

Instruments du futur : les enjeux

Cécile Ferrari, Professeure à l'Université Paris Diderot

De son vaisseau Terre, l'humanité scrute désormais l'Univers dans tous les domaines de longueurs d'onde. Le rayonnement thermique des corps les plus chauds aux plus froids de l'Univers inonde en effet tout le spectre électromagnétique. Outre les photons, de nombreux noyaux d'atomes interagissent avec l'atmosphère terrestre et son champ magnétique sans compter tous les processus d'accélération de particules et de réactions nucléaires qui complètent l'émission du ciel.

L'atmosphère terrestre agit comme un filtre. Ses molécules absorbent les photons dans de larges gammes d'énergie et rendent l'Univers pour bonne partie invisible du sol. Les fenêtres ouvertes vers le ciel depuis la surface terrestre laissent passer les photons du domaine visible, du domaine infrarouge moyen et du domaine des longueurs d'ondes radio. Les molécules dioxygène O_2 et d'ozone O_3 absorbent essentiellement les rayonnements X et ultraviolet alors que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge au-delà de $1 \mu m$, laissant quelques fenêtres ouvertes jusqu'à $20 \mu m$. Le dioxyde de carbone CO_2 et le méthane CH_4 absorbent aussi une partie du rayonnement infrarouge venu du ciel. La vapeur d'eau redevient transparente au rayonnement dans le domaine millimétrique et la fenêtre radio est grande ouverte au-delà d' 1 cm de longueur d'onde.

La conquête du ciel "invisible" n'a donc pu se faire qu'en envoyant des satellites en orbite, dédiés à l'observation des différents rayonnements. Elle a été progressive depuis le début des années 1970 et a pris son véritable essor dans les années 1980 avec les satellites pionniers :

- Cos-B (1975-1982), réalisé par l'Agence Spatiale Européenne, dédié à la détection des sources dans le domaine du rayonnement gamma autour du GeV ;
- Sigma (1989-1994), lancé par l'URSS, pour observer l'Univers dans le domaine des rayons X et gamma (entre 1 keV et 1 MeV environ) ;
- IRAS (lancé par la NASA en 1983) pour découvrir le ciel infrarouge entre 10 et $100 \mu m$.

Ces télescopes-satellites ont leur descendance : le télescope Fermi (NASA-2007) scrute actuellement le ciel dans le domaine des rayonnements gammas, XMM et Chandra (NASA) travaillent de concert dans le domaine des rayons X. À la suite des satellites IRAS et ISO, les télescopes Spitzer et Herschell scrutent l'Univers en infrarouge avec des sensibilités et résolutions spectrales toujours accrues.

Les enjeux de développement des instruments du futur sont extrêmement divers suivant les domaines de longueurs d'onde. Ils tiennent tout autant à la méthode de détection des photons incriminés qu'à leur collecte par un télescope adapté. Chaque domaine mériterait d'être développé. Les enjeux de l'évolution des télescopes dans le domaine visible sont présentés ici.

La résolution spatiale d'un télescope

Le télescope d'un satellite ou d'un observatoire au sol focalise la lumière vers les détecteurs aptes à capter la longueur d'onde d'observation. La sensibilité de l'équipement dans son ensemble dépend évidemment de la sensibilité des détecteurs embarqués et de la capacité du télescope à transmettre toute l'énergie qu'il reçoit. Cependant un des paramètres essentiels reste la taille de la surface collectrice, c.-à-d. celle du miroir principal, puisque l'énergie provenant du ciel et interceptée par le télescope est proportionnelle à cette surface. Plus il sera grand, plus de photons seront détectés.

Longueur d'onde et énergie.

L'énergie d'un photon est égale à $E = h \nu$ où h est la constante de Planck et ν la fréquence du photon. Fréquence et longueur d'onde sont liées par la relation $\lambda = c/\nu$. L'énergie d'un photon dans le domaine des rayons X et gamma est usuellement exprimé en eV plutôt qu'en Joule, sachant que $1 \text{ J} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ eV}$.

L'avantage d'une grande surface collectrice pour un télescope est aussi d'accroître sa capacité à distinguer des objets proches l'un de l'autre, autrement dit sa résolution spatiale. En effet, le miroir circulaire ne capte qu'une portion circulaire de l'image du ciel. Le miroir se comporte comme une pupille diffractante et l'image d'une étoile ponctuelle est une tache, appelée tache d'Airy (figure 1).

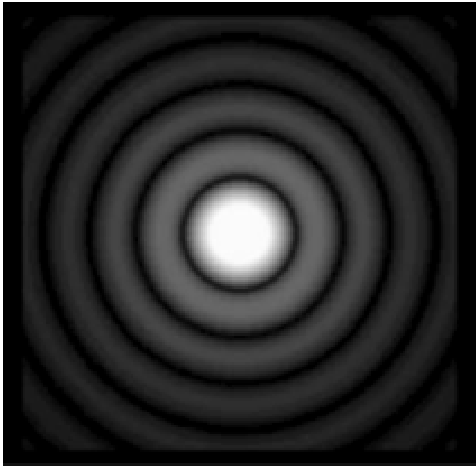


Fig. 1 Tache d'Airy d'une source ponctuelle diffractée dans le plan focal d'un télescope. On distingue les cinq premiers anneaux. Deux sources sont résolues quand le maximum de la tache de diffraction de la 2^e tombe au plus près à la distance du premier minimum sombre.

On y distingue au centre un maximum d'intensité et des anneaux concentriques séparés de zones sombres. Le premier anneau sombre est à la distance angulaire $a_0 = 1,22 \lambda/D$ où D est le diamètre du télescope et λ la longueur d'onde d'observation. Deux étoiles proches dans le ciel seront séparées si le maximum de la tache d'Airy de l'une tombe au mieux sur le premier anneau sombre de la tache de l'autre. On définit ainsi a_0 comme la résolution spatiale d'un télescope. La résolution spatiale d'un télescope de 8 m de diamètre dans le proche infrarouge, à $\lambda = 1,65 \mu\text{m}$, est $a_0 = 0,05''$ (" désigne la seconde d'arc qui peut aussi s'abréger en as). Dans l'infrarouge moyen à $\lambda = 10 \mu\text{m}$, $a_0 = 0,3''$ (ou 0,3as) c.-à-d. la Tour Eiffel vue de la Lune.

La formule $1,22 \lambda/D$ montre bien que, plus grand est le diamètre, meilleure est la résolution.

Optiques adaptative et active

La température de l'atmosphère terrestre change en fonction de l'altitude et ceci provoque un trouble dans les images des objets du ciel : c'est le phénomène de turbulence atmosphérique. L'atmosphère peut être modélisée comme la superposition de couches transparentes d'indice de réfraction variable, chacune modifiant le chemin d'un rayon lumineux de manière aléatoire, suivant la loi à l'interface $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$.

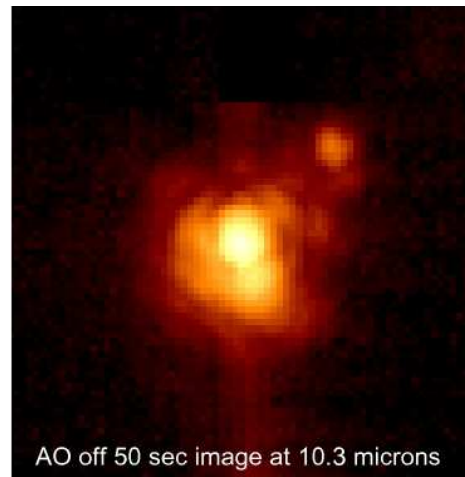


Fig. 2 Images d'une étoile observée en infrarouge, à $10,3 \mu\text{m}$ de longueur d'onde par le télescope MMT de l'Université d'Arizona, d'un diamètre de 6,5 m, situé au sommet du Mont Hopkins. L'image a été acquise sans le système d'optique adaptative. (Crédit MMT-University of Arizona and Smithsonian Institution)

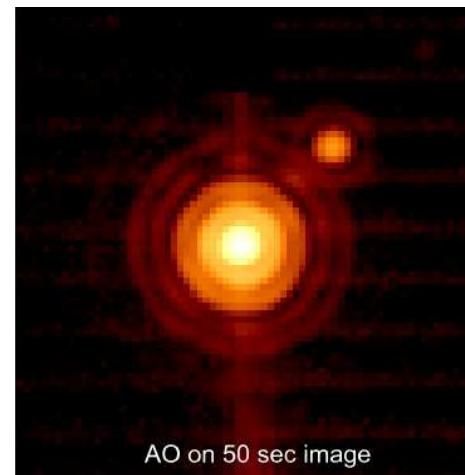


Fig. 3 Image de la même étoile, prise avec le même télescope, corrigée de la turbulence atmosphérique grâce au système d'optique adaptative. (Crédit MMT-University of Arizona and Smithsonian Institution)

La tache de l'objet sur le détecteur sera alors diffuse et très étalée, de l'ordre d'une seconde d'arc dans le domaine visible ("le seeing"), quelle que soit la taille du télescope (figure 2). Il arrive que le "seeing" soit suffisamment faible pour que la tache d'Airy à elle seule limite la résolution.

En observant en même temps la cible d'observation et un objet ponctuel proche d'elle, on peut mesurer en direct sur l'objet l'effet des turbulences dans l'image. On peut donc déterminer en quelques centièmes de secondes la nature de la déformation induite par la turbulence et corriger le chemin lumineux des rayons entre le miroir primaire et le détecteur pour reconcentrer le flux lumineux de l'objet en un point. Ceci se fait en déformant à bon escient le miroir

secondaire du télescope. De tels systèmes, dits "d'optique adaptative", ont été mis au point dans les années 1990 et sont maintenant installés sur les plus gros télescopes du monde. (figure 3).

Pour que les miroirs conservent une certaine rigidité malgré une taille grandissante, ils devraient avoir une épaisseur importante. Il serait alors difficile de les manoeuvrer. Les miroirs sont donc désormais soit segmentés en miroirs plus petits, soit très fins et souples, soit alvéolés pour les alléger, mais toujours en verre. Ils sont équipés d'un système d'optique active qui permet de contrôler la qualité de leur surface (leur écart à la forme parabolique idéale) toutes les 10 secondes environ. Des pistons actionnés par ordinateur permettent de maintenir la surface du miroir primaire contre toute déformation mécanique et thermique, c'est ce que l'on appelle "l'optique active".

Repousser les limites de résolution spatiale

Peut-on construire des instruments toujours plus grands pour faire des images toujours plus précises des objets les moins lumineux ? Les projets de grands télescopes au sol tels l'ELT (voir article d'E.

Pantin) vont être confrontés à une mise en œuvre mécanique difficile. De tels engins pesants doivent être stables dans leur pointage et facilement maniables pour balayer une zone du ciel avec précision. Le gain obtenu en sensibilité et en résolution par augmentation de la taille ne doit pas être sacrifié. Ceci reste un challenge à l'heure actuelle.

L'autre solution, utilisée désormais dans les domaines radio, submillimétrique, infrarouge et visible est l'imagerie à synthèse d'ouverture. Ryle et Hewish ont obtenu le prix Nobel en 1974 pour l'avoir mis au point dans le domaine des longueurs d'onde radio. Les images de télescopes de diamètre D , disséminés sur un vaste périmètre, appelée "pupille" dont on notera le diamètre B , sont recombinaisonnées et interfèrent, telles les lumières de différentes sources. La résolution spatiale du télescope équivalent est celle d'un télescope de la taille de la pupille, donc de l'ordre de λ/B . Le dispositif AMBER de synthèse d'ouverture des 2 ou 3 télescopes de 8 m du VLT (Very Large Telescope de l'ESO, l'observatoire européen austral) permet d'obtenir une résolution spatiale de l'ordre de 2 milliarcsec (mas) avec une base de $B = 200$ m dans le proche infrarouge.

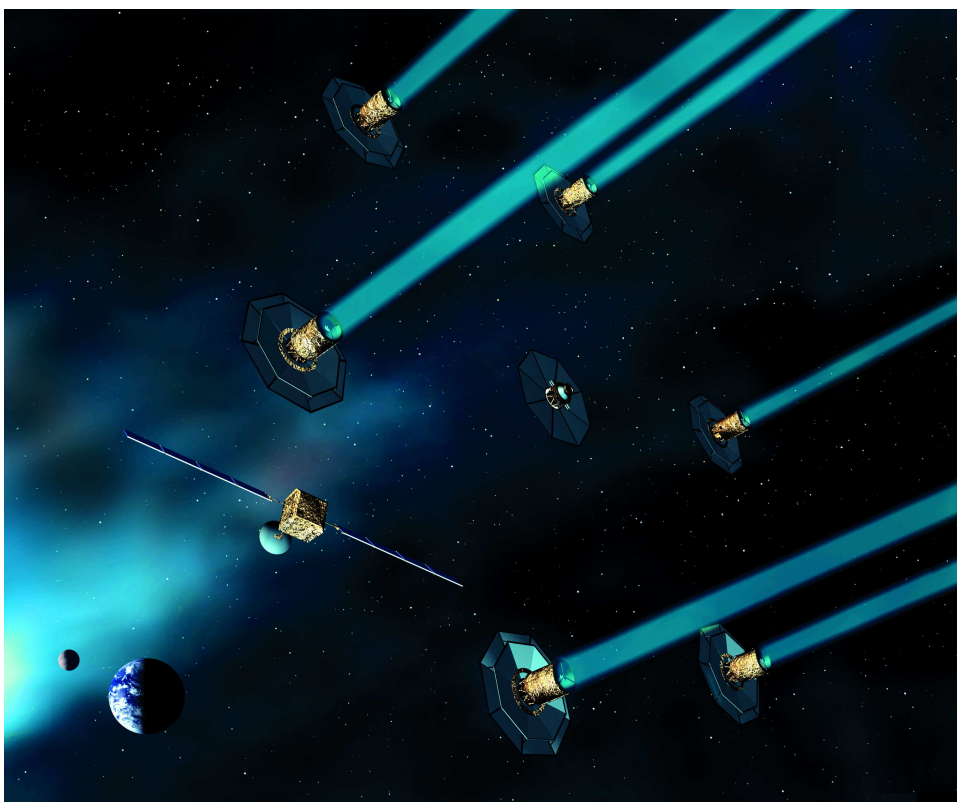


Fig. 3 Le projet Darwin de l'Agence Spatiale Européenne – Six télescopes de 3 ou 4 m de diamètre en formation avec un satellite réalisant la synthèse d'ouverture et un satellite centralisateur en liaison avec la Terre. Les observations se feront dans l'infrarouge moyen pour rechercher des exoplanètes plus facilement, là où le contraste entre le flux de l'étoile et celui de la planète n'est plus que d'un facteur 10^4 à 10^6 .

Des hyper-télescopes en orbite.

La course vers une meilleure résolution et une meilleure sensibilité passe par la taille des télescopes, par l'étendue du champ de télescopes en synthèse d'ouverture (1) ou par la course vers les hauteurs désertiques, là où la couche atmosphérique absorbante et turbulente devient plus sèche et plus fine. L'ultime étape est la mise en orbite de flottilles de télescopes fonctionnant en synthèse d'ouverture. Ce concept, développé au sol pour l'instant, est appelé à être déployé dans l'espace là où le poids et l'atmosphère ne sont plus des contraintes. La difficulté viendra du maintien en formation n de l'ensemble des télescopes à la précision nécessaire.

Les projets TPF (Terrestrial Planet Finder - NASA) et Darwin (ESA), tous deux à la recherche d'exo-planètes de type terrestre s'appuient sur ce concept de vol en formation de plusieurs télescopes de quelques mètres de diamètre, se répartissant sur une zone d'étendue variable, de 10 m à 1000 m pour obtenir des résolutions de 5 à 500 fois supérieure à celle du Télescope Spatial actuel. Le positionnement relatif

des télescopes devra être précis à 10 μm près.

Le concept d'hyper-télescopes développé par A. Labeyrie repose sur la synthèse d'ouverture mais avec une distribution en trois dimensions des miroirs, sur une sphère ou un fond de cratères par exemple. Cette évolution permet d'obtenir une imagerie directe à une résolution de 0,1 mas pour un diamètre de "pupille" d'un kilomètre et d'avoir une luminosité plus importante comparée à la synthèse d'ouverture classique. Avec un tel instrument, une planète de la taille de Jupiter en orbite autour d'une étoile située à 10 années de lumière de nous, soit plus de 650 000 UA, pourrait être résolue (1 UA = distance Terre-Soleil = 8 min-lumière).

L'astrophysique vit depuis trente ans une révolution scientifique grâce aux progrès technologiques dans tous les domaines, de l'aéronautique, de la physique des matériaux jusqu'à l'optique moderne la plus poussée. L'investigation scientifique provoque l'innovation et en bénéficie. La pause n'est pas pour demain.

(1) : procédé d'interférométrie permettant d'obtenir une images à partir d'images du même objet obtenues par plusieurs télescopes. Cette image a la même résolution angulaire que celle qui serait obtenue par un télescope de la taille de l'ensemble.

Mots croisés sur les instruments

Horizontalement

1. Défauts des lentilles simples. 2. Tente. Indispensable sur une lunette comme sur un télescope pour observer.
3. Affreux. 4. Réfracteur. Comme des clichés après une bonne mise au point. 5. Numéro d'Henri. Comme une lunette sans accessoires. Comme le marteau. Marré. 6. Poulie inversée. Dernier élément. Pour avoir des billets. 7. Classement sportif. Il gère plus d'une dizaine de gros télescopes. Dixième. 8. Réflecteurs. 9. Chef religieux. Devrait aider à la répartition des richesses mondiales. Alpha Virginis. 10. C'est la partie essentielle d'un instrument astronomique. Comme un cliché de la Lune avant traitement. 11. A soustraire de l'image brute pour éliminer les pixels chauds. Comme une photo de la Lune après un passage par IRIS ou Registax.

Verticalement

1. À faire avant d'utiliser un télescope. 2. Inutilisable. Partiellement capté par un appareil photo. Rythme. 3. Il filtre, mais ni les UV, ni les IR. Comme le Soleil à l'horizon. 4. Gâche le plaisir. Prince. 5. Indispensable pour une lunette comme pour un télescope. 6. Pas loin (2 mots). Système de reconnaissance pour lunette ou télescope. 7. La plupart des petits télescopes en possèdent un. Certains oculaires à focale variable permettent de le faire. 8. Coule du côté de chez Agnès. Fabriqué dans les supernovae. Pas Mac. 9. Saint musicien. Dieu n'en a pas, d'après Einstein. Double. 10. Aussi bien en station qu'au point pour une bonne photo astro. Exempt de pollution lumineuse. 11. Bout de verre. Il pourrait être représenté par Phobos ou par Déimos. Sent. 12. Il vaut mieux ne pas la régler au maximum sur son APN pour éviter le grain.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1												
2				■								
3		■									■	
4								■				
5			■				■			■		
6		■				■			■			
7				■				■				
8											■	
9					■				■			
10								■				
11				■								