

Des étoiles et des hommes

L'étude des astres est un monde de paradoxes.

Elle se révèle à des degrés divers : de l'observation du ciel nocturne à la science la plus complexe, de l'œil humain au télescope spatial, de la particule à l'Univers, de la physique quantique à la relativité générale, de la beauté de points lumineux dans la nuit à des questions métaphysiques, du club local d'astronomie à l'Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers.

S'ils ont tous deux des étoiles qui brillent dans les yeux, l'amateur et le chercheur n'utilisent pas les mêmes « jouets ». Ni sur un plan pratique : le *Very Large Telescope* (VLT) du Chili n'a pas grand-chose à voir avec la lunette astronomique de Flammarion, quant au télescope spatial Hubble... Ni sur un plan théorique.

Si l'astronomie est accessible aux plus jeunes, c'est parce qu'elle fait appel, au départ, à des notions scientifiques simples. Dès le secondaire, l'optique géométrique explique le fonctionnement des télescopes et la gravitation newtonienne permet une première approximation satisfaisante du système solaire.

En revanche, les professionnels font appel à des concepts et à des outils d'observation des plus sophistiqués et coûteux.

Un travail de calcul acharné, entrecoupé de périodes d'observations pour engranger et analyser une quantité phénoménale de données de plus en plus précises, tel est le quotidien de ces hommes et de ces femmes qui font l'astrophysique moderne. Avec, à terme, particulièrement dans les dernières années, des résultats d'une importance capitale dans la compréhension du monde qui nous entoure.

Le film *Des étoiles et des hommes* nous offre la possibilité de suivre pendant huit mois quelques-uns de ces chercheurs, leurs incertitudes, leurs joies, leurs déceptions, leurs motivations, leurs colères et leurs espoirs.

Les astrophysiciens du service d'astrophysique du CEA sont de merveilleux vulgarisateurs. En bonus, ils nous livrent quelques courtes réponses à des questions fondamentales portant sur le voyage dans le temps et dans l'espace, la vie ailleurs ou encore les trous noirs. Impossible de résister à ces scientifiques passionnés quand ils se lancent dans des discours qui, s'ils ne manquent jamais de sérieux, rendent la science accessible.

Pierre-Olivier Lagage, David Elbaz, Roland Lehoucq, Vincent Minier et Marc Sauvage se sont prêtés au jeu pour notre plus grand bonheur.

Références aux programmes

Culture scientifique

Dans les programmes des disciplines scientifiques, les références à la culture scientifique et à l'histoire des sciences sont nombreuses. Ce film offre un support riche à qui veut utiliser cette approche.

Socle commun des connaissances et des compétences (BO n° 29 du 20 juil. 2006)

Compétence 3 : Les principaux éléments de mathématique et la culture scientifique et technique

Compétence 5 : La culture humaniste

Thème de convergence du collège

Thème 1 : L'importance du mode de pensée statistique dans le regard scientifique sur le monde

Option de découverte professionnelle en 3^e (BO n° 11 du 17 mars 2005)

Brevet Informatique et Internet (BO n° 42 du 23 novembre 2000)

Niveau 1 : Chercher, se documenter au moyen d'un produit multimédia

Niveau 2 : S'informer et se documenter

Physique

Collège (BO Spécial n° 6 du 28 août 2008)

- 5^e : La lumière, sources et propagation rectiligne (Sources de lumière, vision d'un objet)
- 4^e : La lumière, couleurs, images, vitesse (Lumières colorées et couleur des objets – Lentilles, foyers et images – Vitesse de la lumière)
- 3^e : De la gravitation... à l'énergie mécanique (Interaction gravitationnelle)

Lycée

- 2^{de} (BO Hors série n° 2 du 30 août 2001)
Exploration de l'espace (De l'atome aux galaxies – Messages de la lumière) ;
L'Univers en mouvement et le temps (Mouvements et forces)
- 1^{re} L (BO n° 39 du 1^{er} novembre 2007)
La représentation visuelle du monde
- 1^{re} S (BO Hors série n° 7 du 31 août 2000)
Les interactions fondamentales (Interactions et cohésion de la matière à diverses échelles) ; Optique (Conditions de visibilité d'un objet – Images formées par les systèmes optiques – Un exemple d'appareil optique)

• **Terminale S** (BO Spécial n° 31 du 29 août 2002)

Enseignement obligatoire

- Propagation d'une onde ; ondes progressives (La lumière, modèle ondulatoire)
- Transformations nucléaires (Noyaux, masse, énergie)
- Évolution temporelle des systèmes mécaniques (L'atome et la mécanique de Newton)

Enseignement de spécialité

- Produire des images, observer (Formation d'une image - Quelques instruments d'optique)
- Produire des signaux, communiquer (Les ondes électromagnétiques)

Les images de simulation

(Commissariat à l'énergie atomique/Institut de recherche fondamentales de l'Univers)

Grâce à la puissance de nouveaux supercalculateurs, les scientifiques peuvent aujourd'hui simuler sur ordinateur la formation et l'évolution des astres avec des détails suffisants pour produire des images « virtuelles » de très haute qualité.

Ces images ne sont pas des illustrations ou des représentations fictives, elles sont le résultat de calculs scientifiques très rigoureux où interviennent des équations mathématiques complexes, à la pointe de la recherche.

Les images proposées dans ce film simulent numériquement et dans l'ordre :

- 13 milliards d'années de l'évolution de l'Univers, depuis l'état homogène de l'après-Big Bang jusqu'aux galaxies spirales actuelles ;
- les collisions de galaxies spirales ;
- l'effondrement d'un nuage de gaz en protoétoiles ;
- les mouvements de matière et les turbulences à l'intérieur d'un disque entourant une étoile, à l'origine de la formation de planètes ;
- un disque protoplanétaire, à l'intérieur duquel s'est formée une protoplanète géante dont la masse serait sensiblement celle de Jupiter ;
- la structure des champs magnétiques interne et externe du soleil.

Découpage en séquences

00 min 00 – 09 min 19 s : Chapitre 1. L'astrophysique est humaine

En guise d'introduction, le film cherche à connaître les émotions des chercheurs en astrophysique.

Il présente ensuite le satellite Herschel et les hommes qui travaillent à sa réalisation.

09 min 19 – 19 min 18 : Chapitre 2. L'effervescence de la recherche

Très riche, cette séquence révèle les motivations scientifiques des astrophysiciens : matière noire, énergie noire, vie et mort des galaxies...

Elle détaille également leur quotidien, fait d'excitations, de luttes, de joies et de contrariétés.

19 min 18 – 31 min 39 : Chapitre 3. Partager la science

Une partie du métier de chercheur consiste en la rencontre avec le grand public et parmi celui-ci, les enfants sont les plus déroutants. À la Cité des Sciences ou en classe, leur rencontre invite à la prise de recul et au changement de point de vue.

31 min 39 – 38 min 28 : Chapitre 4. Satellite et crise

Retour sur le satellite Herschel. « *Noordwijk, on a un problème !* »

Gros plan sur une gestion de crise dans un programme européen.

38 min 28 – 46 min 14 : Chapitre 5. Du télescope au vaisseau spatial

Voyage au Chili en direction du VLT (*Very Large Telescope*) dans le désert d'Atacama. Outre le bonheur manifeste de se trouver dans La Mecque de l'astrophysique, les scientifiques interrogés décrivent la science qui se pratique ici.

Pour finir, nous apprenons que finalement, la Terre n'est pas si différente d'un vaisseau spatial.

Pistes pédagogiques

Plusieurs pistes s'ouvrent au professeur pour exploiter le film.

Pour certaines d'entre elles, l'enseignant trouvera des exercices et des documents prêts à l'étude à proposer aux élèves, ainsi que des compléments pour son propre usage.

1 - Tout niveau

La première piste pédagogique concerne la culture scientifique et technique des élèves.

Le professeur pourra profiter de la moindre opportunité pour présenter un extrait du film à la classe et ouvrir le débat sur la science en train de se faire.

2 - Tout niveau

En classe et en intégralité, en fin d'année. Le professeur pourra ouvrir la discussion en évoquant les points de programme étudiés dans l'année qui se retrouvent dans le film et indiquer aux élèves dans quelle mesure le travail effectué marque une étape dans le chemin qui mène aux disciplines de l'astrophysique.

3 - Tout niveau

Un autre extrait se prête à l'étude dans le contexte de la culture scientifique et technique : à partir du temps 44 min 40, Pierre-Olivier Lagage décrit sa vision du monde scientifique moderne, qu'il caractérise comme une succession de « petits pas ». Le professeur pourra lancer le débat sur la représentation qu'ont les élèves du monde scientifique. Une recherche documentaire sur l'organisation de la science en France, en Europe et dans le monde permettra de préciser la réalité, en poursuivant avec des entretiens avec des chercheurs, généralement ravis de partager leur expérience.

4 - 3° Découverte professionnelle

Dans le cadre de la découverte professionnelle, le film offre une illustration intéressante de la réalité du travail de chercheur, sous ses divers aspects. De la réflexion solitaire au travail en équipe dans des projets internationaux, du travail d'enseignement de haut niveau à la vulgarisation pour un public jeunesse, de l'émotion face à l'aboutissement d'années de travail à la frustration lorsque les résultats ne viennent pas, le panel est large.

5 - 3^e Découverte professionnelle

Le professeur pourra ensuite s'attacher en particulier au chapitre 4 (31 min 39 à 38 min 28) qui retrace la période de crise à l'ESTEC (*European Space Research and Technology Centre*) suite à la défaillance de l'imageur PACS (*Photodetector Array Camera and Spectrometer*) qui apparaît après une série de tests en vibration. Il pourra demander aux élèves de dresser la liste des actions menées par l'équipe pour résoudre le problème et leur demander de proposer leurs solutions.

6 - 3^e/2^{de}. Piste à aborder sous différents angles selon le niveau de connaissances

David Elbaz évoque de manière particulièrement limpide les hypothèses en cours sur les conditions de vie et de mort des galaxies (10 min 34 à 12 min 58).

Bien que hors programme, ces thématiques sont porteuses auprès des élèves et peuvent être abordées en introduction de chapitres tels que l'interaction gravitationnelle en 3^e ou l'exploration de l'espace en 2^{de}. Le lien entre l'astrophysique actuelle et les programmes scolaires pourra être rappelé, source d'intérêt à long terme.

7 - Tout niveau. Piste à aborder sous différents angles selon le niveau de connaissances

Le même David Elbaz rappelle combien l'Univers nous est en fait inconnu en rappelant l'existence de la matière noire et de l'énergie sombre (17 min 14 à 18 min 18).

Ces notions, bien que complexes et basées sur des principes étrangers aux élèves du secondaire, font maintenant partie du vocabulaire commun et il est important qu'elles apparaissent de manière claire assez tôt dans le cursus scolaire.

Le visionnage de l'extrait pourra être complété par une recherche documentaire et un exposé pourrait constituer l'objectif final de la séquence pédagogique.

8 - Terminale S

David Elbaz relate un fait d'histoire des sciences important : la découverte du rayonnement infrarouge par William Herschel, en 1800.

Cet extrait (21 min 00 à 22 min 21) peut servir de situation déclenchante pour les élèves, dans le chapitre concernant la lumière en tant qu'onde électromagnétique.

► Fiche-élève « Infrarouge et spectre électromagnétique », page 9.

9 - 5^e/3^e/2^{de}. *Piste à aborder sous différents angles selon le niveau de connaissances*

Anne Decourchelle annonce aux élèves les circonstances de la mort attendue du Soleil (26 min 58 à 27 min 30). L'avenir du système solaire pourra être évoqué plus en détail. Le professeur profitera de cette occasion pour rappeler l'organisation du système solaire et les mouvements des planètes. Il dressera une échelle des distances entre notre étoile et les planètes. On estime que le Soleil devrait atteindre au moins l'orbite de la Terre lors de son expansion en géante rouge.

► Compléments pour l'enseignant « Le système solaire en chiffres », page 10.

10 - 3^e/2^{de}. *Piste à aborder sous différents angles selon le niveau de connaissances*

David Elbaz fait une remarque tout à fait intéressante concernant une pièce dans une main posée sur une table (20 min 33 à 20 min 56). Encore une situation déclenchante pour les élèves de lycée en introduction du chapitre « De l'atome aux galaxies ». Grâce à une étude des échelles de longueur, les élèves pourront se rendre compte du caractère lacunaire de la matière.

En collaboration avec le professeur de Mathématiques, les puissances de 10 pourront être étudiées dans un cas concret.

Les élèves de 3^e pourront également, puisqu'ils découvrent la structure moléculaire de la matière, réfléchir à cette notion.

► Fiche-élève « La matière pleine de vide », page 12.

11 - 5^e. *Pour cette piste comme pour la suivante, il sera intéressant de faire visionner le chapitre 5 où l'on découvre le VLT.*

Les élèves abordent la notion de « chemin lumineux » et peuvent donc commencer à s'intéresser aux télescopes. Le professeur pourra leur faire suivre le chemin de la lumière d'une étoile vers un télescope et du télescope à l'œil de l'observateur.

12 - 4^e/1^{re} S/terminale S spé. *Piste à aborder sous différents angles selon le niveau de connaissances*

Tous les thèmes relatifs à l'optique géométrique permettent l'étude des instruments d'observation. On pourra donc utiliser ces pistes après visionnage du chapitre 5.

12 a - 4^e

Le professeur pourra utiliser les différentes configurations optiques des télescopes pour faire réfléchir les élèves aux avantages comparés de ces configurations.

► Fiche-élève « Les télescopes », page 13.

12 b - 1^{er} S

Le professeur pourra utiliser le document fourni pour proposer une première approche des télescopes.

► Fiche-élève « Les configurations optiques des télescopes », page 14.

12 c - Terminale S, enseignement de spécialité

Le professeur pourra également évoquer les améliorations possibles, grâce à un système de lentilles ou à l'aide de l'optique adaptative.

Il s'attachera aux qualités d'un télescope : son pouvoir collecteur et son pouvoir séparateur.

► Fiche-élève « Les configurations optiques des télescopes » et compléments pour l'enseignant « L'optique astronomique » page 15.

13 - 2^{de}/ terminale S

L'étude des messages de la lumière trouve toute sa substance dans le film, en particulier lorsque David Elbaz rappelle l'intérêt de l'observation du ciel dans l'infrarouge (21 min 00 à 22 min 21).

Que l'on s'attache aux spectres d'émission des corps célestes ou au spectre d'absorption de l'atmosphère terrestre, l'élève de 2^{de} est capable de justifier l'usage de télescopes spatiaux pour l'observation dans l'infrarouge.

Hubble observe dans le visible, bien sûr, mais sa position lui permet d'échapper aux perturbations atmosphériques et les images obtenues par son intermédiaire sont incomparables.

► Fiche-élève « Des télescopes dans l'espace », page 18.

14 - 2^{de}/ terminale S. Piste à aborder sous différents angles selon le niveau de connaissances

Le professeur pourra distribuer le texte « Observer ailleurs que dans le domaine visible » aux élèves à la suite du cours sur les spectres d'émission et leur demander de faire la liste des notions évoquées. Celles-ci seront ensuite reprises en classe puis le professeur fera le lien entre le spectre d'émission et la composition chimique de la surface d'un corps céleste. Il pourra insister sur la puissance de l'outil de détection à longue distance.

► Fiche-élève « Observer ailleurs que dans le domaine visible », page 19.

FICHE-ÉLÈVE (TERMINALE S) : INFRAROUGE ET SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Vous venez de voir un extrait dans lequel David Elbaz décrit la découverte du rayonnement infrarouge par William Herschel.

Après une recherche documentaire faite à la maison ou en CDI, répondez aux questions suivantes :

- Qui était William Herschel ? Décrivez son parcours, celui de sa famille, et leurs principales contributions à la recherche scientifique.

- Faites un schéma du protocole expérimental mis en œuvre par Herschel lors de sa découverte des infrarouges.

- Tracez sur une échelle logarithmique, pour des longueurs d'onde allant de 10^{-15} m à 10^5 m, le spectre électromagnétique et nommez les différents domaines en allant du plus énergétique au moins énergétique.

- Pour chaque domaine de longueur d'onde, citez un ou plusieurs usage(s) technologique(s) associé(s) (ex. : pour la gamme du visible, la photographie).

- Pour chaque domaine de longueur d'onde, précisez les effets biologiques des rayonnements. (Vous pouvez également consulter votre professeur de SVT pour cette question).

COMPLÉMENTS POUR L'ENSEIGNANT (5^e / 3^e / 2^{de}) :

LE SYSTÈME SOLAIRE EN CHIFFRES

Planète	Période de révolution	Distance au Soleil (orbite quasi circulaire) en millions de km	Rayon en km	Masse en 10 ²² kg	Densité	Nombre de satellites	Période de rotation
Mercure	88 jours	56	2 439	33	5,4	0	59 jours
Vénus	226 jours	105	6 052	490	5,2	0	243 jours (rétrograde)
Terre	366 jours	150	6 378	600	5,5	1	24 heures
Mars	687 jours	228	3 397	64	3,9	3	24,6 heures
Jupiter	Moins de 12 ans	777	71 500	190 000	1,3	16	9,5 heures
Saturne	Plus de 29 ans	1 425	60 300	57 000	0,7	20	10,7 heures
Uranus	84 ans	2 880	25 600	8 700	1,3	20	17,2 heures
Neptune	Plus de 164 ans	4 500	24 800	10 000	1,6	8	16,1 heures

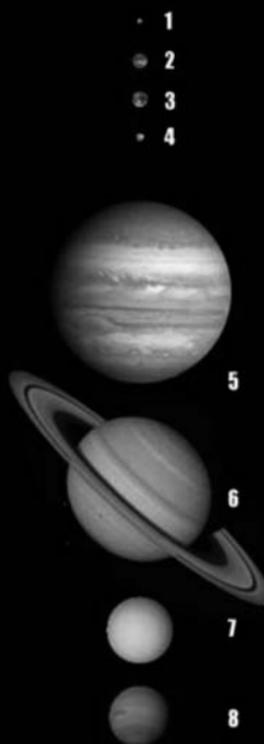
Selon la nouvelle définition de l'Union astronomique internationale (UAI), une planète est un corps céleste en orbite autour du Soleil, qui possède une masse suffisante pour que sa gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique (forme ronde) et qui a éliminé tout corps se déplaçant sur une orbite proche.

Cette définition fut approuvée le 24 août 2006, en clôture de la 26^e assemblée générale de l'UAI.

Dès lors, Pluton n'est plus une planète mais une planète naine, nouvelle catégorie de corps céleste définie lors de cette même assemblée générale.

LA SUCCESSION DES PLANÈTES DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

1. Mercure
2. Vénus
3. Terre
4. Mars
5. Jupiter
6. Saturne
7. Uranus
8. Neptune



David Elbaz s'étonne de voir sa main tenir sur une table et une pièce rester dans cette même main. Et vous ?

Rappelons-nous quelques ordres de grandeur :

- Un atome : 10^{-10} m
- Le noyau d'un atome : 10^{-14} m
- Un atome est donc fois plus grand que son noyau [*et du vide entre le noyau et les électrons*].

- Le Soleil est distant de 10..... m de la Terre.
- Le système solaire a un diamètre de 10..... m.
- Le système solaire est donc fois plus large que la distance de la Terre au Soleil [*et (presque) du vide entre les planètes*].

- Notre Galaxie a un diamètre de 10..... années-lumière.
- L'Univers a un diamètre estimé à 10..... années-lumière.
- L'univers est donc 10..... fois plus large que la Voie lactée.

Effectivement, David Elbaz a bien le droit de s'interroger sur la capacité de sa main à tenir un objet, puisque tout, autour de nous, n'est presque composé que de vide... Si, dans l'espace, il arrive que des galaxies se croisent et réussissent à « passer au travers » l'une de l'autre, il arrive aussi qu'elles se heurtent dans la plus grande violence pour donner naissance à de nouvelles formes. Quoi qu'il se passe, c'est la gravité qui intervient dans ces phénomènes.

En revanche, si la main de David Elbaz ne passe pas à travers la table sur laquelle elle est posée, c'est parce que des forces de cohésion très puissantes unissent les atomes qui la composent. À cette échelle, il n'est plus uniquement question de gravité.

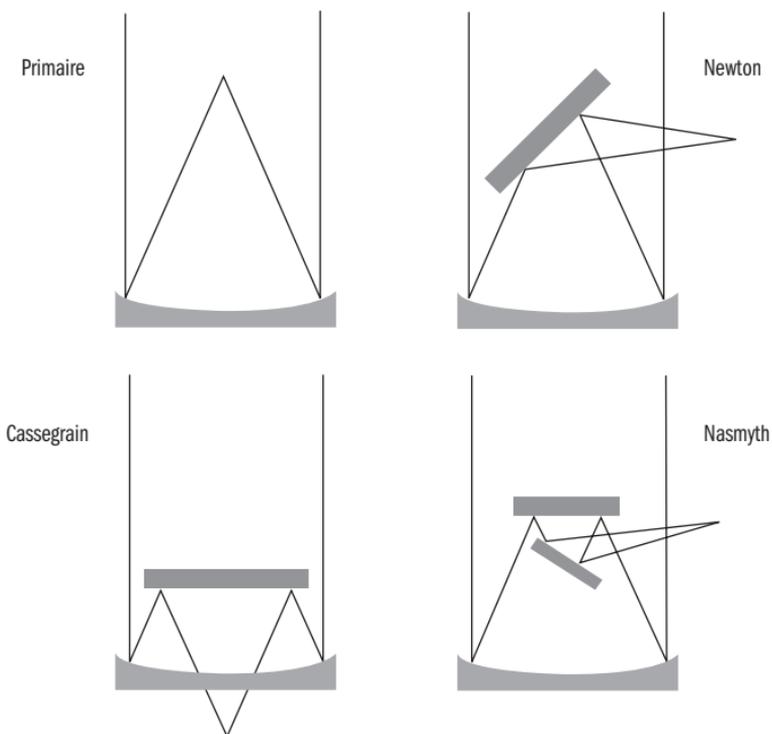
Données pour le professeur :

- Diamètre du noyau atomique : 10^{-15} m
- Diamètre d'un atome : 10^{-10} m
- Distance Terre/Soleil : $150 \cdot 10^6$ km (cette distance est aussi appelée « unité astronomique »)
- Largeur du système solaire : $150 \cdot 10^8$ km
- Largeur de la Galaxie : $2 \cdot 10^5$ années-lumière
- Taille estimée de l'Univers : $5 \cdot 10^{10}$ années-lumière

FICHE-ÉLÈVE (4^e) : LES TÉLESCOPES

Herschel est un énorme télescope. Nous allons essayer de comprendre comment il a été conçu.

Voici quatre types de configurations optiques utilisées pour des télescopes.



Les traits représentent le chemin de la lumière.

- Indiquez par une flèche le sens de parcours de la lumière.
- Dessinez un œil à l'endroit où l'astronome doit se placer pour observer le ciel.

- Lire le document ci-dessous et déterminer quels sont les avantages et les inconvénients pour chaque configuration mentionnée.

« Les différents types de configurations optiques

Elles se distinguent les unes des autres suivant la disposition et la nature des miroirs. Mais la lumière est toujours concentrée en un point précis appelé "foyer du télescope".

Le foyer primaire est bien le foyer du miroir primaire, mais il est le plus souvent associé à un ensemble de lentilles qui permettent d'obtenir des images d'une excellente qualité sur une grande surface.

Dans la configuration Newton, un simple miroir plan renvoie latéralement le foyer primaire.

La configuration Cassegrain comporte un miroir convexe, face au miroir primaire, qui applique un grandissement et renvoie le foyer en arrière du miroir primaire au travers d'un trou dans celui-ci. Cette configuration offre plusieurs avantages : elle permet une grande focale dans un arrangement compact et corrige plusieurs défauts optiques, encore appelés « aberrations ». C'est la configuration la plus courante.

La configuration Nasmyth est une combinaison des configurations Cassegrain et Newton. Un renvoi latéral du foyer secondaire est effectué par un miroir tertiaire plan. [...]

Le foyer coudé : grâce à des miroirs plans, le faisceau suit un long trajet (coudé), en passant notamment par les deux axes de rotation (creux). L'avantage principal de cette solution est que le foyer où converge le faisceau est un point fixe dans le bâtiment abritant le télescope, donc indépendant de la direction de pointage. On peut alors alimenter un instrument d'analyse fixé sur le plancher et qui n'est donc pas solidaire du télescope dans ses déplacements. »

TDC n° 974 du 15 avril 2009.

FICHE-ÉLÈVE (TERMINALE S SPÉ) : **LES CONFIGURATIONS OPTIQUES DES TÉLESCOPES**

Herschel est un télescope de configuration Cassegrain.

- Grâce à une recherche documentaire faite à la maison ou au centre de documentation, dressez la liste des différentes configurations optiques utilisées pour les instruments d'observation astronomique et dessinez un schéma simplifié de principe pour chacune d'entre elles.
- Complétez cette liste par une analyse comparée des qualités et défauts de ces configurations.

COMPLÉMENTS POUR L'ENSEIGNANT (TERMINALE S SPÉ) : **L'OPTIQUE ASTRONOMIQUE**

Cette fiche vient en support de l'activité documentaire 12 c et informe l'enseignant des dernières avancées technologiques en matière d'astronomie.

Vous trouverez une source complète d'information sur les configurations optiques des télescopes et leurs avantages comparés sur le site de l'observatoire de Paris (<http://media4.obspm.fr/public/FSU/instrumentation/observer/collecter/foyers/APPRENDRE.html>).

De manière générale, on poursuit deux objectifs principaux avec un télescope :

- récolter le plus de lumière possible, pour permettre l'observation des lumières les plus faibles (et donc aussi les plus lointaines) ;
- distinguer le mieux possible les lumières recueillies, de manière à séparer deux étoiles très proches.

Le pouvoir collecteur d'un télescope varie en fonction du carré de la taille du miroir. C'est pour cela que les diamètres des instruments vont toujours croissants. Herschel ne fait « que » 3,5 m et pourtant il est le plus gros dans l'espace. Le prochain géant sur Terre fera 42 m de diamètre.

Le pouvoir séparateur, lui, est directement proportionnel au diamètre du miroir. Plus il est grand, plus la finesse des détails sur une image sera grande.

« Comme l'objectif d'un télescope a un diamètre limité, il se comporte aussi comme un diaphragme ; la conséquence est que, même si l'optique est parfaite, tous les rayons lumineux parallèles qui sont recueillis ne sont pas exactement concentrés en un point, mais en une tache de petite dimension appelée « image de diffraction ».

L'image d'une étoile n'apparaît pas ponctuelle mais comme un petit disque où est concentrée la plus grande partie de la lumière, entouré d'anneaux un peu moins lumineux.

C'est cette image de diffraction qui limite le pouvoir séparateur théorique, puisqu'on ne pourra jamais dissocier deux détails planétaires ou deux étoiles dont l'écartement est petit devant la largeur du disque central. Or, en valeur angulaire, la largeur du disque central est inversement proportionnelle au diamètre de l'objectif (plus le diaphragme est grand, moins il disperse la lumière), ce qui explique l'expression " $120''/D$ " pour valeur de pouvoir séparateur théorique [avec D exprimé en mm, n.d.r].

En fait, le diamètre du disque central est de $140''/D$, valeur légèrement supérieure au pouvoir séparateur ; la pratique a montré que l'on peut "séparer" deux étoiles dont les disques se recouvrent légèrement [...]. »

Patrick Martinez, *Astrographie*, Paris, Société d'astronomie populaire, 1983.

La course au gigantisme pour les miroirs trouve cependant une limite. On estime qu'il faut une épaisseur égale au sixième du diamètre pour que la rigidité du miroir soit convenable. Problèmes de fabrication (homogénéité, temps de refroidissement) et de mise en place (poids et logistique de transport) ont eu raison du miroir monolithique.

Deux possibilités : segmenter le miroir en plus petits éléments et ajuster en temps réel la position de chacun ou alors garder un miroir monobloc mais l'affiner et le faire reposer sur des vérins qui lui assurent une forme idéale en permanence. Cette technologie s'appelle l'optique active.

La première solution a été adoptée pour le prochain grand télescope spatial James Webb.

La seconde est en place au VLT (*Very Large Telescope*) au Chili.

« Une technique correctrice : l'optique adaptative

Les livres d'optique nous apprennent qu'un télescope de diamètre D devrait délivrer un pouvoir séparateur égal à 0,07 microradian (ou encore 0,015 seconde d'arc, en utilisant l'unité que préfèrent les astronomes), soit un niveau de détail extrêmement fin qui permettrait, par exemple, de distinguer depuis Paris une pièce de 10 centimes d'euro tenue à Reims. Or les ondes lumineuses qui abordent notre planète rencontrent d'abord l'atmosphère terrestre. C'est un comité d'accueil plutôt médiocre puisque les cellules turbulentes de cette atmosphère introduisent des variations de l'indice de l'air qui dégradent la finesse angulaire des images. Celle-ci se dégrade fortement pour atteindre une valeur entre 2,5 et 10 microradians environ (ou encore de 0,5 à 2 secondes d'arc). Comme les cellules turbulentes sont transportées par le vent, cette dégradation des images

évolue en permanence et rapidement. Ainsi, observée à très courte pose (10 ms), l'image d'une étoile apparaît-elle éclatée en petites taches dansantes, appelées "tavelures" (ou *speckles*, en anglais). L'accumulation de ces tavelures sur une pose longue formera une tache étalée d'environ une seconde d'arc (au mieux, la moitié) dans les meilleurs sites mondiaux comme le mont Paranal au Chili ou le sommet du Mauna Kea à Hawaï. L'optique adaptative, une technique mise au point il y a une vingtaine d'années, permet de retrouver en grande partie les performances initiales du télescope.

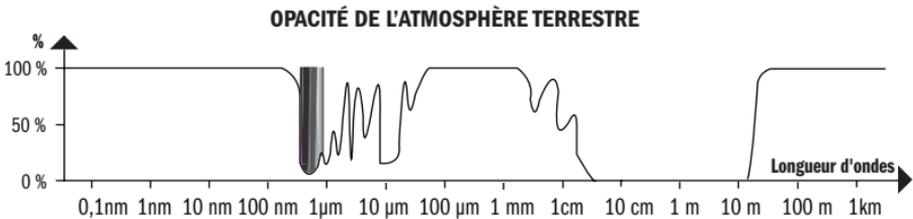
Proposée par l'astronome américain Horace W. Babcock, l'idée de l'optique adaptative est de contrebalancer en temps réel les déformations de l'onde lumineuse en contrôlant de façon opposée la surface d'un miroir souple. Ce miroir, d'une dizaine de centimètres, est introduit dans un système optique avant le foyer. Comme la distribution des cellules turbulentes suit une loi particulière (dite "de Kolmogorov"), l'essentiel des défauts se retrouve suivant de grandes ondulations du front d'onde, qui sont contrôlables avec relativement peu de cellules sur le miroir déformable. Un analyseur de surface d'onde mesure à cadence élevée (de 500 à 1 000 fois par seconde) les déformations de la surface de l'onde lumineuse en la divisant en zones appelées "sous-pupilles". Un ordinateur très rapide calcule en permanence les tensions à appliquer aux actionneurs du miroir souple, afin de "décabosser" l'onde lumineuse et de la rétablir telle qu'elle était avant de traverser l'atmosphère. »

TDC n° 974, 15 avril 2009.

Hubble, Herschel, Planck : pourquoi envoyer des télescopes dans l'espace ?

La présence de l'atmosphère sur notre planète présente des avantages indiscutables (d'ailleurs, sans elle, nous ne serions pas là pour en discuter !). Cependant, elle ne facilite pas forcément le travail de l'astronome.

Voici la courbe représentant l'opacité de l'atmosphère en fonction des longueurs d'onde :



- En étudiant cette courbe, vous indiquerez quelles longueurs d'onde parviennent jusqu'à la surface terrestre et, par conséquent, quelles longueurs d'onde sont observables sur Terre.
- Quelle solution proposez-vous pour observer les autres longueurs d'onde ?

Vous avez entendu parler du télescope spatial Hubble. Les séances de réparation dans l'espace sont fameuses.

Hubble est un télescope assez banal (si on oublie son coût) et pourrait être comparé, outre sa position, à un télescope terrestre. Il s'agit d'un œil très puissant.

- D'après vous, pourquoi a-t-on envoyé Hubble si loin et pourquoi les images qu'il a produites sont-elles si belles et précises ?

Pourquoi observer ailleurs que dans le domaine visible ?

« Des spectres riches d'informations

Toute matière dont la température est supérieure au zéro absolu (0 K, soit -273 °C) émet des ondes électromagnétiques qui forment le rayonnement thermique. À elle seule, la température fixe la puissance émise par un corps, proportionnelle à la puissance quatrième de la température. Ainsi, un corps dont la température absolue est 600 K (soit environ 320 °C) rayonne une puissance lumineuse seize fois plus grande qu'un corps à température ambiante (300 K, soit environ 27 °C). Toutes les longueurs d'onde sont présentes dans le rayonnement thermique mais en quantités inégales. C'est encore la température qui fixe le spectre du rayonnement émis, c'est-à-dire la répartition de l'énergie entre les différentes longueurs d'ondes présentes. Le maximum d'émission se fait pour une longueur d'onde inversement proportionnelle à la température. Autrement dit, un corps émet l'essentiel de sa lumière pour une longueur d'onde d'autant plus grande qu'il est froid. Notre principale source de lumière, le Soleil, émet son maximum de puissance pour de la lumière visible jaune dont la longueur d'onde est voisine de 0,5 micron. Ceci correspond à une température de 5 770 K.

Par ailleurs, un corps peut émettre de la lumière à des longueurs d'onde bien particulières. En effet, un atome ne peut émettre ou absorber une quantité quelconque d'énergie. Son énergie ne peut varier que par paliers bien fixés qui dépendent de la façon dont est arrangé son cortège d'électrons. Au cours d'une émission ou d'une absorption d'énergie, la répartition électronique de l'atome est modifiée. De la lumière est émise lorsqu'un électron effectue une transition d'un niveau d'énergie élevé vers un niveau d'énergie situé plus bas ; l'absorption de lumière correspond au passage d'un électron d'un niveau d'énergie inférieur vers un niveau supérieur. L'ensemble de ces transitions, qui se manifeste sous forme de raies dans le spectre, est caractéristique d'un atome et constitue sa carte d'identité. Ces raies d'émission se retrouvent aussi chez les molécules, collections d'atomes liés entre eux, seule la gamme de longueur d'onde concernée étant affectée. Quand un gaz est traversé par de la lumière, il peut absorber celle dont la longueur d'onde correspond à ses raies. Il en résulte un spectre d'absorption, ensemble de raies sombres sur un fond lumineux, une sorte de code-barres qui permet d'obtenir des informations sur la source et sur le gaz absorbant. C'est ainsi que le spectre du Soleil est constitué d'un spectre continu couvrant toutes les couleurs de l'arc-en-ciel sur lequel se superposent des raies d'absorption caractéristiques des atomes présents dans l'atmosphère du Soleil. »

Clefs CEA, octobre 2009.

Actualisation des connaissances

L'objectif poursuivi dans cette partie est de parfaire la culture scientifique de l'enseignant. L'actualité de l'astrophysique est riche et complexe.

HERSCHEL

Le film nous laisse dans le doute quant à l'avenir d'Herschel et en particulier de l'imageur PACS (*Photodetector Array Camera and Spectrometer*).

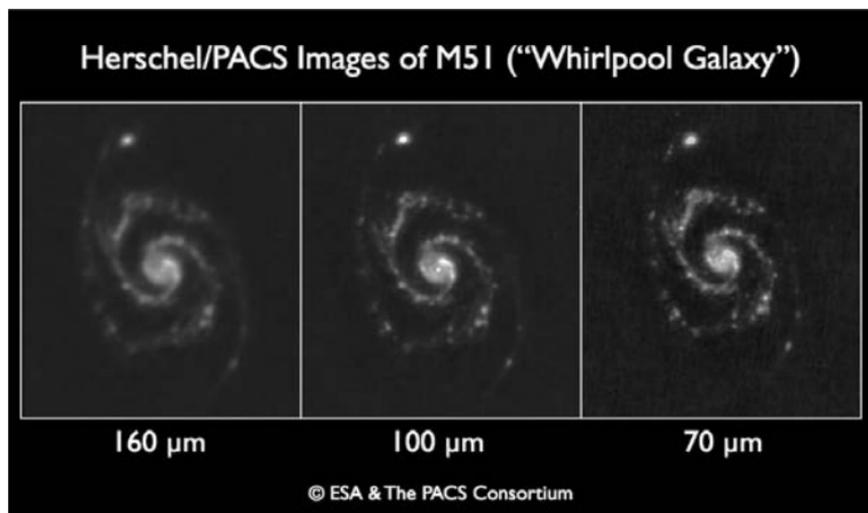
Autant le dire tout de suite : tout fonctionne !

Le lancement du satellite (conjointement avec un autre satellite, Planck, dédié à l'observation du fond diffus cosmologique) par la fusée Ariane 5 a eu lieu le 14 mai 2009 à Kourou, en Guyane.

Les instruments ont ensuite été mis sous tension et refroidis correctement. Le satellite a atteint son orbite à près de 1,5 million de km, au point de Lagrange L2.

La première image est arrivée sur les écrans le 19 juin 2009, à la surprise générale. D'une finesse inégalée, elle laisse augurer du meilleur pour les observations à venir.

PREMIÈRE LUMIÈRE D'HERSCHEL (www.esa.int)



• Pourquoi Herschel ?

William Herschel construisit plusieurs télescopes, avec sa sœur Caroline, qui leur permirent de découvrir Uranus (1781), les étoiles doubles, et d'estimer la forme de notre galaxie. Une autre grande découverte de William Herschel fut celle de la lumière infrarouge en 1800, un an avant celle de l'ultraviolet. Cette découverte démontra l'existence de lumière invisible à notre œil.

En leur hommage, l'Agence spatiale européenne décide de donner leur nom au télescope spatial pour l'infrarouge lointain.

• Pourquoi observer dans l'infrarouge ?

Les étoiles naissent dans des nuages de poussière et de gaz. Cette poussière forme un écran opaque, rendant l'observation de ces régions de l'espace impossible dans les longueurs d'onde très petites (proches de la taille des grains de poussière), c'est-à-dire dans le domaine visible.

Ces grains de poussière, très froids, possèdent cependant la propriété de rayonner dans l'infrarouge l'énergie transmise par leur environnement.

L'observation dans l'infrarouge permet donc de sonder les nuages de poussière de manière directe.

• Pourquoi envoyer le télescope Herschel dans l'espace ?

L'atmosphère terrestre ne peut pas à la fois permettre un effet de serre et l'observation des rayonnements infrarouge. Il a fallu choisir – et c'est mieux pour la vie sur Terre –, l'effet de serre et la vapeur d'eau l'emportent.

Ainsi donc, les mesures d'infrarouge se font dans l'espace. Les objets célestes peu lumineux ou très distants deviennent alors accessibles.

Autre argument : le froid qui règne dans l'espace.

Toute source de chaleur rayonne dans l'infrarouge. Le satellite lui-même devient une source de lumière pour ses propres capteurs. Le refroidissement passif offert par l'espace permet de diminuer le rayonnement infrarouge du satellite.

• Herschel, le plus grand télescope spatial

Diamètre du miroir : 3,5 m

Dimensions : 7,5 x 4 x 4 m

Poids : 3,3 t

Instrumentation :

- PACS (*Photodetector Array Camera and Spectrometer*) est une caméra de bolomètres pour cartographier l'émission infrarouge des grains de poussière, de 60 à 120 μm , et un spectromètre pour caractériser certaines raies comme celle du carbone ;

- SPIRE (*Spectral and Photometric Imaging Receiver*) remplit les mêmes fonctions que PACS mais à de plus grandes longueurs d'onde, dans l'infrarouge submillimétrique, de 200 à 600 μm ;
- HIFI (*Heterodyne Instrument for the Far Infrared*) est un spectromètre à haute résolution qui permet l'étude de la chimie de l'Univers à travers les signatures spectrales de la vapeur d'eau par exemple.

Refroidissement : pour éviter les émissions parasites dans l'infrarouge par le satellite lui-même, les instruments sont refroidis par un système de cryostat à l'hélium jusqu'à $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$, puis jusqu'à 300 mK, grâce à des cryoréfrigérateurs. L'existence même du cryostat, système passif, limite la durée de vie du satellite, entre cinq et dix ans.

Coût : Herschel et Planck, lancement compris = un milliard d'euros.

• Les enjeux

Herschel va permettre une véritable étude démographique des populations d'étoiles dans la Voie lactée, de leur gestation à leur naissance.

Son autre mission porte sur la compréhension du milieu interstellaire des galaxies, ce gaz raréfié (100 atomes par litre) sur des volumes gigantesques (équivalents à une galaxie large de 100 années-lumière) que la nature utilise pour créer des étoiles par milliers.

Enfin Herschel doit sonder l'Univers lointain et plus jeune (5 milliards d'années en arrière et même au-delà) pour comprendre comment la formation des étoiles au sein d'une galaxie évolue au cours du temps.

Grâce aux mesures réalisées par Herschel, les astrophysiciens comptent établir avec une bonne précision la courbe de la luminosité des étoiles en fonction de leur masse. Mais également la courbe IMF (*Initial Mass Fragment*) qui détermine le nombre d'étoiles en fonction de leur masse dans différentes galaxies, en commençant par la nôtre. On verra alors si cette courbe est universelle ou si elle présente des variations dans l'Univers, c'est-à-dire si toutes les galaxies forment la même proportion de grosses et de petites étoiles.

LES QUESTIONS DE L'ASTROPHYSIQUE MODERNE ET LES PISTES DE RÉPONSES

L'astrophysique et ses chercheurs vivent une période d'effervescence tout à fait inédite.

Ils disposent d'outils, spatiaux ou terrestres, qui ont permis une observation de l'Univers dans toutes les longueurs d'onde. Les images reconstruites à partir des mesures prises émerveillent les scientifiques et fournissent la base de leur travail. De surcroît, les quantités phénoménales de données recueillies bénéficient de moyens de calcul de plus en plus performants pour leur analyse. La puissance de la matière grise des chercheurs qui élaborent les codes mathématiques permet d'utiliser au mieux les processeurs des ordinateurs de dernière génération.

Le problème majeur de l'astrophysique réside dans l'impossibilité pour le chercheur de modifier des paramètres dans le système qu'il étudie... L'Univers n'est pas un laboratoire et l'astrophysicien est réduit au rôle d'observateur.

Il peut en revanche faire appel à la simulation numérique pour valider ses hypothèses. Une fois de plus, les méthodes mises au point par les scientifiques et les moyens informatiques actuels améliorent chaque jour ces simulations.

Et ces observations leur ont révélé des surprises, certaines majeures, peut-être à l'origine d'une nouvelle physique (puisque difficilement explicables par les théories en cours).

Deux grandes pistes d'investigation marquent le paysage de l'astrophysique moderne : la cosmologie – ou l'explication de la structure de l'Univers – et les exoplanètes avec, sous-jacente, la recherche de la vie extraterrestre.

Actuellement, on estime que l'Univers est composé à 75 % d'énergie sombre, à 21 % de matière noire et à 4 % de matière baryonique telle qu'elle est accessible à nos sens.



• L'énergie sombre

L'année 1998 fut l'une des dates les plus importantes de l'histoire de la cosmologie moderne. Deux équipes de chercheurs annoncèrent que l'expansion de l'Univers ne ralentissait pas, comme on le pensait jusqu'alors, mais était en fait en pleine accélération. Les deux équipes étaient arrivées à cette conclusion de manière indépendante, en s'appuyant sur l'observation de supernovæ de type Ia. L'accélération de l'expansion a été interprétée comme la présence d'une force répulsive à grande échelle, capable de surmonter la force gravitationnelle entre les différents constituants de l'Univers. La nature de cette force reste pour l'instant quasi inconnue et on lui a donné le nom de « énergie sombre ».

• La matière noire

L'étude des galaxies et des amas de galaxies a démontré la présence d'une matière dite « noire ». Cette matière noire permet d'expliquer les différences entre les observations et les calculs sur les vitesses des étoiles dans les galaxies et les structures des amas. Elle a pour particularité de n'émettre aucun rayonnement et de n'interagir que par l'action de la gravité. On « devine » simplement sa présence par son action gravitationnelle sur la lumière.

Le projet Euclid / Dune (*Dark UNiverse Explorer*) en cours d'études propose d'établir la cartographie à grande échelle de la matière noire en utilisant l'effet de lentille gravitationnelle. Un tel relevé permettra aux astrophysiciens de définir les structures de la matière noire dans l'Univers. Ils pourront alors déterminer l'influence de l'énergie sombre sur ces structures.

• Les exoplanètes : autre domaine de recherche très en pointe

Qui ne s'est jamais demandé s'il existait une vie ailleurs ?

La découverte d'une planète géante (et gazeuse) autour de l'étoile 51 Pégase en 1995 a marqué le début d'une recherche intense - et fructueuse - d'autres planètes extrasolaires. Aujourd'hui, plus de cent soixante-dix planètes ont été mises en évidence et les premières études statistiques révèlent une étonnante diversité des caractéristiques de ces systèmes.

Toutes ces planètes ont été découvertes grâce à des méthodes dites « indirectes » puisque l'on détecte en fait la perturbation, gravitationnelle ou photométrique, qu'elles produisent sur l'étoile autour de laquelle elles tournent. Ces observations apportent de précieux renseignements sur les planètes : leur orbite, leur masse et parfois leur rayon.

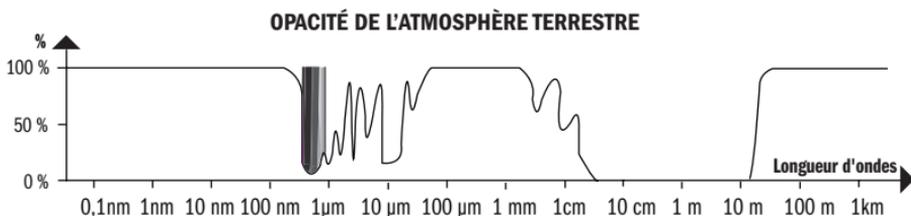
Le satellite CoRoT (Convection, rotation et transit planétaire) va à la rencontre de petites exoplanètes grâce à un photomètre très précis.

D'ici une dizaine d'années, les techniques permettront de déterminer la présence d'éléments essentiels à la vie sur ces planètes, comme le dioxyde de carbone, le dioxygène ou l'ozone.

LES OUTILS DE L'ASTROPHYSIQUE ET PROSPECTIVES

Nous sommes aujourd'hui capables de regarder l'Univers sous toutes ses couvertures, c'est-à-dire sous toutes les fréquences possibles. Les différents résultats obtenus sont corrélés entre eux afin de mieux cerner les mécanismes physiques mis en jeu dans les objets observés.

L'ouverture de la gamme des longueurs d'onde observables a été possible grâce au lancement de satellites d'observation, afin de s'affranchir de l'influence de l'atmosphère terrestre.



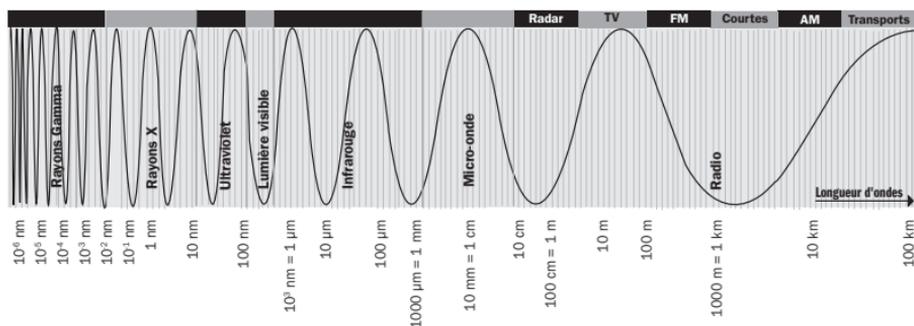
Autre perspective d'amélioration : la taille des télescopes. Plus un télescope est grand, plus il est capable de capter des faibles lumières, en provenance des astres les plus lointains. De plus, la résolution du télescope augmente en fonction de la taille du miroir primaire.

Enfin la qualité des images bénéficie de nouvelles technologies : l'optique active (capacité à déformer la surface du miroir en temps réel) et l'optique adaptative (correction des altérations de l'image dues à l'atmosphère, obtenue par déformation du miroir).

• LES INSTRUMENTS D'OBSERVATION

Observer l'Univers pour le comprendre, tel est l'objectif des astrophysiciens. Pour cela, ils exploitent l'ensemble du spectre électromagnétique, depuis les ondes radio jusqu'aux rayons gamma, chaque domaine spectral apportant des informations spécifiques.

SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE



• **Les ondes radio**, de 1 cm à 1 km

Radiotélescopes (Alma au Chili, Nançay dans le Cher)

Le rayonnement micro-ondes, de grande longueur d'onde, est peu arrêté par la matière. Il sort sans difficulté des nuages sombres et froids à l'intérieur desquels se forment les étoiles. Ce rayonnement est idéal pour percer les secrets de ces nuages et observer les premiers stades du développement des étoiles.

• **Les infrarouges**, de $1 \mu\text{m}$ à 1 mm

Télescopes spatiaux (Herschel, Spitzer) mais aussi terrestres VLT (caméra Visir) ou APEX (caméra Artemis)

Quand les étoiles naissent, elles sont plongées dans la poussière et ne sont visibles que par leur rayonnement infrarouge.

• **La lumière visible**, de 400 nm à 800 nm

Télescopes terrestres (VLT, Mont Palomar, Hawaï) ou spatiaux (Hubble) pour éviter les perturbations atmosphériques.

Regroupées dans le ciel en amas, les jeunes étoiles se révèlent en lumière visible.

- **Les ultraviolets**, de 10 nm à 300 nm

La couche d'ozone s'occupe de bloquer les UV, on fait donc appel aux télescopes spatiaux (Fuse).

La source d'énergie qui permet à une étoile de briller durablement provient des réactions nucléaires qui se produisent en son sein tout au long de sa vie. Une étoile ne vit pas éternellement et connaît une fin de vie mouvementée, au cours de laquelle son cœur très chaud et très dense finit par se révéler. Il brille alors d'une intense lumière ultraviolette.

Les objets très chauds, de température supérieure à 10 000 K, émettent préférentiellement des rayonnements ultraviolets.

- **Les rayons X**, de 10^{-12} m à 10 nm

L'atmosphère impose l'usage des télescopes spatiaux (Chandra).

Ceux de température supérieure au million de degrés émettent des rayons X. La mort spectaculaire des étoiles répand un souffle brûlant visible en rayons X. Certaines étoiles mortes laissent derrière elles un cœur très dense dans l'espace. Dans certains cas, plus extrêmes encore, le cœur de l'étoile se convertit en un astre plus exotique, un trou noir, dont la masse est susceptible d'atteindre une dizaine de fois la masse du Soleil.

- **Les rayons gamma**, moins de 10^{-12} m

De même que pour les rayons X, les télescopes spatiaux (Fermi - anciennement Glast) sont indispensables.

Le trou noir n'émet pas de lumière, mais la matière qui tombe sur lui peut être portée à de très fortes températures. Elle émet alors un rayonnement de haute énergie, sous forme de rayons X et gamma, caractéristique des phénomènes très violents.

• L'AVENIR DE L'OBSERVATION EN ASTROPHYSIQUE

Voici une liste non exhaustive des projets d'envergure en développement.

• **L'interférométrie à grande échelle**

Le SKA (*Square Kilometer Array*) déploiera un réseau de télescopes sur une surface d'un kilomètre carré pour écouter les ondes radio.

Alliant finesse et sensibilité, il devrait permettre l'observation des filaments d'hydrogène froid.

• **L'interférométrie spatiale**

On touche là au graal de l'interférométrie. Des études de faisabilité sont en cours. Mais les difficultés techniques (de lancement en particulier) retardent les projets. L'interférométrie spatiale permettrait d'aller chercher de nouvelles exoplanètes.

• **L'ELT (*Extremely Large Telescope*)**

Ce télescope observera dans l'optique et l'infrarouge, avec un diamètre de 42 m ! Sa mission principale sera la découverte de nouvelles exoplanètes.

Projet européen géré par l'ESO (*European Southern Observatory*), équivalent terrestre de l'ESA (*European Space Agency*) et dont l'implantation géographique n'est pas encore définie.

• **Le JWST (*James Webb Space Telescope*)**

Désigné comme le remplaçant officiel du télescope Hubble, il en sera pourtant assez différent : son orbite sera plus lointaine au point de Lagrange L2 à 1,5 million de km de la Terre. Son imposant diamètre de 6,5 m lui permettra des observations dans les domaines infrarouges proche et moyen, de 1 à 30 micromètres. Il a pour objectif de voir l'Univers très âgé, avant un milliard d'années. C'est un projet international. Il sera mis en orbite par un lanceur européen (le seul capable d'envoyer un si gros satellite dans l'espace) en 2014 et devrait fonctionner pendant une dizaine d'années, sans espoir d'être réparé.

Glossaire

Astrophysique : branche de l'astronomie qui étudie la nature physique, la formation et l'évolution des corps célestes.

Bolomètre : thermomètre à résistance électrique. Un bolomètre est un détecteur très sensible de rayonnement. L'énergie incidente sur le capteur est absorbée, ce qui entraîne un échauffement du bolomètre. L'élévation de sa température modifie sa résistance électrique. Le changement de résistance est converti en un changement de potentiel électrique et mesuré.

Configuration optique d'un télescope : organisation des éléments du télescope (miroirs, lentilles).

Cosmologie : branche de l'astrophysique qui étudie l'Univers en tant que système physique.

Cryoréfrigérateur : système actif de réfrigération permettant d'atteindre de très basses températures, de l'ordre de 300 mK. Contrairement aux cryostats, les cryoréfrigérateurs fonctionnent en circuit fermé.

Cryostat : système passif de réfrigération, fonctionnant sur le principe de l'évaporation d'un fluide. Cette évaporation nécessite un apport d'énergie extérieure – prise sur l'agitation thermique des atomes environnants – et induit donc un refroidissement. L'hélium est le fluide utilisé pour atteindre les températures les plus basses, jusqu'à 3 K. L'inconvénient de ce système est sa durée de vie, limitée par la quantité de fluide disponible.

Exoplanète : planète orbitant autour d'une étoile autre que le Soleil.

Imageur : instrument optique qui permet d'obtenir des images. Caméra par exemple.

Interféromètre : instrument de mesure qui utilise les interférences intervenant entre des ondes cohérentes entre elles. Son avantage en astronomie est de permettre une résolution équivalente à celle d'un miroir de diamètre équivalent à l'écart entre les instruments combinés.

Lentille gravitationnelle : en courbant l'espace, la matière infléchit le cheminement des rayons lumineux. Les images des galaxies lointaines s'en trouvent perturbées. On appelle cet effet « mirage » ou « lentille gravitationnelle » ; il résulte de la relativité générale d'Einstein.

Cette méthode permet également de détecter des exoplanètes de manière indirecte, dans le cas d'un alignement parfait entre deux étoiles (l'une accompagnée d'une planète, plus proche de la Terre). En observant la déviation des rayons lumineux en provenance de la plus lointaine, on peut déduire l'existence de la planète et même calculer sa masse et sa distance à l'étoile.

Matière baryonique : toute la matière composée de particules élémentaires appelées baryons. Les baryons les plus connus sont les protons et les neutrons. Ils sont composés de trois quarks et sont sensibles à l'interaction forte. En grec, *barys* signifie « lourd ».

On ajoute implicitement les électrons à cette liste (bien qu'ils ne soient pas des « baryons » mais des leptons). La matière baryonique compose donc les atomes et, de manière plus générale, la matière ordinaire.

Optique active : technologie qui permet de corriger en permanence (à raison d'une fois toutes les 30 secondes) les défauts optiques du miroir réflecteur d'un télescope. Cette technologie permet d'utiliser des miroirs plus fins (et donc plus larges) ou des miroirs en plusieurs parties. On place le miroir sur un système de multiples vérins commandés par un capteur de planéité de front d'onde et on le déforme.

Optique adaptative : à ne pas confondre avec la précédente. Cette technologie déforme grâce aux mêmes outils les mêmes miroirs, mais à une fréquence bien plus élevée (entre 500 et 1 000 fois par seconde). L'objectif est de corriger les perturbations atmosphériques qui induisent des variations d'indice de l'air qui déforment l'image.

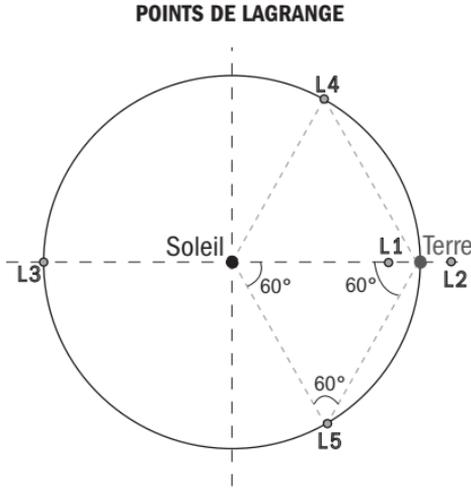
Optique géométrique : branche de l'optique qui s'appuie sur la notion de rayon lumineux.

Perturbation gravitationnelle : un couple étoile-planète exerce réciproquement une force d'attraction gravitationnelle. Si on regarde ce couple selon un axe Terre-planète-étoile, on pourra mesurer les changements de vitesse radiale de l'étoile en utilisant l'effet Doppler et donc détecter l'éventuelle présence de planète à ses côtés. Cette méthode est limitée aux grosses planètes ou aux planètes proches de leur étoile.

Perturbation photométrique : lorsqu'une planète passe exactement entre son étoile et la Terre lors de son orbite, elle occulte légèrement l'étoile et la luminosité qui nous parvient de celle-ci est légèrement modifiée. La mesure de cette modification apporte des indications relativement précises sur la masse et l'orbite de la planète.

Photomètre : instrument servant à mesurer l'intensité (en candelas) et le flux (en lumens) d'un rayonnement lumineux. Les capteurs peuvent être constitués de cellules photoélectriques ou de cellules CCD (*Charged Coupe Device*).

Point de Lagrange 2 : Herschel et, bientôt, le satellite James Webb ont une orbite non pas terrestre mais solaire. Ils tournent autour du Soleil, alignés avec la Terre, à une distance de 1,5 million de km de celle-ci. Ce point particulier fait partie des cinq points de Lagrange. Ces points correspondent à des positions de l'espace où les champs de gravité de deux corps en orbite l'un autour de l'autre (la Terre et le Soleil) se combinent pour compenser exactement la force centrifuge. Trois de ces points sont instables (1 à 3), les deux derniers étant stables.



Spectromètre : appareil destiné à la mesure de la répartition d'un rayonnement en fonction de la longueur d'onde. Il décompose le faisceau lumineux en éléments simples qui constituent son spectre.

Supernova : ensemble des phénomènes conséquents à l'explosion d'une étoile, qui s'accompagne d'une augmentation brève mais très grande de sa luminosité. Deux origines possibles : l'explosion thermonucléaire d'une naine blanche suite à une collision avec une étoile voisine ou l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive quand le cœur de celle-ci est constitué de fer.

Trou noir : objet massif dont le champ gravitationnel est si intense qu'il empêche toute forme de matière ou de rayonnement de s'en échapper (d'où le noir).

Sources : site Herschel du CEA, site CNRS, site Futura Sciences, www.astronomes.com

Ressources

À LIRE

- *TDC Textes et Documents pour la classe*, Scérén CNDP :
 - « L'astronomie », n° 974, 15 avril 2009
 - « Les satellites, à quoi ça sert ? », n° 895, 1^{er} mai 2005.
- Baudet Jean, *Expliquer l'Univers : une histoire de la physique depuis 1900*, Paris, Vuibert, 2009.
- Baudin Frédéric, *Quel âge ont les étoiles ?*, Paris, Éditions du Pommier, 2009.
- Brahic André, Grenier Isabelle, *Lumières d'étoiles. Les couleurs de l'invisible*, Paris, Odile Jacob, 2008.
- Encrenaz Thérèse, Casoli Fabienne, *Planètes extrasolaires : les nouveaux mondes*, Paris, Belin, 2005.
- Léna Pierre, Rouan Daniel, Lebrun François, Mignard François, Pelat Didier, *L'Observation en astrophysique*, Paris, EDP Sciences, 2008.
- Levasseur-Regourd Anny-Chantal (dir.), *Système solaire et Planètes*, Paris, Ellipses, 2009.
- Luminet Jean-Pierre, *Le Destin de l'Univers : trous noirs et énergie sombre*, Paris, Fayard, 2006.

À VOIR

- *Pulsars et Gravitation, le grand radiotélescope de Nançay*, Orléans, CRDP du Centre, 2006. DVD.

À CONSULTER

- <http://herschel.cea.fr/> : le site consacré au satellite Herschel
- <http://irfu.cea.fr/Sap/> : le site du service d'astrophysique du CEA
- www.astronomy2009.fr : le site de l'Année mondiale de l'Astronomie
- www.canalacademie.com/le-defi-de-la-matiere-noire-dans-l.html : une conférence de Françoise Combes au sujet de la matière noire
- www.cite-sciences.fr : le site de l'exposition permanente de la Cité des Sciences et de l'Industrie, Le Grand Récit de l'Univers
- www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig : le site du dossier thématique consacré au Big Bang par le CNRS
- www.exobiologie.fr : le site de la société française d'exobiologie
- www.palais-decouverte.fr : le site du Palais de la Découverte