

qui ne risque plus de se rompre sous son propre poids. Mais, paradoxalement, on ne cherche pas à obtenir une forme parfaite ; au contraire, en jouant sur la souplesse du miroir, ces vérins permettent de compenser les déformations de l'image dues aux turbulences atmosphériques. Ce n'est plus de l'optique active, mais de l'optique adaptative, c'est-à-dire que les déformations doivent être appliquées en temps réel pour compenser l'effet des turbulences atmosphériques (le temps de réaction est de l'ordre du dixième de seconde, au plus de la seconde). L'électronique doit être suffisamment rapide pour analyser l'image et calculer les perturbations qu'elle a subies ; une petite partie de la lumière recueillie est déviée à cet effet, et permet de suivre comment évolue cette image. Le logiciel de contrôle évalue comment agir sur les vérins pour restaurer une image stable et de qualité. Grâce à cette technique, des miroirs de plus de six mètres ont été construits dès les années 1990.

Aujourd'hui, des miroirs de plusieurs dizaines de mètres de diamètre sont envisagés. Ces télescopes capteront beaucoup plus de lumière, de sorte que l'on détectera la lumière d'objets très faibles avec une résolution notablement améliorée. Le *Very Large Telescope* européen, VLT, installé au Chili, est constitué de quatre télescopes de 8,20 mètres de diamètre. La résolution des images obtenues par le VLT est meilleure que celle du télescope spatial *Hubble*, qui n'est certes pas soumis aux perturbations atmosphériques, mais dont le miroir mesure seulement 2,40 mètre de diamètre, de sorte que la résolution est plusieurs fois inférieure à celle d'un télescope terrestre. Le VLT est capable de distinguer un détail qui correspondrait à une pièce de un euro vue à 320 kilomètres !

Pour la Science : Ces télescopes détectent-ils seulement la lumière visible ?

Roland Lehoucq : Certains d'entre eux détectent, en plus de la lumière visible, une partie du rayonnement infrarouge qui parvient jusqu'au sol, l'essentiel de ce rayonnement étant piégé par l'atmosphère et le reste réémis vers l'espace. Une grande partie de la lumière infrarouge est absorbée par l'atmosphère terrestre. Mais les rayonnements ultraviolet, visible et infrarouge ne représentent qu'une toute petite partie du spectre électromagnétique. Imaginons que les sept octaves d'un piano représentent le spectre électromagnétique, de l'ultraviolet à l'infrarouge. La lumière visible ne représenterait qu'une seule de ces sept octaves. Cela donne une idée de la pauvreté de l'observation du ciel quand on se contente d'observer dans le visible. C'est pourquoi les astrophysiciens étudient tout le spectre, du rayonnement gamma jusqu'aux ondes radio. Quittant le domaine des ondes électromagnétiques, ils étudient aussi les particules de haute

énergie, détectées au début du XX^e siècle par le physicien allemand Victor Hess. Ces particules sont essentiellement des protons de très haute énergie : quand ils arrivent sur la haute atmosphère, ils interagissent avec les molécules de l'air, et produisent des gerbes de particules secondaires. C'est pour cette raison que les pilotes d'avions qui voyagent à des altitudes élevées sur les vols transatlantiques portent, depuis quelques années, un badge qui enregistre la dose de rayonnement accumulée au fil des vols. On commence à détecter les particules cosmiques de très haute énergie à l'Observa-



L'observation de l'Univers se fait soit de la Terre, par exemple grâce au VLT, qui scrute le ciel en lumière visible (a), à l'Observatoire Auger qui traque les rayons cosmiques de très haute énergie (b), soit de l'espace avec *Integral*, qui détecte le rayonnement gamma (c) ou encore avec WMAP (d), qui enregistre les données du fond diffus cosmologique.

toire Auger en cours de construction en Argentine. L'Observatoire couvrira 3 000 kilomètres carrés de surface et des détecteurs régulièrement espacés scruteront sans cesse le ciel. On a déjà détecté des particules d'ultra haute énergie, 100 milliards de fois plus énergétiques que les plus énergétiques observées jusque dans les années 1970-1980, qui créent des gerbes de particules très rapides. Ces particules secondaires sont détectées par des télescopes qui observent la fluorescence ultraviolette qu'elles induisent dans l'atmosphère, mais aussi par des cuves d'eau qui observent l'effet Cerenkov des pluies de particules (l'effet Cerenkov est une sorte d'onde de choc lumineuse, accompagnée d'un rayonnement bleu caractéristique, qui se produit quand une particule se déplace dans un milieu plus vite que la lumière dans ce milieu). D'après les caractéristiques des gerbes de particules, les physiciens sont capables d'évaluer l'énergie et la direction de la particule qui leur a donné naissance. L'Observatoire Auger est immense parce que la fréquence de ces particules de très haute énergie est de l'ordre de une par kilomètre carré et par siècle : elles sont extrêmement rares.

Les limites techniques sont innombrables : la masse en orbite est nécessairement limitée, les détecteurs doivent être refroidis à l'hélium liquide, les matériaux résister à de fortes contraintes thermiques ou mécaniques...

Pour la Science : Après ces exemples des possibilités et des limites de l'observation depuis la Terre, abordons l'observation depuis l'espace : on évite ainsi toutes les contraintes évoquées dues à l'atmosphère. Quels sont les rayonnements étudiés grâce aux satellites ?

Roland Lehoucq : Effectivement, dans l'espace, on s'affranchit des turbulences atmosphériques. Il n'est plus nécessaire de corriger leurs effets. Le télescope *Hubble* fonctionne depuis une quinzaine d'années. Il a produit une myriade de magnifiques images et de résultats scientifiques stupéfiants. Dans l'espace, il n'y a pas d'atmosphère qui diffuse la lumière du Soleil, de sorte qu'il fait nuit tout le temps et que l'observation des étoiles peut se faire en continu, à condition bien sûr d'observer à l'opposé du Soleil. *Hubble* fait ses observations quasiment 24 heures sur 24, 365 jours par an. Les difficultés sont essentiellement techniques : il faut mettre sur orbite des centaines de kilogrammes de matériel et, en cas de problème technique, il faut aller réparer sur place. L'espace présente des contraintes, mais la qualité d'observation est remarquable. On dispose de plusieurs télescopes dédiés à l'observation des différents rayonnements. *Hubble* observe dans l'infrarouge et en lumière visible. Bien qu'il ne soit pas obsolète, il va être mis hors service pour des raisons d'argent, semble-t-il. Aujourd'hui, il est devenu un instrument banal au regard

des instruments terrestres. Un autre télescope spatial dont le miroir devrait mesurer huit mètres de diamètre, c'est-à-dire captant beaucoup plus de lumière, est à l'étude. Mais on ne placera pas un tel miroir dans une fusée, et il faudra donc le « plier » sur Terre et le « déplier » dans l'espace ! Beaucoup des difficultés techniques semblent d'ores et déjà résolues, et il devrait y avoir sur orbite, d'ici quelques années, des télescopes de huit à dix mètres observant dans le visible et l'infrarouge. D'autres longueurs d'onde sont observées, notamment les rayons X et les rayons gamma. Pour les rayons X, il s'agit des télescopes XMM et *Chandra*, pour le rayonnement gamma c'est le satellite *Integral*, pour l'infrarouge, c'est *Spitzer*. Voici un autre exemple de contraintes : la caméra qui détecte les infrarouges émet elle-même des infrarouges. Pour ne pas confondre ces infrarouges avec ceux de la source, il faut refroidir la caméra... jusqu'à -269 °C ! Pour ce faire, il faut embarquer d'énormes quantités d'hélium liquide. Quand l'hélium est épuisé, le satellite cesse d'être fonctionnel.

SOHO est un observatoire spécifiquement dédié à l'étude du Soleil. Il observe la couronne et les oscillations solaires ; ces mouvements de la surface du Soleil, très faibles et lents, résultent des ondes de pression qui se propagent à l'intérieur du Soleil. Un autre satellite, WMAP, livre des informations sur le fond diffus cosmologique, un rayonnement capté dans la gamme des micro-ondes correspondant à la plus vieille lumière émise par l'Univers, au moment où il est passé de l'état de plasma à celui de matière neutre. SOHO et WMAP ont une particularité : ils ne sont pas en orbite proche autour de la Terre, mais sont situés à des points d'équi-attraction entre la Terre et le Soleil, les points de Lagrange. Pour observer le Soleil en permanence, SOHO est placé entre la Terre et le Soleil, à 1,5 million de kilomètres. WMAP est, quant à lui, situé à l'opposé de SOHO par rapport à la Terre afin d'explorer le fond diffus cosmologique sans être gêné par le Soleil.

Pour la Science : À côté des limites techniques évoquées (l'hélium ou les masses limitées que l'on peut envoyer dans l'espace), une autre difficulté n'est-elle pas aussi celle du traitement des données ?

Roland Lehoucq : Il y eut une difficulté liée aux mémoires embarquées dont la capacité de stockage était trop limitée. Après les temps héroïques des premiers satellites, les progrès en électronique ont permis de stocker l'information à bord. Il faut toutefois prendre des précautions car, à basse altitude, les particules de haute énergie du Soleil endommagent les mémoires, risquant de détruire des données précieuses. Une autre difficulté est liée aux différences de température auxquelles un satellite est soumis : du côté de la partie exposée au soleil, il peut régner une température de l'ordre de 100 à 120 °C, tandis que sur le côté à l'ombre, la température peut être négative. Les matériaux utilisés doivent supporter des gradients de température supérieurs à 100 degrés sur quelques mètres de longueur : les contraintes thermiques sont gigantesques. Soumises à de tels écarts de température, les soudures, par exemple, sont extrêmement fragiles, toute bulle d'air étant un site