



De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes terrestres

Après une première partie dédiée à l'exploration **dimensions de l'Univers**, nous allons tout de suite partir à son exploration, et surtout pour aller aussi loin que possible. On trouve quelques entrepreneurs français dans ce domaine que je vais citer, qui cherchent à rendre plus accessibles les télescopes d'amateurs. Le plus spectaculaire se situe cependant dans les grandes installations de télescopes géants et les technologies associées. L'une des histoires les plus fascinantes est cependant celle des capteurs CCD et CMOS issus des avancées dans les télescopes, satellites et sondes spatiales. Les appareils photos de nos reflex et smartphones sont en effet de lointains descendants de technologies à l'origine développées pour l'exploration spatiale !

Les moyens d'exploration de l'Univers

Nous savons que l'Homme observe le ciel depuis au moins des milliers d'années. Au Néolithique, les sites de Stonehenge, Goseck, Nabta Playa témoignent d'observations oculaires permettant de prédire les saisons pour l'agriculture. Dans l'antiquité l'essor de la géométrie a permis les premières descriptions réalistes du système solaire. Et depuis le XVIIe siècle, avec Galilée et l'apparition de la lunette astronomique, les outils d'observation ont permis à l'Homme d'élargir constamment sa compréhension de l'Univers dont les dimensions se sont considérablement accrues au XXe siècle.

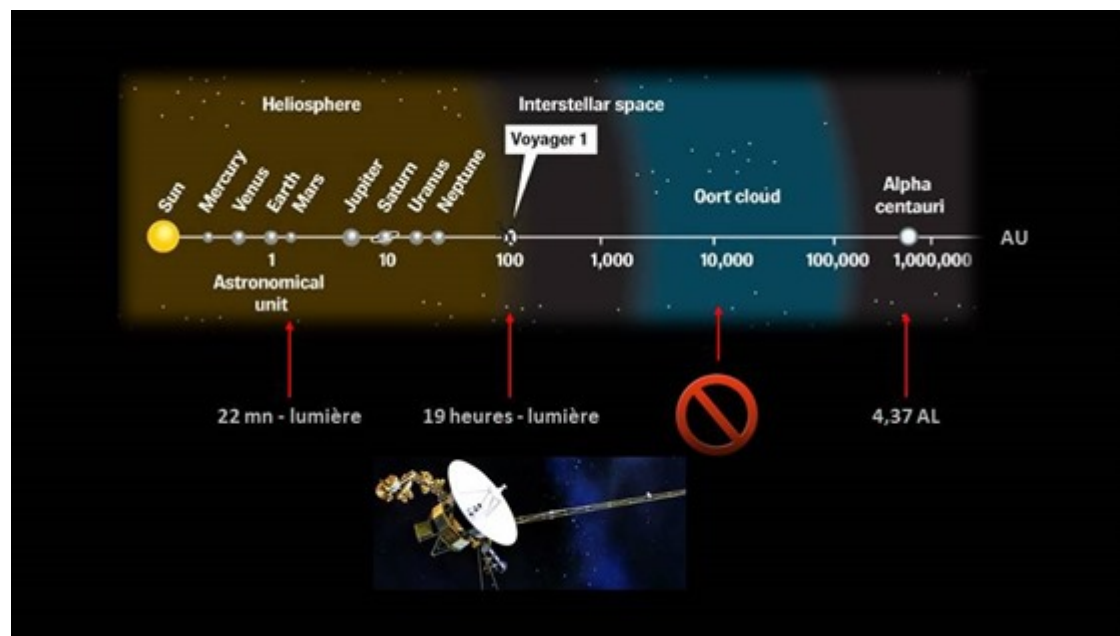
Nous disposons aujourd'hui, dans la pratique, de quatre grandes catégories d'outils qui vont du plus près au plus loin pour explorer l'Univers

L'Homme a toujours voulu comprendre comme l'Univers était structuré et partir à sa découverte. Mais l'Univers est immense ! Nous disposons, dans la pratique, de quatre grandes catégories d'outils qui vont du plus près au plus loin pour explorer l'Univers.

Les **vols habités** nous mènent habituellement en orbite basse terrestre, comme dans la station spatiale ISS où Thomas Pesquet a séjourné six mois. L'Homme est allé sur la Lune ou autour d'elle dix fois entre 1968 et 1972, à 384 400 km. Nous ambitionnons d'aller sur Mars, ce qui est une sacrée paire de manche car c'est très loin – plus de 7 mois de voyage – et très coûteux – plus de 100 milliards de dollars – pour s'y rendre avec un équipage humain. La distance entre Mars et la Terre ? Elle va de 55 à 400 millions de km selon la position orbitale des deux planètes. Et au-delà ? A ce jour, rien n'est prévu car rien n'est possible au vu de nos connaissances et des technologies de propulsion que nous maîtrisons. Les vols habités sont donc contraints à un petit bout du système solaire qui n'est qu'une particule de poussière à l'échelle de la Voie Lactée comme de l'Univers.

Les **sondes spatiales** nous ont permis d'explorer le système solaire et son proche voisinage. Les sondes Voyager 1 et 2 sont celles qui sont allées le plus loin (*schéma ci-dessous*). Nous avons plein de sondes et de robots sur Mars. Il y en a autour de Jupiter ou Saturne. D'autres observent le Soleil de manière continue. Mais aucun objet d'origine humaine n'est pour l'instant véritablement sorti du système solaire. Lancé en 1977, Voyager 1, est tout juste en train de sortir de l'héliosphère. Il a parcouru 100 fois la distance Terre-Soleil, soient 15 milliards de km. Dans plus de 500 ans, il arrivera dans le nuage d'Oort, une zone périphérique du système

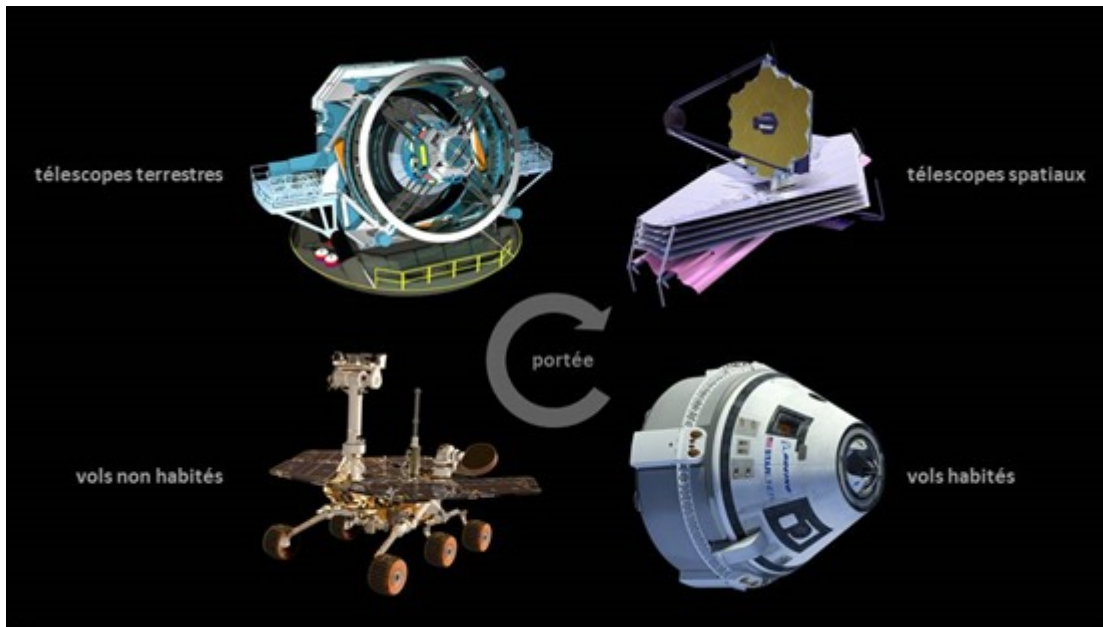
solaire qui contient des blocs de glace étant à l'origine de la création de comètes. Voyager 1 sortira véritablement du système solaire d'ici environ 20 000 ans. S'il allait dans sa direction, ce qui ne me semble pas être le cas, Voyager 1 atteindrait l'étoile la plus proche, Proxima du Centaure, d'ici 80 000 longues années. Cette étoile qui est à 41 000 milliards de kilomètres du Soleil. La source d'énergie principale de Voyager est une pile au plutonium qui sera épuisée à partir de 2025. A partir de ce moment-là, les sondes Voyager ne nous enverront plus d'informations tout en poursuivant inlassablement leur chemin.



Les meilleurs espoirs en termes de vitesse avec des techniques non encore éprouvées comme la propulsion par antimatière nous permettraient d'atteindre 1/10 de la vitesse de la lumière. Donc, le voyage vers la première étoile durerait 40 ans. Et bien plus pour la première exoplanète habitable. Ray Kurzweil évoque une solution dans ses ouvrages : envoyer plein de sondes dans toutes les directions pour explorer la Voie Lactée. Mais il oublie l'écueil de la source d'énergie. Sachant qu'entre les étoiles, il est difficile de recueillir de l'énergie ambiante.

Les **télescopes terrestres** permettent d'explorer une bonne part de l'Univers. Leur portée est bien plus grande que les deux précédents outils puisqu'elle s'évalue en milliards d'années lumières. Ils fonctionnent dans le visible ainsi que dans les ondes radio, les autres longueurs d'onde étant filtrées par l'atmosphère terrestre. Il existe de nombreuses sortes de radio-télescopes, à une ou plusieurs antennes, paraboliques ou non. Plusieurs posts sont consacrés à ces différentes catégories de télescopes dans cette série.

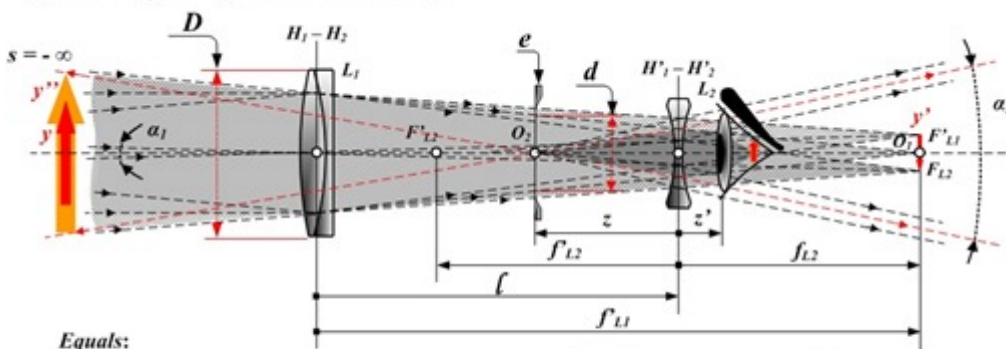
Les **télescopes spatiaux** permettent d'aller encore plus loin en s'affranchissant de l'impact de l'atmosphère et de remonter encore plus dans le temps de l'histoire de l'Univers. On dépasse les 13 milliards d'années lumière en distance perçue. Dans la pratique, l'astronomie, la science des astres, n'est pratiquement expérimentable qu'avec des télescopes. Nous n'avons pas d'autres moyens à disposition pour observer les étoiles et les galaxies. Nous exploitons tout le spectre électromagnétique pour tirer un maximum d'informations sur les étoiles et galaxies. Nous verrons que celui-ci a beaucoup de ressources à nous apporter.



L'histoire des télescopes terrestres

L'histoire du télescope remonte aux débuts du XVII^e siècle avec une série rapprochée d'inventions. Le principe de la lunette télescopique est d'abord inventé en 1608 aux Pays Bas par Hans Lippershey, Zacharias Janssen, et Jacob Metius. Il est ensuite perfectionné en 1609 par Galilée qui crée la première lunette d'observation télescopique, à base de lentille convexe pour l'objectif et concave pour le viseur. La lunette utilise le principe de la réfraction optique, perfectionné au XVI^e siècle. Galilée crée plusieurs lunettes dont le grossissement passe progressivement de 3 à 30.

Optical diagram of Galilean telescope



Equals:

- (1) Telescope magnification : $M = f_{L1} / f_{L2} = D / d = \text{tg } \alpha_2 / \text{tg } \alpha_1 = l / e$; (2) Exit pupil diameter : $d = D / M$
 (3) Virtual exit pupil distance of the L_2 : $z = l / M$; (4) Distance between lenses : $l = f_{L1} + (-f_{L2})$

Note : y - Distant object ; y' - Real image from objective ; y'' - Magnified virtual image from eyepiece
 D - Entrance pupil diameter ; d - Virtual exit pupil diameter ; $L1$ - Objective lens ; $L2$ - Eyepiece lens
 α_1 - Real field of view ; α_2 - Apparent field of view

Galilée utilise ses lunettes pour observer l'espace et découvrir les phases de Vénus. Cela lui permet de confirmer les théories héliocentriques. Il découvre aussi quatre satellites de Jupiter. Ceux-ci amenèrent le danois Otto Reimer à déterminer la vitesse de la lumière en 1674 comme nous l'avons vu dans la partie précédente. Le télescope est amélioré peu après en 1611 par Kepler qui utilise un objectif convexe pour le viseur, donnant un résultat plus précis, notamment lors des changements de focale. En effet, le système de viseur concave de Galilée pose un tas de problèmes de focalisation selon l'allongement de la lunette [source : Galileo, the Telescope and the Science of Optics in the Sixteenth Century].

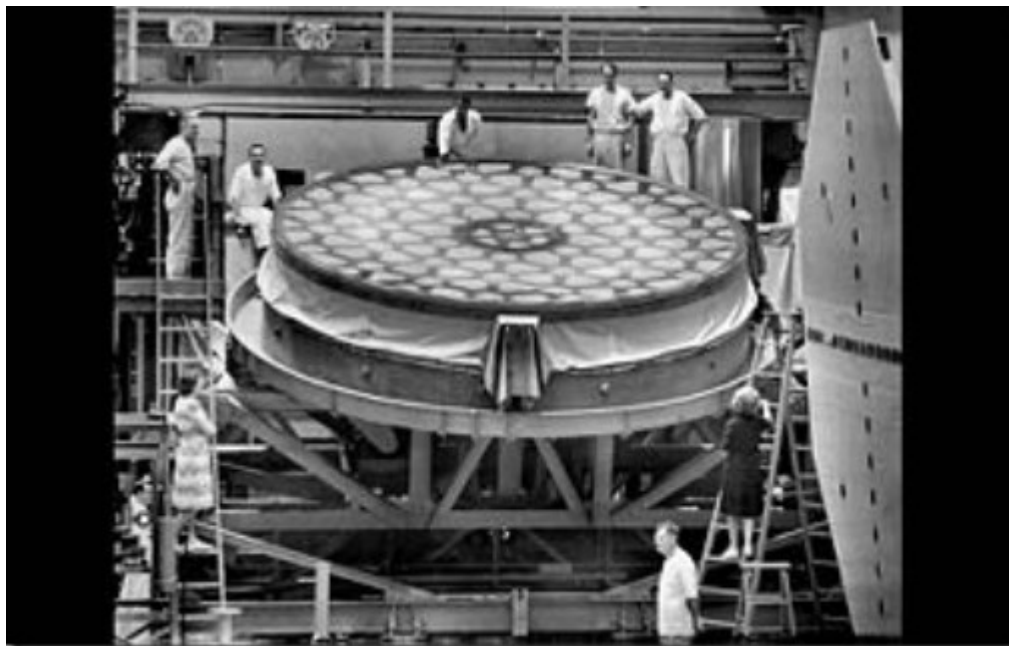
Les télescopes à réfraction furent en œuvre jusqu'à la fin du 19^e, culminant en 1888 avec le lancement du

télescope de l'observatoire de Lick situé en montagne en Californie et doté d'une optique de 92 centimètres de diamètre (*ci-dessous*). Il permit la détection d'astéroïdes, de comètes, des structures de la Voie Lactée et du déplacement des étoiles. C'est en 1839 que fut produite la première photographie prise avec un télescope, celle de la Lune, par François Arago. La photographie argentique fut un progrès clé vis à vis de la vision humaine, notamment en permettant des temps de pose longs.



La seconde grande génération de télescopes utilisa des miroirs au lieu de lentilles, permettant de s'affranchir des défauts inhérents à la diffraction de la lumière, comme l'aberration chromatique, et d'augmenter leur sensibilité tout comme la portée. Le premier de ces télescopes est créé par Newton en 1668 avec un miroir de 33 mm de diamètre. Plus tard, le Léviathan de Parsonstown en 1842, doté d'un miroir de 1,83 m de diamètre, permit la découverte des lunes de Neptune et Uranus. Pendant la seconde moitié du 19^e siècle, les miroirs furent construits avec un revêtement en argent permettant de perdre moins de lumière. En 1896 fut construit un télescope de ce type, toujours à l'observatoire de Lick, et avec un miroir principal de la même taille. Son guidage manuel permettant de suivre les déplacements de la voûte céleste au gré de la rotation de la terre sur elle-même et autour du soleil et rendit possible la prise de clichés photographiques (argentiques, évidemment) avec des poses de plusieurs heures. Ce télescope permit la découverte de l'immensité de notre galaxie et d'autres galaxies.

La taille des télescopes de ce genre continua d'augmenter au 20^e siècle avec les télescopes de 1,5 m et 2,5 m du Mont Wilson (Californie) en 1908 et 1917 qui permirent à Edwin Hubble de détecter l'éloignement des galaxies en fonction de leur distance et, par conséquent, l'expansion de l'Univers. Un record de taille fut atteint avec le télescope Hale du Mont Palomar de 1949 et son miroir de 5 mètres pesant 14,5 tonnes (*ci-dessous*), également en Californie. Ces miroirs sont très difficiles à polir, pèsent très lourds et sont peu maniables dans les télescopes. Les scientifiques ont arrêté de construire ce genre de télescope pendant les années 1990 où d'autres types de télescopes se sont imposés, utilisant des assemblages de miroirs plus petits, légers et mobiles. Nous les explorerons dans la partie suivante de cette série.



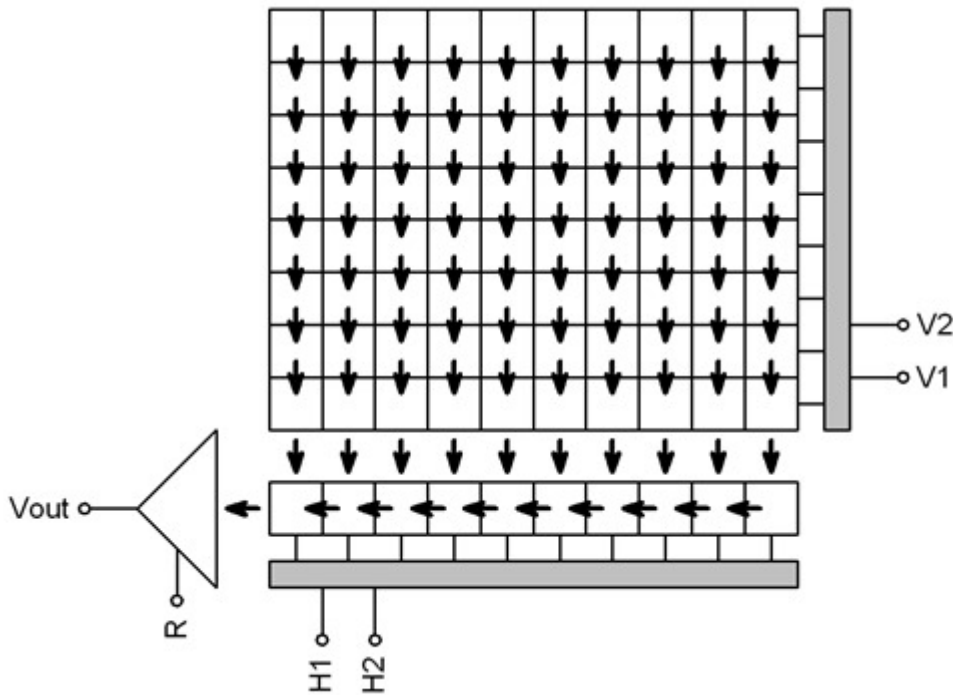
Les capteurs photo, du CCD au CMOS

L'une des révolutions clés des télescopes est celle de la captation numérique des images grâce aux capteurs CCD. Le CCD fut inventé en 1969 par les américains William Boyle et Georges Smith, des Bell Labs, qui obtinrent pour cela le prix Nobel de physique en 2009. 40 ans plus tard, donc, il faut savoir être patient ! Les mathématiciens sont plus chanceux puisque la médaille Fields est décernée à des lauréats de moins de 40 ans !

L'invention du CCD fut ensuite brevetée par Michael Thompsett, également des Bell Labs, et mise en œuvre pour la première fois en 1971 dans un capteur CCD faisant une rangée de 96 pixels. La première image de télescope obtenue avec un capteur CCD a été générée en 1975.

L'usage de capteurs CCD se généralisa dans les télescopes au début des années 1980. Ils améliorèrent d'un facteur 10 la captation de lumière des télescopes. A savoir qu'un télescope de 30 cm équipé d'un capteur CCD équivaut à un télescope de 3 m captant les images en argentique. Mais il fallut attendre les années 1990 pour que leur résolution devienne convenable.

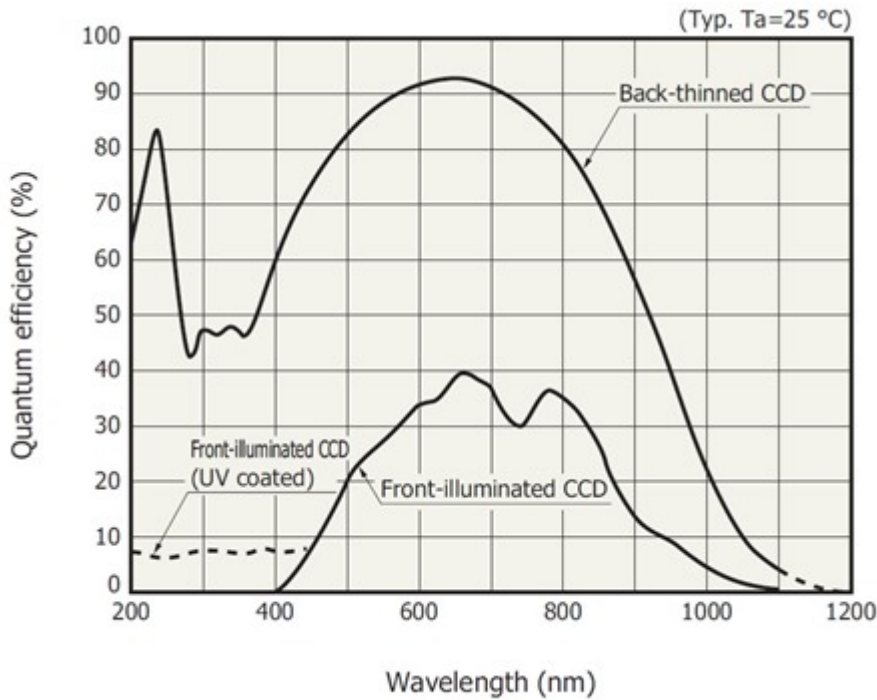
Les capteurs CCD sont à base de technologies au silicium, comme les capteurs CMOS qui ont été inventés plus tard, mais réutilisant la technologie CMOS exploitée dans la fabrication de microprocesseurs depuis les années 1970. Les CCD utilisent l'effet photoélectrique pour convertir les photons reçus en électrons qui sont captés dans des photosites sous forme de potentiel électrique dans des sortes de micro-capacités. Chaque pixel est capable d'accumuler des charges électriques correspondant aux photons reçus, ce qui permet des temps de pose assez longs. C'est lié à leur grande efficacité quantique, à savoir que le ratio d'électrons captés par photons reçus dans chaque photosite du capteur. Les films argentiques ont une efficacité quantique inférieure à 5%. Les capteurs CMOS du marché sont aux alentours de 30/40% et les capteurs CCD de l'astronomie atteignent 80%. L'image captée par les CCD est lue ligne par ligne de pixel et de manière analogique. C'est seulement en sortie de capteur que la tension captée est converti en valeur numérique pour être ensuite stockée puis traitée sur ordinateurs. Avant ces capteurs, les télescopes terrestres et les premières sondes spatiales utilisaient des tubes à vide comme dans les premières caméras de télévision !



Les CCD présentent l'intérêt de fonctionner de manière linéaire. A savoir que la tension qu'ils génèrent pour chaque pixel est proportionnelle au nombre de photons reçus. Ce qui n'est pas le cas des films argentiques utilisés auparavant. Leurs inconvénients sont divers : une charge élevée peut baver sur les photosites voisins, générant un effet d'illumination d'une zone surexposée sur son voisinage. Leur électronique est complexe et ils consomment beaucoup d'énergie.

Les capteurs CCD ne fonctionnent que dans la lumière visible ou dans le proche ultra-violet et le proche infrarouge. Pour les longueurs d'onde plus courte dans l'UV, le silicium devient réfléchissant. Dans les longueurs d'onde plus longues, dans l'infrarouge, le potentiel électrique est insuffisant pour être détecté.

Ces capteurs ont été ensuite améliorés avec des micro-lentilles, faisant converger les rayons lumineux à diverses incidences vers la zone de captation de chaque pixel. Ces microlentilles permettent d'utiliser des ouvertures et focales variables. Cette technique est généralisée dans les capteurs CMOS utilisés aujourd'hui dans les applications grand public.

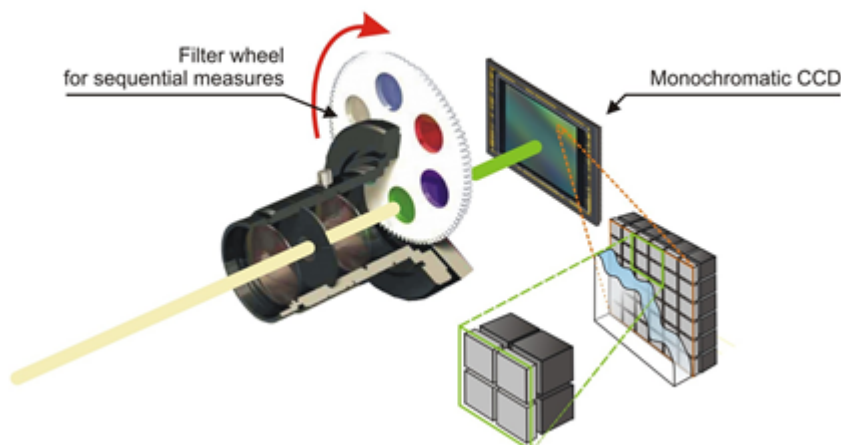


Les capteurs CCD sont aussi passés au rétro-éclairage, avec une électronique analogique de récupération du signal située derrière le composant au lieu d'être du côté de la réception de la lumière. C'est une technique courante en photo grand public avec les capteurs CMOS-BSI que l'on trouve notamment chez Sony. Avec le rétroéclairage, l'efficacité quantique s'approche des 100%. Aujourd'hui, la grande majorité des CCD utilisée en astronomie est rétro-éclairée.

Les capteurs CCD génèrent un bruit de fond provenant du bruit thermique et des rayons cosmiques. Celui-ci est supprimé partiellement en prenant des photos avec l'obturateur fermé. Le résultat est soustrait des photos réalisées avec l'obturateur ouvert, pour supprimer ce bruit de fond qui est en général plutôt stable.

Du côté de la couleur, les capteurs CCD et CMOS du marché de la photo et de la vidéo utilisent généralement des matrices de Bayer avec des filtres rouge, vert et bleu, avec deux fois plus de filtres verts que rouge et bleu. L'électronique des appareils réalise ensuite un dématriçage qui recalcule par interpolation la valeur du rouge, du vert et du bleu pour chaque photosite du capteur qui n'a dans la pratique capté que la valeur d'une des trois couleurs primaires. Les filtres de Bayer ne sont pas utilisés dans les capteurs CCD de télescopes. La technique des filtres monochromes est préférée. Ceux-ci sont arrangés sur une roue qui place le bon filtre devant le capteur à tour de rôle. On peut aussi utiliser des filtres infrarouges ou UV, les capteurs CCD y étant sensibles. Ces filtres et leur mécanique sont évidemment embarrassants et faiblement miniaturisés.

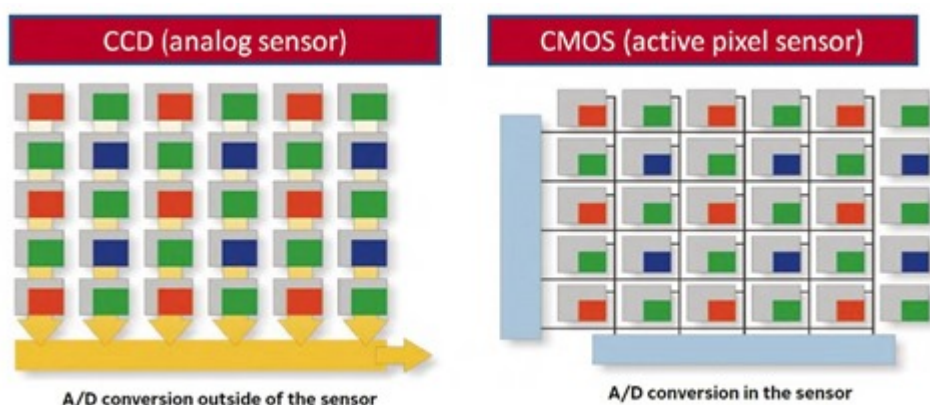
roues à filtres de couleur pour capteurs CCD



Cette technique permet de ne pas perdre en résolution et en sensibilité. Elle est aussi adaptée à un sujet qui ne bouge pas ! Mais les étoiles bougent dans le ciel ! Les télescopes utilisent donc divers systèmes de guidage automatiques qui servent à suivre le mouvement des étoiles dans la voûte céleste, au gré de la rotation de la Terre sur elle-même et de celle-ci autour du Soleil. Ils s'appuient généralement sur un second capteur CCD – associés éventuellement à une optique à champ large – qui détecte le mouvement des étoiles pendant la prise de vue et déplace le télescope au fur et à mesure.

Les télescopes ne génèrent pas que de l'imagerie traditionnelle. On les utilise aussi pour analyser le spectre lumineux émis par les étoiles et les galaxies, via la technique de la spectrographie, qui via un prisme, décompose une onde lumineuse dans ses composantes en fréquences (couleurs). L'interférométrie est également utilisée, pour améliorer la résolution des images reçues en exploitant plusieurs miroirs. Dans tous ces cas-là, la captation se fait toujours avec des CCD.

Les capteurs CCD du marché proviennent de différentes sources comme **On Semiconductor** qui a fait l'acquisition du business des capteurs de Kodak en 2014, l'Anglais E2V, anciennement Marconi CCD, Dalsa qui fait partie du groupe américain Teledyne depuis 2010, **Sharp**, Fairchild Imaging, Sony et Oxford Instruments qui a fait l'acquisition en 2014 de l'Irlandais **Andor**.



Les capteurs photos et vidéo CMOS sont une retombée étonnante des industries spatiales. Ils sont inventés par l'Américain Eric R. Fossum en 1995 qui travaillait jusqu'à présent sur les capteurs CCD embarqués dans les satellites et sondes spatiales au JPL de la NASA. Voulant alléger les capteurs CCD qui étaient bien trop lourds et consommateurs d'énergie, il invente donc les capteurs CMOS qui s'appuient notamment sur un système de lecture des pixels plus rapide et efficace [sources : **Camera-on-a-Chip: Technology Transfer From Saturn**

to Your Cell Phone par Eric R. Fossum et **Digital Camera System on a Chip** (1998) du même auteur]. Il créa la société fabless Photobit Corporation pour commercialiser son invention. Elle est acquise par l'américain Micron en 2001. Les entreprises américaines appréciaient la technologie CMOS car elle réexploitait des lignes de production de mémoires et processeurs CMOS, tandis que la production de CCD était le domaine de sociétés asiatiques et européennes. Mais les asiatiques ont depuis largement repris le contrôle de cette industrie (Omnivision, Sony, Samsung, ...).

L'histoire du CMOS est plutôt ironique. L'invention visait à perfectionner le CCD pour se débarrasser de certaines de ses limitations dans les sondes spatiales, notamment au niveau poids et consommation électrique. Mais les télescopes terrestres et spatiaux actuels continuent de s'appuyer sur des capteurs CCD, grâce à leurs forces et malgré leurs nombreuses faiblesses que n'ont pas les capteurs CMOS. Ils présentent toujours une sensibilité meilleure que celle des capteurs CMOS.

CCD vs CMOS

CCD

moins de bruit
plus grande sensibilité
meilleure uniformité
meilleure dynamique

complexité électronique
effets de bords
vitesse d'acquisition d'images
consommation électrique
coût

CMOS

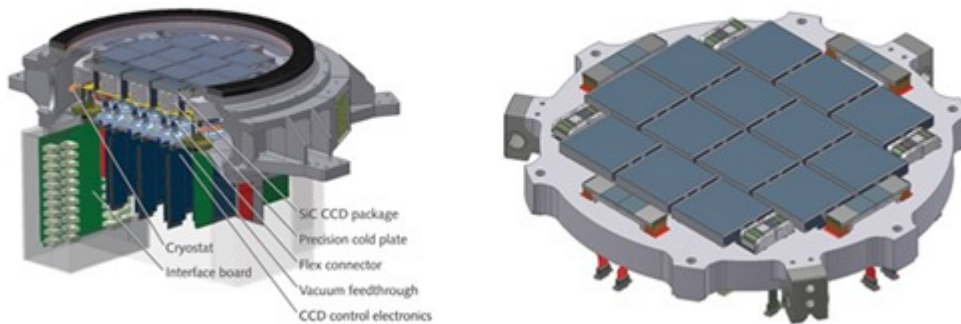
facile à fabriquer
faible consommation
miniaturisation
vitesse d'acquisition d'images
faible coûts
pas d'effets de bord

sensibilité moins grande

De leur côté, les CMOS ont démocratisé la captation vidéo et photo dans le grand public. C'est la technologie dominante intégrée dans tous les appareils photos, caméras et smartphones grand public d'aujourd'hui. C'est même le cas pour les caméras vidéo professionnelles, jusqu'aux caméras 4K haut de gamme Sony et autres RED et Arri qui servent aux tournages dans le cinéma et pour les séries TV. Des capteurs CMOS sont cependant utilisés dans les télescopes amateurs à défaut de l'être dans les grands télescopes ou télescopes spatiaux. Ils le sont aussi dans les caméras embarquées dans des robots d'exploration tels que Curiosity.

JPAS CryoCam

Javalambre Physics of the accelerating universe **Astronomical Survey**
 programme de cartographie des galaxies pour détecter l'énergie sombre de l'univers
 s'appuie sur le télescope T250 de 2,5 m construit en Espagne
 utilise 56 filtres infrarouges pour l'analyse du red-shift des galaxies

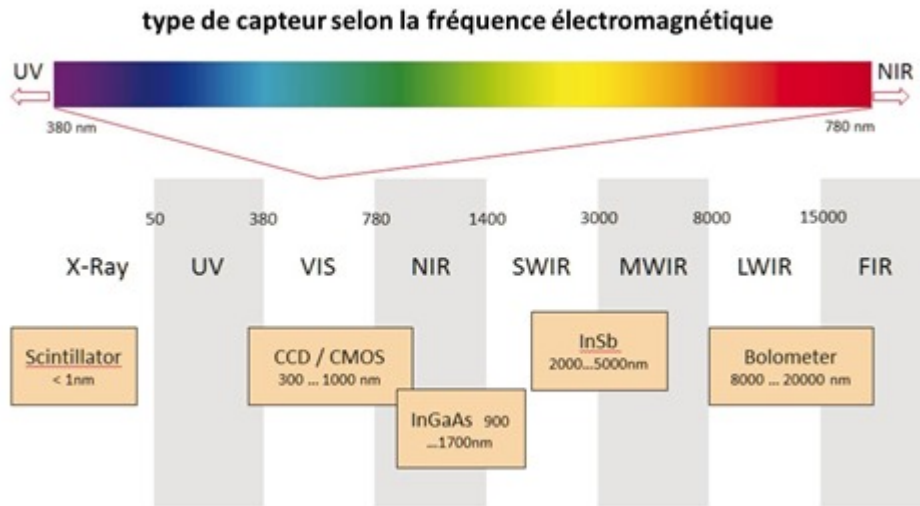


caméra infrarouge à 14 capteurs CCD E2V CCD290-99
 9216 X 9232 pixels de 10 μm et 92 X 92 mm

L'un des des plus gros capteurs CCD du marché est le **E2V CCD290-99** avec ses 9216 X 9232 pixels de 10 μm étalés sur une surface de 92 X 92 mm. Il est notamment utilisé dans le télescope espagnol du **J-PAS** (Javalambre Physics-of-the-Accelerating-Universe Astrophysical Survey) qui comprend un "focal plane array", une matrice de 14 de ces capteurs CCD faisant un total de 1,2 Gpixels (*ci-dessus*). Ce système est complété d'un sélecteur de 56 filtres différents dans le proche infrarouge. Au lieu de la trichromie dans le visible, nous avons donc de la 56-chromie dans l'infrarouge. Ce télescope sert à faire de la photométrie pour analyser le décalage vers le rouge de millions de galaxies pour comprendre la structure volumétrique de l'Univers et de son expansion. Le télescope est modeste, avec un miroir de 2,55 m. Les capteurs sont réfrigérés pour améliorer leur sensibilité.

Pour en savoir plus sur les CCD utilisés en astronomie et en particulier sur les contributions françaises du domaine, je vous recommande la présentation **Imagerie CCD en astronomie** d'Olivier Boulade du Service d'Astrophysique du CEA/DAPNIA. Elle date de 2007 mais reste d'actualité. Surtout dans la mesure où la grande majorité des capteurs CCD utilisés dans les télescopes terrestres et spatiaux ont été conçus bien avant cette date !

Les capteurs CCD et CMOS ne sont pas les seuls utilisés dans les observations astronomiques. Des capteurs utilisant des semiconducteurs différents du silicium (Gallium, Indium) sont utilisés pour l'infrarouge moyen. Ce sont des IRFPA (Infrared Focal Plane Array) fabriqués sur un substrat photosensible à base de tellure de mercure-cadmium.



Enfin, les bolomètres sont des instruments de mesure utilisés dans les radio-télescopes à antenne paraboliques pour capter les ondes radios. Nous aurons l'occasion de nous pencher dessus dans un autre épisode.

Dans l'épisode suivant, nous ferons un tour des technologies mises en œuvre dans les télescopes terrestres les plus récents : optiques actives et adaptatives, guidage et calibrage laser, interférométrie, spectrographie, etc. Le tout accompagné d'un tour du monde des plus grands télescopes terrestres jamais construits. Avant de découvrir ensuite ceux que l'on envoie dans l'espace et qui sont tout aussi fascinants.

Voici les pointeurs sur les douze épisodes de cette série dans leur ordre de parution :

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : l'Univers

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes terrestres

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : grands télescopes

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes géants

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : radiotélescopes

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : interféromètres

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux dans le visible

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux dans l'infrarouge

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux dans les rayons gamma, X et UV et ondes radio

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : les exoplanètes

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : entrepreneurs

Cet article a été publié le 20 juin 2017 et édité en PDF le 22 décembre 2021.

(cc) Olivier Ezratty – “Opinions Libres” – <https://www.oezratty.net>