait l'objet de modifications ultérieures pour être utilisé depuis l'espace sous le nom de NASA's Large Format Camera (LFC). Cette dernière a été embarquée à bord de la mission de la Navette spatiale en Octobre 1984. Plus de 2000 clichés de cette mission sont encore disponibles au centre Eros à Sioux Falls, à la fois sous forme papier et numérique. Le centre propose des images de l'EDC numérisées à une taille de pixel final de 14 µm (ce qui donne un fichier final de 2x262 mégapixels) ou à 7 µm (ce qui donne 2 x 1,3 gigapixel). Les images panchromatiques ou en fausses couleurs ne sont en revanche disponibles qu'en 14 µm, ce qui donne des fichiers de 2 x 787 mégapixels.

Le projet Gigapxl

Ce projet a démarré en 2 000 comme un hobby de retraite mené par Graham Flint, un ancien physicien et opticien anglais ayant occupé des postes de direction

chez Lockheed et l'USAF, et sa femme Catherine Aves, qui possédait une formation en PAO et traitement d'images ; ils habitent maintenant le Nouveau-Mexique. Ils ont décidé de fabriquer une caméra à très haute résolution qui puisse leur permettre de prendre des clichés numériques grand format des paysages américains. Pour obtenir ces images panoramiques très précises, ils modifièrent une ancienne caméra aérienne type Fairchild K-38, également de format 23x46 cm. Le boîtier et le magasin ont été préservés, mais tout le reste de l'appareil a subi des chamboulements, particulièrement l'optique remplacée par un grand angle Asymmagon de focale 215 mm, conçu sur mesure (visible en figure 1b). Idem pour la nouvelle monture optique, ainsi que le pied mécanique à inclinaison réglable et la vernier de mise au point. Les moteurs servant à l'avance automatique du film ont été enlevés pour gagner en poids, la caméra ne fonctionne plus qu'en mode manuel. Celle-ci a été fixée dans un cadre métallique particulier relié à un tripode massif et stable. Un appareil petit format de chez Nikon sert de viseur grand angle, en supplément d'un télescope de pointage.

Après exposition, les négatifs grand format sont numérisés soit sur un scanner Leica geosystems DSW500 soit sur un Vexcel VX-4000DT. Au début, une résolution de 12,5 µm (soit 80 pixels par mm) produisait des images de 670 mégapixels. Depuis, une collaboration avec Leica sur son tout récent scanner DSW700 a permis de descendre jusqu'à 6 µm, ce qui au final donne une image de 2,9 gigapixels. Les clichés couleur des mille paysages qui ont été jusqu'à présent photographiés ont majoritairement utilisé les films aériens négatifs couleur type Kodak SO 846 et Agfa Aviophot bien connus des photogramètres. Toutefois, des clichés panchromatiques ont également été employés. Les clichés couleurs définitifs étaient, au début, imprimés sur



Fig. 1a – Un appareil grand-format de chez Hycon (en fond) et un appareil standard Leica RC 10 fixés sur une monture double – comme lors des vols à haute altitude d'un des ER-2 de la NASA. (Crédit : NASA)



Fig. 1b – Deux versions différentes de la caméra grand-format Fairchild qui ont été modifiées pour être utilisées dans le cadre du projet Gigapxl – le grand côté (43 cm) est horizontal sur l'exemple de gauche, il est vertical sur celui de droite. (Crédit : le projet Gigapxl)



Fig. 1c – L'appareil RI de Clifford Ross en cours d'utilisation lors de la prise de vue du mont Sopris au Colorado. (Crédit : Clifford Ross)

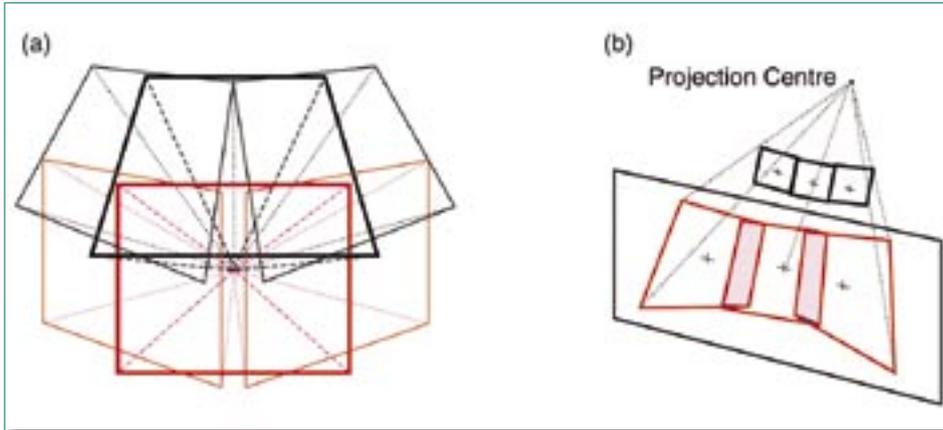


Fig. 2a – Diagramme montrant la disposition géométrique d'un bloc d'images chevauchantes concentriques pris par une caméra numérique unique d'un point de vue unique. (Dessin de Mike Shand)

Fig. 2b – Les images chevauchantes concentriques peuvent être ensuite projetées sur un plan commun grâce à une transformation bidimensionnelle projective. (Dessin de Mike Shand)

une machine Cymbolic Sciences (racheté par Océ) Lightjet 5 000 à l'aide de papier Kodak professionnel. Plus récemment, cette imprimante a été remplacée par une Epson Stylus Color 9 600. Un compte-rendu fort détaillé de la conception et de la cons-

truction de cet appareil, avec une analyse méticuleuse et fascinante de ses possibilités et de superbes échantillons d'images sont disponibles sur le site du projet : <http://www.gigapxl.org>.

La caméra R1

Dans la ligne du projet Gigapixl, débutant en 2003, une approche essentiellement analogue pour la génération d'images gigapixels a été suivie par un autre artiste photographe, Clifford Ross, qui dirige les studios Ross à New-York. La base de sa caméra R1 est à nouveau un appareil militaire Fairchild réformé au format 23x46 cm. Le boîtier a été modifié pour s'adapter à un berceau monté sur un tripode solide, voir la figure 1c. La caméra R1 utilise des émulsions négatives couleur, ici de la Velvia de chez Fuji qui, après développement, sont numérisées dans un scanner haute-performance pour produire une image de 2,6 gigapixels. Comme dans le projet Gigapixl, l'image multispectrale définitive est imprimée sur un appareil Océ Lightjet. Le site Internet du projet, <http://www.cliffordross.com>, est lui aussi bien pourvu en documentation, quoiqu'un peu orienté sur les aspects artistiques et interprétatifs au détriment de la technique. En décembre 2004, Clifford Ross a fondé un groupe de travail, dans lequel se retrouvent entre autres des experts du Sandia National Lab, de la New-York University



Fig. 2c – Le boîtier Nikon D1x équipé de sa monture motorisée en azimut-élévation et de son électronique de commande, placé sur le parapet de l'immeuble de 100 m de haut du département électronique de l'Université technologique de Delft pour photographier la ville alentour. (Crédit et © TNO)

ainsi que de quelques sociétés commerciales, pour creuser les aspects interprétatifs et picturaux de ses images haute résolution au moyen de projections sur des murs, plafonds et planchers.

Images composites mosaïquées

Les projets de Max Lyons, un photographe américain, et de la TNO, un organisme de recherche hollandais, illustrent l'autre approche qui fait appel à de multiples clichés de petit format pour composer une image mosaïque de grandes dimensions.

Max Lyons

Max Lyons est un photographe professionnel résidant à Washington, D.C., qui s'est spécialisé dans la réalisation de mosaïques panoramiques des extérieurs et intérieurs de bâtiments, ainsi que des paysages. Il a également développé un certain nombre d'outils logiciels pour assembler les images élémentaires prises par la caméra. Une bonne illustration de ses travaux est l'image du canyon Bryce dans l'Utah, qui a connu une certaine célébrité. Ce cliché est composé de 196 images élémentaires, chacune de six mégapixels. Elles ont été prises avec un boîtier Canon D60 et une optique de 280 mm. La caméra était montée sur un tripode Manfrotto équipé d'une tête spéciale qui permettait à l'appareil de tourner autour du point nodal de l'objectif, de façon à pouvoir prendre des séries systématiques de photographies avec un léger recouvrement (voir les figures 2a et 2b). Les clichés ainsi réalisés ont été l'objet d'un traitement intensif sous Adobe Photoshop® puis sous des logiciels spécialisés (Panotools et PT Assembler) pour réaliser l'appariement radiométrique et géométrique. Les dimensions de la mosaïque finale atteignent 40 700 x 26 800 pixels soit 1,09 gigapixel. La taille du fichier RGB compressé dépassait tout juste les 2 gigaoctets. Toutes les informa-

tions apparaissent sur les pages adéquates site de Max Lyons : <http://www.tambaware.com/maxlyons/gigapixel.htm>

TNO, Pays-Bas

À l'automne 2004, l'organisme de recherche hollandais TNO a suivi globalement la même approche, à base de l'utilisation d'un boîtier numérique relativement économique et d'un assemblage postérieur des images, pour produire un panorama de la ville de Delft et de ses environs depuis le haut d'un immeuble. La mosaïque obtenue par le TNO mesure 78 700x31 600 pixels, soit 2,5 gigapixels. Le fichier image pèse le triple, soit 7,5 gigaoctets. Les chercheurs ont eu recours à un boîtier Nikon D1x et une optique de 400 mm donnant des images de 6 mégapixels. Le boîtier était fixé sur une monture Manfrotto équipée de moteurs pas-à-pas d'azimut et d'élévation contrôlés par ordinateur (figure 2c), plutôt que le système manuel utilisé par Max Lyons. 600 prises de vue ont été effectuées, chacune transférée sur un ordinateur portable. La production de l'image finale s'est faite selon la même procédure que celle employée par Max Lyons, mis à part que certains utilitaires informatiques développés en propre servaient à contrôler le mouvement de la monture. Le TNO a également eu recours à une méthode essentiellement automatique d'assemblage des clichés, là où Max Lyons avait opéré à la main. Un compte-rendu détaillé, accompagné de nombreuses illustrations est disponible sur : <http://www.tno.nl/gigapixel>.

Caméras avec un dos numérique

Comme la communauté des photogrammètres ne le sait que trop bien, actuellement, les capteurs CCD couleur aisément disponibles atteignent 4000x4000 = 16 mégapixels, voire 5400x4200 = 22 mégapixels au mieux. La plupart de ces capteurs sortent de chez Kodak, et sont utilisés,

par exemple, sur les dos numériques qui équipent les caméras aéroportées Applanix DSS et les IGI DigiCAM 2, dont les boîtiers sont de moyen format de chez Contax, Hasselblad ou Rollei. Ces capteurs 16 ou 22 mégapixels ont aussi été exploités dans la configuration « tuilage » de la Digital Modular Camera (DMC) de chez Dimac systems, où jusqu'à quatre dos prennent des clichés couleur élémentaires qui seront traités pour former l'image grand format définitive ; celle-ci ne dépasse pas malgré tout les 80 mégapixels.

La photographie professionnelle se heurte à ces mêmes limitations en terme de taille des images numériques. Toutefois, des caméras grand format (ex. : 10 x 12,5 cm) servent aux prises de vue de studio ou de paysages. Pour convertir ces appareils au numérique certains dos spéciaux ont été produits, qui utilisent un scanner RGB trilineaire pour numériser successivement chaque composante dans le plan focal. Probablement les plus connus de ces dos sont ceux

l'utilisation de cette technique de balayage (assez lente) du plan focal convient bien à la capture d'images d'objets statiques mais pas du tout à un avion en vol.

Pour le travail en musée, où d'immenses cartes, tapisseries,

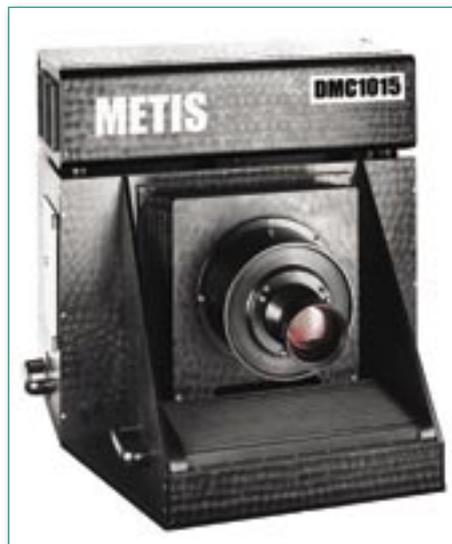


Fig. 3a – La Digital Macro Camera (DMC) 1015/C sert à numériser en haute-résolution de vastes surfaces comme des plans ou des tapisseries ; l'image résulte d'une numérisation dynamique du plan focal de l'optique. (Crédit : Metis Systems)

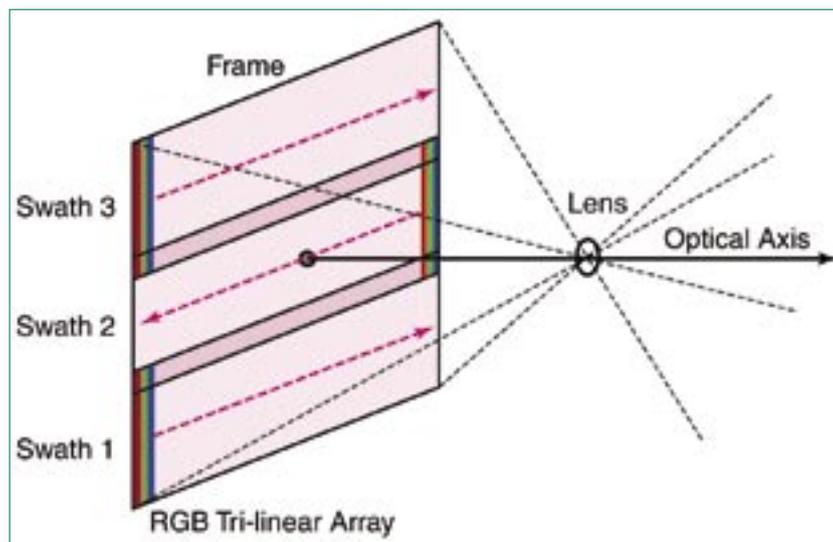


Fig. 3b – La numérisation systématique du plan focal de la caméra DMC de chez Metis à l'aide d'une barrette CCD trilineaire de chez Sony donne une image numérique gigapixel. (Dessin de Mike Shand)

commercialisés par Better Light aux États-Unis et Phase One au Danemark. Le PowerPhase FX+ de ce dernier recourt à un élément trilineaire de 10 500 pixels de 8 µm produit par Kodak pour engendrer une image de 10 500x12 600 = 132 mégapixels par composante (taille totale : 380 mégapixels). Évidemment

peintures ou documents doivent être photographiés en vue de leur archivage (ou de travaux de recherche), et pour la photographie paysagère, des appareils de plus grand format encore doivent être utilisés. Pour ces travaux, la société Metis Systems basée à Rome a conçu une Digital Macro Camera (DMC) (Figure 3a) dans

un boîtier neuf (plutôt que de reprendre le système d'un dos numérique adapté à un boîtier existant). Cet appareil utilise un élément trilineaire de chez Sony qui analyse d'abord le tiers inférieur de l'image. La barrette est ensuite déplacée verticalement grâce à un mécanisme de glissière et un moteur pas-à-pas de façon à analyser le tiers médian et supérieur de l'image (Figure 3b). Globalement, on peut dire que ce système est similaire à ceux utilisés dans les scanners photogrammétriques de précision comme le SCAI de chez Z/I Imaging. Les actionneurs et l'électronique de contrôle viennent de la société allemande Kigamo GmbH. La taille de l'image produite par l'appareil DMC atteint 31 250x38 125 pixels, soit 1,19 gigapixel par composante, soit un total de 3,4 gigapixels. Encore une fois, cette technique limite l'utilisation à la prise de vue d'objets fixes depuis un point fixe (et non un avion). Plus de détails sur le site de Metis : <http://www.metis-group.com>.

Scanners cylindriques

La photographie panoramique, particulièrement de paysages et de bâtiments, est resté très longtemps l'une des occupations favorites des photographes tant professionnels qu'amateurs. Jusqu'à très récemment, celle-ci était pratiquée à l'aide de caméras spéciales utilisant des films 35 ou 120 mm. Cependant, depuis peu, une génération de scanners linéaires rotatifs a fait son apparition ; ils conviennent à l'acquisition de clichés panoramiques avec des résolutions qui peuvent atteindre le gigapixel. Le scanner panoramique EyeScan M3, conçu conjointement par le Centre aérospatial allemand (DLR) et la société Kamera System Technik (KST) de Dresde, est un bon paradigme de ce genre de produits (Figure 4a). La numérisation consiste essentiellement à faire tourner le scanner linéaire sur une table rotative de haute précision, l'axe giratoire passant dans l'optique, de façon à assurer

une couverture de 360°. Le mécanisme moteur et démultiplicateur est sous le contrôle strict d'un ordinateur de commande. L'image est numérisée en continu au moyen d'une barre CCD de chez Kodak de 10 200 pixels disposée verticalement. Utilisée avec un téléobjectif (100 mm), le système produit une image de 10 200x89 700 pixels, soit 914 940 000, juste en-dessous du gigapixel. Selon la précision de l'échantillonnage, 8 ou 16 bits par canal couleur, la taille finale du fichier varie de 2,75 à 5,5 gigaoctets. Puisque la numérisation de l'ensemble de la scène prend aux environs de dix minutes, encore une fois cet appareil ne peut convenir qu'à la prise d'objets immobiles depuis un point fixe. Le site de KST (<http://www.kst-dresden.de>) donne plus de détails.

La géométrie d'une image prise à l'aide d'un scanner cylindrique rotatif ressemble à celle obtenue au moyen d'un appareil photo aérien panoramique, à ceci près que le champ couvert atteint 360° et non 180 (Figure 4b). Les photogrammètres ont manifesté un intérêt pour l'EyeScan ainsi que pour des appareils similaires comme ceux commercialisés par Spheron VR (PanoCam) ou Dr. Claus (Karlne) en Allemagne ou Seitz (Roundshot) en Suisse. Cependant, à l'exception du premier, leurs barrettes CCD sont plus petites (5 300 ou 3 600 pixels), et donc les images produites d'une taille inférieure. Les photogrammètres se sont concentrés sur des applications architecturales, par exemple l'exécution de relevés précis du bâti dans le cadre d'applications de modélisation urbaine. Deux conférences ont déjà eu lieu à ce sujet, la première à Dresde en mars 2004, la seconde à Berlin en février 2005.

Résumé et analyse

De ce qui a été dit, il appert que différentes méthodes sont possibles pour réaliser des clichés gigapixels. L'approche consistant à numériser un négatif grand format

est identique à celle qu'utilisent beaucoup d'utilisateurs de caméra aériennes « normales » (format 23x23 cm) – à ceci près que le format est doublé dans une dimension. Malheureusement, la fabrication de ces boîtiers grand format a été abandonnée depuis longtemps, et la tendance est à l'acquisition directe des images numériques. Les caméras numériques aériennes actuelles devant ce contenter de la taille modeste des capteurs CCD courants, même lorsque plusieurs optiques sont utilisées sur boîtier unique, la dimension finale ne dépasse guère les cent mégapixels. En ce qui concerne les autres solutions envisagées, c'est-à-dire la prise consécutive de centaines de clichés élémentaires adjacents, ou encore la numérisation progressive d'une image du plan focal par une barrette CCD, elles ne conviennent pas à la photographie aérienne où l'avion se déplace trop vite. Tout cela conduit à écarter toute mise en œuvre de ces techniques dans le domaine photogrammétrique, à part pour la réalisation de clichés d'objets terrestres fixes. Tournons-nous maintenant vers les recherches menées actuellement dans le domaine de l'astronomie.

L'astrophotographie en général

Naguère encore, la plupart des astrophotographies mettaient en œuvre des plaques photographiques grand format. Ainsi, par exemple, les télescopes Schmidt grand-angle qui ont été utilisés pour conduire des campagnes systématiques d'exploration du ciel nord (à l'observatoire du Mont Palomar aux États-Unis) et sud (par les instruments anglais UKST situés en Australie et l'Observatoire Austral Européen (ESO) situé dans la cordillère des Andes au Chili) sont pourvus de boîtiers au format 35,5x35,5 cm. Ces plaques sont ensuite numérisées grâce à des scanners à plat automatiques tels que le SuperCOSMOS de l'Observatoire royal d'Édimbourg. Celui-ci dispose d'une finesse de grain de 10 µm et d'une précision sub-micrométrique. Il s'agit

donc d'un scanner comparable en performances aux derniers nés de chez Z/I Imaging, Leica ou Vexcel employés en photographie aérienne. Le format de l'image numérique est de 35 500x35 500 soit 1,26 gigapixel.

À l'instar du reste de la photographie, la tendance en astrophotographie est à l'acquisition numérique directe des images ; de plus en plus de vieux télescopes sont convertis et les nouveaux sont directement équipés de capteurs numériques. Au demeurant, en plus des problèmes liés à la faible taille des capteurs, les astronomes ont également des exigences en terme de sensibilité, puisque la lumière stellaire est très faible : il leur faut des capteurs ayant une efficacité quantique maximale et un niveau de bruit minimal. Partant, la plupart des circuits CCD utilisés sont construits sur mesure par des laboratoires spécialisés ; le pourcentage de déchet dans la production demeure important, ce qui rend ces produits rares et onéreux. Pour résoudre les difficultés liées à la taille des capteurs élémentaires, les astronomes se tournent de plus en plus vers des mosaïques de CCD qui leur fournissent directement les images haute résolution dont ils ont besoin. À cet égard, la récente invention de CCD aboutables ² pourrait se révéler d'une grande importance pour la photogrammétrie et la télédétection.

Télescopes terrestres

Parmi les télescopes terrestres utilisant des matrices de CCD pour obtenir des images numériques, citons le télescope Canada-France-Hawaï (CFHT) et le Sloan Digital Sky Survey (SDSS).

Le télescope Canada-France-Hawaï

Ce télescope, comme son nom l'indique, est le fruit d'une coopération entre le Conseil national de la recherche canadienne (NRC/CNR) et le CNRS, avec le concours de

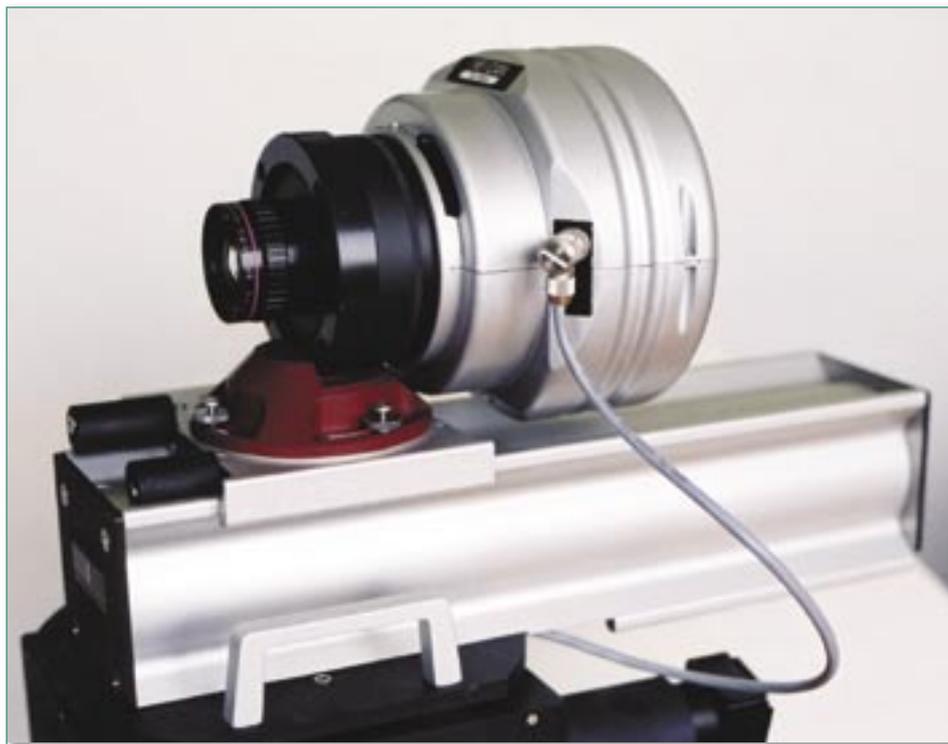


Fig. 4a – Le scanner linéaire rotatif KST Eyescan M3 Metric sur son support, et la table pivotante de précision utilisée pour faire tourner l'optique durant l'acquisition de l'image numérique. (Crédits : Kamera und System Technik GmbH)

l'institut d'astronomie de l'université d'Hawaï. Pendant des années, il s'agissait d'une optique de 3,6 m de diamètre située au sommet du Mont Kea à Hawaï. Les capteurs CCD y ont fait leur entrée progressivement. Dès 1991, le télescope reçoit une matrice de 2 000x2 000 pixels fabriquée par Loral. En 1994 puis 1995, ce capteur a été remplacé successivement par un MOCAM 4 000x4 000 puis un UH8K de 8 000x8 000 points. En 1999, installation d'une mosaïque de 12 000x8 000 (CFH12k). Ce capteur composite est formé de douze matrices CCD élémentaires 2 000x4 000 produites par le laboratoire Lincoln au MIT, chacune étant aboutable sur trois côtés, arrangées en deux rangées de six capteurs. Le CFH12k produisait des images de 96 mégapixels jusqu'à sa substitution en 2003 par une mosaïque encore plus grande produite cette fois par le CEA, la MegaCam. Cette dernière incorpore 36 (puis 40) capteurs de 2 000x4 000 CCD pour une image finale de 340 (respectivement 377) mégapixels (Figure 5b). Le télescope VST de l'Observatoire européen

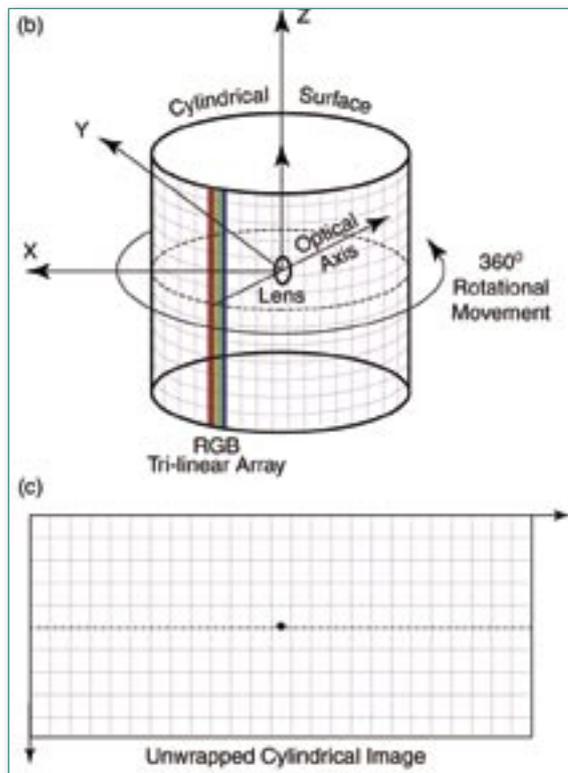


Fig. 4b – Principe du tour complet effectué par l'optique et la barrette trilineaire pour acquérir une image cylindrique à l'aide d'une caméra panoramique.

Fig. 4c – L'image cylindrique obtenue par la numérisation panoramique peut être dépliée sur un plan (le cylindre est un volume de courbure nulle). (Dessin par Mike Shand)

² Buttable dans le texte original. Ce néologisme signifie qui peut être juxtaposés, jointif.



Fig. 5a – La caméra numérique MegaCam montée dans un étui de transport. La caméra est issue des laboratoires du CEA et équipe le télescope Canada-France-Hawaï Telescope (CFHT) situé au sommet du Mauna Kea à Hawaï. (Crédit : CEA)

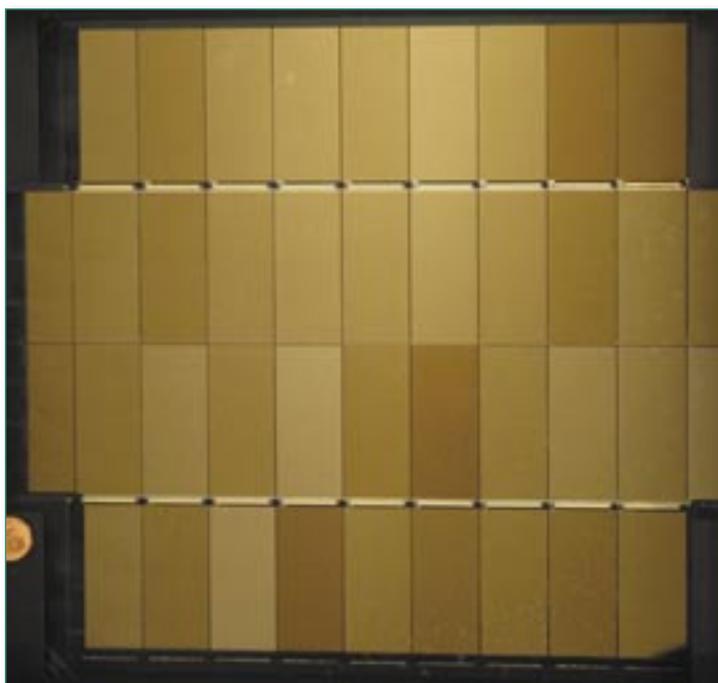


Fig. 5b – La caméra numérique MegaCam comprend 40 CCD aboutables, chacun de 2 000x4 000 pixels, fabriqués par la société E2V technologies au Royaume-Uni. (Crédit : CFHT Corporation)

austral et la MegaCam du télescope MMT du Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) ont tous été produits par la société britannique E2V. Il faut toutefois remarquer que, malgré l'aboutement possible sur les quatre côtés, il reste des espaces aveugles de quelques dizaines – voire deux cents pixels au pire – entre les capteurs. Ces vides sont comblés par une technique d'estompage qui fonctionne avec le balayage du télescope, une astuce qui ne semble pas directement applicable au cas de la photographie aérienne, qui doit recourir à une autre méthode pour remplir les espaces. On pourrait penser à un procédé similaire à celui de l'UltraCam de Vexcel.

Le Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

Ce projet a pris la suite des explorations systématiques réalisées à l'aide des télescopes Schmidt déjà mentionnées. Son but n'est pas de constituer une photographie extensive du ciel de l'hémisphère nord, mais de se concentrer sur un quadrant seulement, puisque ses détecteurs CCD peuvent résoudre des objets beaucoup plus faibles que les plaques photographiques. Le télescope Sloan Survey, situé à Apache Point dans le Nouveau-Mexique, utilise un miroir de 2,5 m. Le site est situé à 2 800 m d'altitude loin de tout éclairage urbain qui serait susceptible de voiler les clichés. Le télescope SDSS est équipé de trente mosaïques CCD de $2\,000 \times 2\,000 = 4$ mégapixels fabriquées par Scientific Imaging Technologies, une société basée en Oregon. Ces capteurs sont arrangés en six colonnes de cinq éléments (Figure 6b). Le télescope fonctionne en balayage, les objets éclairent donc successivement les cinq capteurs de leur colonne, chacun de ces capteurs étant muni d'un filtre spectral différent. Ainsi, une fois les images élémentaires des cinq capteurs recueillies, l'opérateur peut former une image multispectrale en fausses couleurs. La méthode ressemble cependant plus à la numérisation successive à l'aide d'une barrette CCD qu'à une technique bidimensionnelle directe.

Deux autres projets actuellement en cours de réalisation représentent la prochaine génération de télescopes terrestres grand-champ destinés à réaliser des observations systématiques des objets de très faible magnitude. Il s'agit du PanSTARRS (Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System) et du LSST (Large aperture Synoptic Survey Telescope). Les deux comportent des mosaïques de CCD qui produiront des images gigapixels.

PanSTARRS

Ce projet est porté par l'Institut d'astronomie de l'université d'Hawaï. Son principal but est de détecter des objets potentiellement dangereux à l'intérieur du Système solaire (essentiellement des astéroïdes) qui pourraient s'écraser sur Terre. Le principe de la détection consiste à photographier à intervalles de quelques jours ou quelques semaines les mêmes portions du ciel. Toutefois, le champ important du télescope le rend également apte à d'autres applications. Le système PanSTARRS comporte quatre télescopes couplés, chacun disposant d'un miroir d'1,8 mètres et de son propre capteur CCD. Normalement, ces télescopes pointeront tous vers les mêmes coordonnées célestes — sous contrôle d'un ordinateur. L'utilisation de quatre petits télescopes à grand-champ est considérée comme plus rapide et plus économique que l'installation d'un unique télescope possédant la même ouverture. Les CCD équipant chaque optique ont été eux aussi réalisés par le laboratoire Lincoln du MIT. Chacun est composé d'un assemblage de 8x8 matrices à transfert orthogonal (OTA, Orthogonal transfer arrays), elles-mêmes formées d'une mosaïque de 8x8 CCD à transfert orthogonal, chacun de ces CCD mesurant 512x512 pixels. Au total, chaque télescope disposera donc de $(8 \times 8) \times (8 \times 8) \times (512 \times 512) = 1$ gigapixel (Figure 7a). Le financement de ce projet assez complexe et onéreux s'est avéré plus que difficile. En conséquence, pour l'instant, les travaux se limitent au montage de l'un seulement des télescopes (PS1) afin de servir

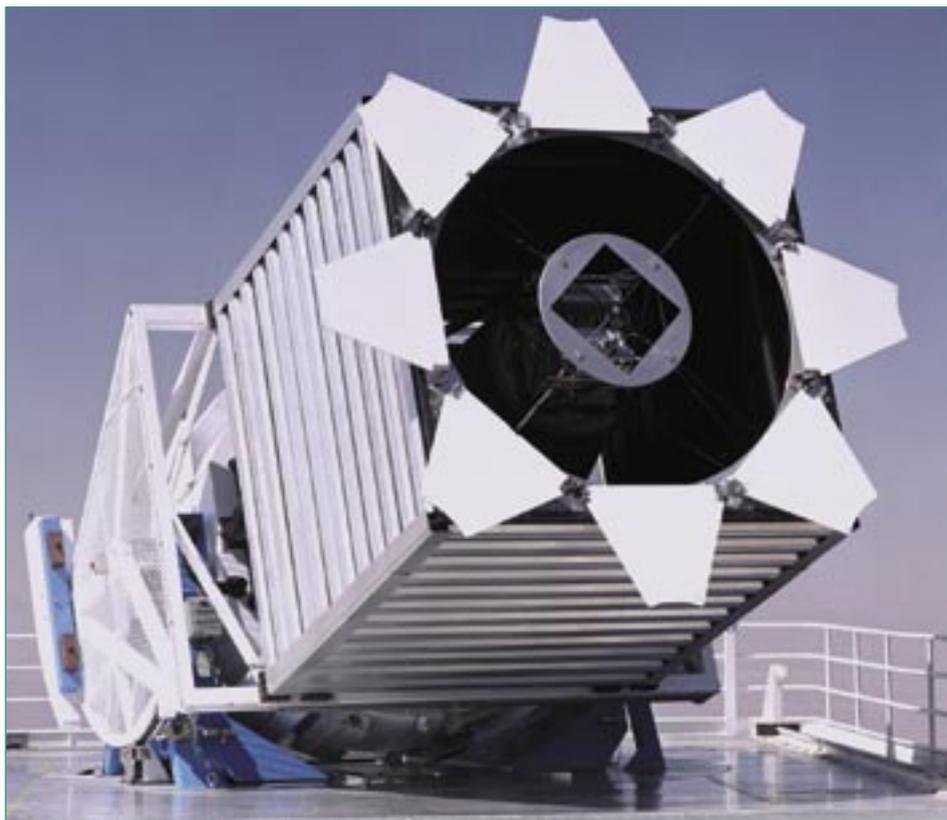


Fig. 6a – Le télescope Sloan Digital Sky Survey (SDSS) est l'un des appareils de l'Observatoire Apache Point situé dans les monts Sacramento du Nouveau-Mexique. Le primaire a un diamètre de 2,5 m. Le coffret métallique évidé est le déflecteur de vent, fixé différemment du reste du télescope, il prévient les secousses dues aux mouvements d'air.

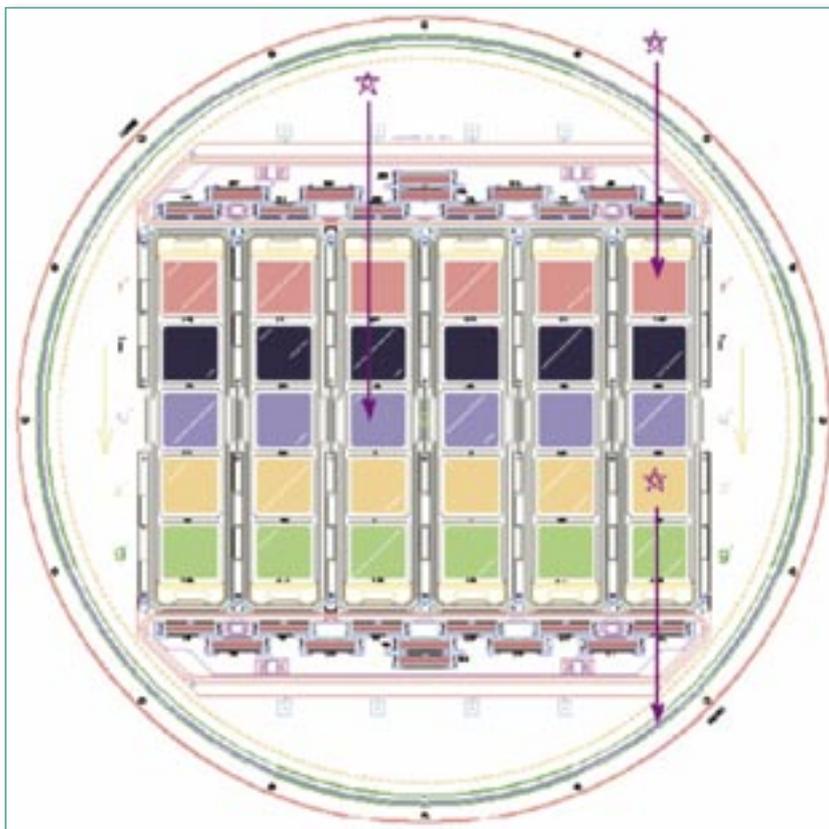


Fig. 6b – Les 30 matrices CCD équipant le télescope SDSS sont disposées en six colonnes, chacune de cinq matrices. Chaque colonne est encapsulée dans une chambre à vide, et chaque CCD qui la compose est précédé d'un filtre spectral différent, de façon à pouvoir créer une image en fausses couleurs. (Crédit : Sloan Digital Sky Survey)



Fig. 7a – Un écorché en perspective du prototype du télescope PS-I avec son primaire de 1,8 m de diamètre. Ce doit être le premier d'une série de quatre instruments formant une partie du futur observatoire Pan-Starrs qui prendra place sur le Mont Haleakala de l'île Maui, à Hawaï.

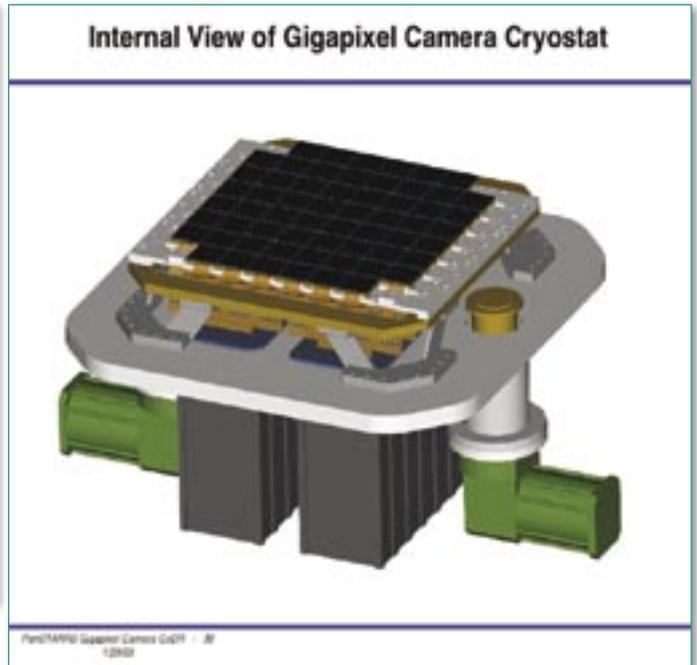


Fig. 7b – Diagramme illustrant la disposition des Orthogonal Transfer Arrays (OTA) qui équiperont chacun des quatre télescopes Pan-Starrs. Au total, ces mosaïques prendront des images gigapixels. (Crédit : Institute for Astronomy, University of Hawaii)

comme démonstrateur (Figure 7b). Le miroir primaire est actuellement poli en verre Zerodur par Schott à Mainz (Allemagne), qui fournira également la monture. L'ensemble sera installé sur le Mont Haleakala, situé dans l'île de Maui à Hawaï.

LSST

Il s'agit d'un projet encore plus ambitieux, animé par la National Optical Astronomy Observatory

(NOAO), certains organismes de recherche nationaux (DOE) et une large palette d'universités. Le but est de réaliser des explorations régulières de l'ensemble du ciel grâce à un télescope à trois miroirs, dont le primaire mesurera 8,4 mètres (et disposera d'un champ de 3 à 5°) et sera équipé d'un capteur CCD (ou CMOS) mosaïque de grandes dimensions dans son plan focal (Figure 8a). La mosaïque comprendra 201

capteurs élémentaires donnant une taille totale de 3 gigapixels pour un temps de lecture avoisinant la seconde (Figure 8b). Chaque pixel du capteur mesure 10 µm. L'utilisation d'un miroir imposant devrait permettre d'atteindre des magnitudes élevées et de procéder à des observations régulières.

L'équipe de développement étudie divers sites au Chili et dans les îles Canaries, les deux étant situés relativement près de l'équateur, de sorte à embrasser autant de ciel que possible. Encore une fois, le coût du projet, 150 millions de dollars, entraîne des difficultés de financement. Cependant, celui-ci a déjà démarré : la réalisation du primaire a été confiée au Steward Observatory Mirror Lab de l'université de l'Arizona. Richard Caris, un mécène arizonien, a généreusement fourni l'argent nécessaire.

Télescopes spatiaux

Comme les nombreuses images issues du télescope spatial Hubble l'ont démontré, placer une optique hors de l'atmosphère résout un certain nombre de problèmes liés à

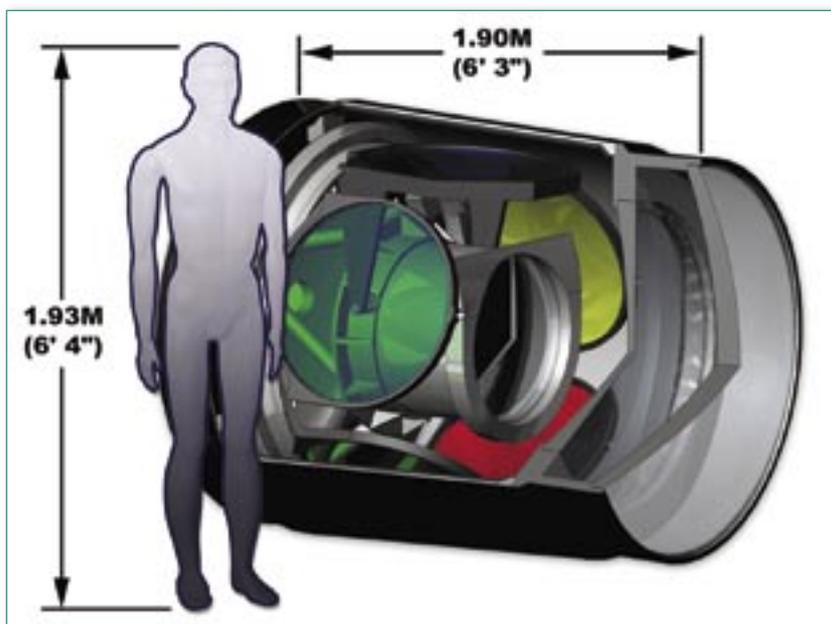


Fig. 8a – Un écorché du projet Large-Aperture Synoptic Survey Telescope (LSST) avec ses trois miroirs repliés et ses filtres spectraux rotatifs. (Crédit : LSST Corporation)

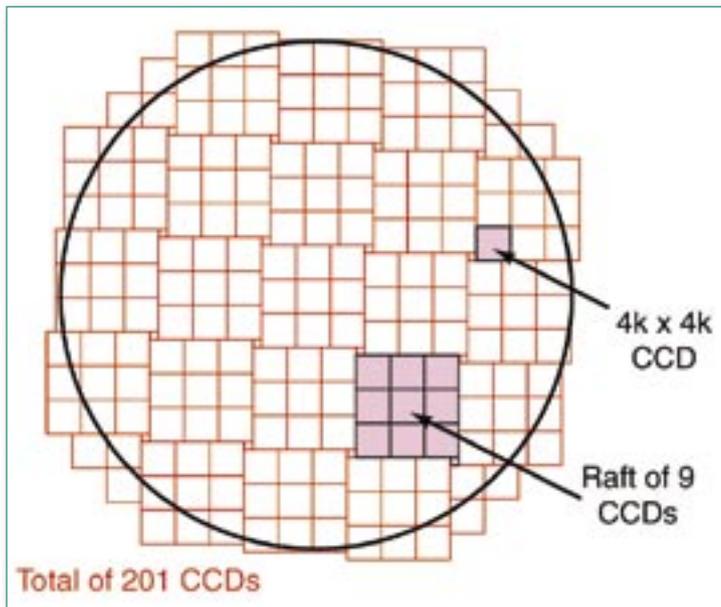


Fig. 8b – L'arrangement de la mosaïque circulaire de 201 CCD prendra place au plan focal du LSST. Elle devrait donner des images supérieures à trois gigapixels. (Dessin par Mike Shand)

Il pourrait aussi servir à détecter les astéroïdes. Il sera équipé de trois télescopes (Figure 9a). Les deux premiers (appelés « astro »), pourvus d'un primaire de 1,4 m de diamètre seront utilisés pour la localisation et l'observation d'objets galactiques. Le troisième télescope (« spectro ») est un spectrographe, comme son nom l'indique.

Le plan focal des deux instruments « astro » recevra un capteur composite de 170 matrices CCD, chacune de neuf mégapixels, soit un total de 1,5 gigapixel. 30 CCD supplémentaires seront affectés au spectrographe. Tous ces capteurs sont fournis par la société E2V basée à Chelmsford dans le sud-est de l'Angleterre, la même qui

la turbulence et à la diffusion, entre autres. Le désavantage de Hubble tient dans son champ restreint, 6 minutes d'arc, à comparer avec les champs larges des optiques déjà évoquées, précisément 2,5° dans le cas du SDSS, et 3,5° pour le LSST. Des études ont donc démarré pour placer en orbite des télescopes à champ large, équipés de capteurs CCD gigapixel, qui pourraient permettre une observation plus détaillée du ciel entier (ou de l'une de ses parties). Deux exemples, le projet Gaia de l'ESA et la SuperNova/Acceleration Probe (SNAP), dans laquelle sont impliquées diverses administrations américaines (DOE département de l'énergie, NSF fondation nationale pour la science, NASA).

Le projet GAIA

Cette proposition prévoit le placement d'instruments au point de Lagrange L2 situé 1,5 million de kilomètres derrière la Terre. Rappelons qu'un objet situé aux points de Lagrange du couple Terre/Soleil reste fixe par rapport à ces deux corps (les attractions mutuelles se compensent). Depuis ce point, où la Terre devrait protéger partiellement l'électronique du vent solaire, le système Gaia observera principalement les objets situés à l'intérieur de notre galaxie (la Voie lactée), poursuivant la mission du feu satellite Hipparcos.

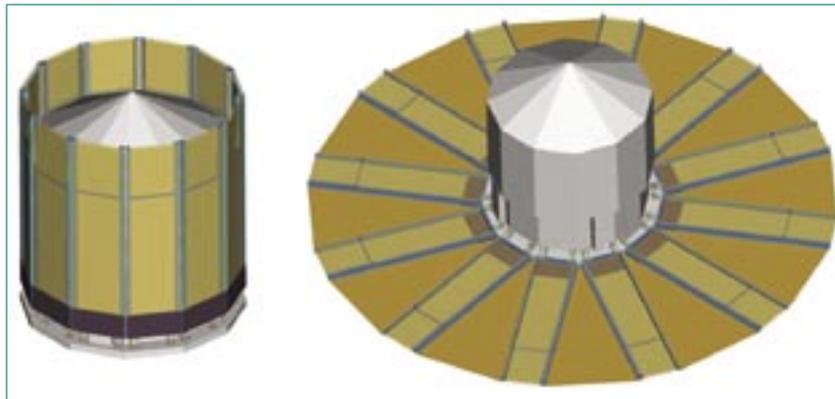


Fig. 9a – Diagrammes du satellite Gaia en forme de dôme avec son pare-Soleil replié pour le lancement à gauche, et déployé à droite. L'extérieur de ce pare-Soleil est couvert de cellules photovoltaïques qui alimentent le satellite. Le pare-Soleil protège aussi les optiques des trois télescopes embarqués pour permettre leur fonctionnement à basse température. (Crédits : ESA)

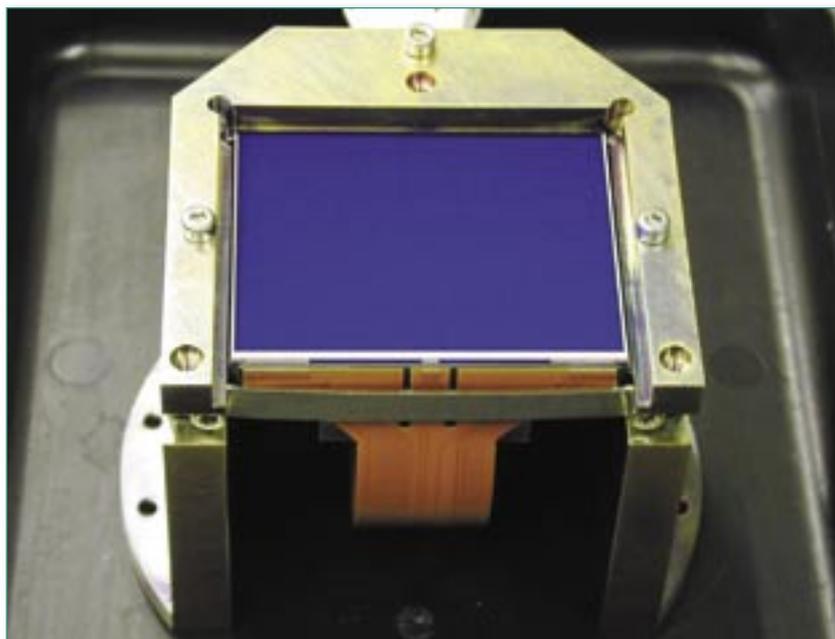


Fig. 9b – Le premier démonstrateur grandeur nature de la mosaïque CCD rétroéclairée conçue pour le satellite Gaia par la société E2V et montée sur un support de test. (Crédit : E2V technologies)

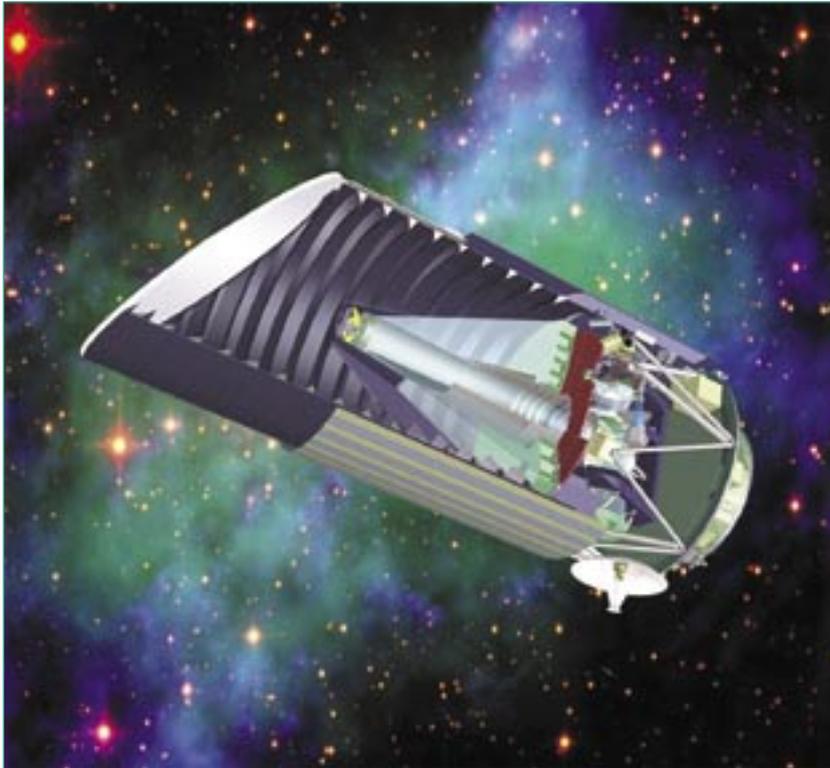


Fig. 10a – Une vue d'artiste, en forme de schéma, du satellite Snap une fois lancé, montrant la disposition des trois miroirs internes du télescope grand-champ.

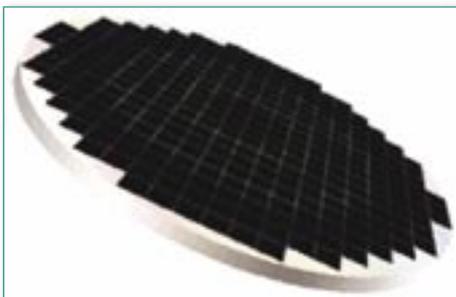


Fig. 10b – Des centaines de matrices CCD seront juxtaposées pour former une mosaïque circulaire de plus de trente-cinq centimètres afin d'acquérir des images gigapixels. (Crédit : Lawrence Berkeley National Lab)

réalise déjà les CCD des projets CFHT, VST et MMT (Figure 9b) — ainsi que ceux de la précédente mission de l'ESA, XMM-Newton, et de la future mission Kepler de la NASA, prévue pour 2 007.

SNAP

La sonde SuperNova/Accelerator Probe devrait se limiter à la détection d'objets stellaires de type Supernova Ia, ceci dans le but de mesurer plus précisément l'accélération récemment découverte de la vitesse d'expansion de l'Univers, et les problèmes liés d'« énergie noire », de masse manquante, etc.

Le projet prévoit le lancement d'une optique grand-champ à trois miroirs, dont le primaire mesurerait deux mètres (Figure 10a). L'orbite retenue est quasi-polaire, ce qui permettra d'observer fréquemment les pôles célestes nord et sud, de façon à y localiser les supernovæ et à en observer le comportement. Encore une fois, l'optique focalisera les images sur une mosaïque CCD d'une taille supérieure au gigapixel (Figure 10b). Chaque CCD élémentaire mesure 10,5 µm et la matrice comprend 3 500x3 500 pixels. Ils sont fabriqués par le laboratoire national Lawrence Berkeley (LBNL). Des mosaïques supplémentaires à base de HgCdTe (Tellure de mercure et de cadmium) permettront des observations dans l'infrarouge lointain.

Discussion

De tout ce qui précède, on peut conclure que le développement de matrices CCD aboutables pour la prise de vue grand format en astronomie offre une technologie potentiellement intéressante, qui élimine l'un des principaux points d'achoppement

de la photographie aérienne actuelle, à savoir la taille limitée des capteurs. En prenant une taille du pixel individuel de 10 µm comme point de comparaison, une caméra aérienne standard (23x23 cm) produit des images de 23 000x23 000 = 529 mégapixels (soit ½ gigapixel), là où, actuellement, les images numériques les plus résolues, issues d'un appareil de marque BAE, ne contiennent que 9 000x9 000 = 81 mégapixels. D'ailleurs, ces matrices sont utilisées dans des dos numériques adaptés à des caméras militaires, telles que la KS-87, dont la taille est de 12,5x12,5 cm. De même, l'utilisation de quatre appareils photographiques couplés dont les images sont jointes ultérieurement ne permet d'atteindre que des tailles similaires : 108 mégapixels chez Z/I, 86 pour l'UltraCam de Vexcel, 88 pour la DMC de chez DiMAC systems.

Bien sûr, la taille n'est pas le seul paramètre important : la dynamique supplémentaire des capteurs CCD est un avantage incontestable des capteurs numériques. Un format d'image insuffisant limite cependant sévèrement la fauchée et le rapport base/hauteur. Comme les astronomes sont confrontés aux mêmes problèmes que les photogrammètres lors du passage de l'argentique au numérique, étudier les solutions qu'ils ont trouvées pour surmonter ces difficultés est très instructif. Ces capteurs mosaïques « giga-ntesques » commencent à être produits en série ; peuvent-ils résoudre le problème du format d'image aérienne insuffisant ? Naturellement, des CCD (ou CMOS) conçus pour la photographie aérienne devraient avoir des caractéristiques sensiblement différentes de ceux utilisés en astronomie, et faire l'objet d'un développement spécifique. De même, il faudra surmonter le problème des espaces aveugles correspondant aux jointures des capteurs élémentaires. Néanmoins, la fabrication de capteurs composites gigapixels spéciaux pour la photographie aérienne est une idée fascinante. ■