

40 000 kilomètres, en 24 heures, sa vitesse est d'environ 1 600 kilomètres par heure). Ainsi, la tache d'ombre décrit sur le Globe terrestre, une bande dont la ligne médiane est la ligne de centralité. De part et d'autre de la bande d'ombre, la pénombre touche une zone d'environ 3 000 kilomètres de largeur.

Aujourd'hui, la prédiction des éclipses est faite à l'aide de modèles qui décrivent bien les mouvements de la Terre et de la Lune. On prédit très précisément les dates et les lieux des prochaines éclipses (voir la figure 4). Toutefois, de petites irrégularités du mouvement de la Terre empêchent les prédictions des lieux au-delà de plusieurs siècles (voir *Éclipses et chronologie*, par Denis Savoie, page 78).

Le scénario de l'éclipse

Une éclipse totale est marquée par trois périodes. Durant la première période, la Lune masque partiellement le Soleil, puis, durant quelques minutes, c'est la totalité. Enfin, durant la dernière période, la Lune rend au Soleil son aspect circulaire.

Le premier contact, qui marque le début de l'éclipse, est l'instant où l'on distingue une infime fraction de la Lune devant le Soleil. En pratique, à l'aide d'un filtre solaire, on observe une fine échancrure noire sur la bordure du Soleil. Durant une heure environ, la Lune masque de plus en plus le disque

solaire. Ce changement est essentiellement dû au déplacement orbital de la Lune autour de la Terre. Après que 50 pour cent du Soleil a été masqué, la baisse de luminosité devient sensible, mais lente. Avec la diminution de la surface solaire non masquée, les ombres apparaissent plus contrastées, et les reflets du Soleil sur l'eau sont plus étincelants qu'à l'habitude. La baisse de luminosité fait apparaître le ciel d'un bleu intense et profond.

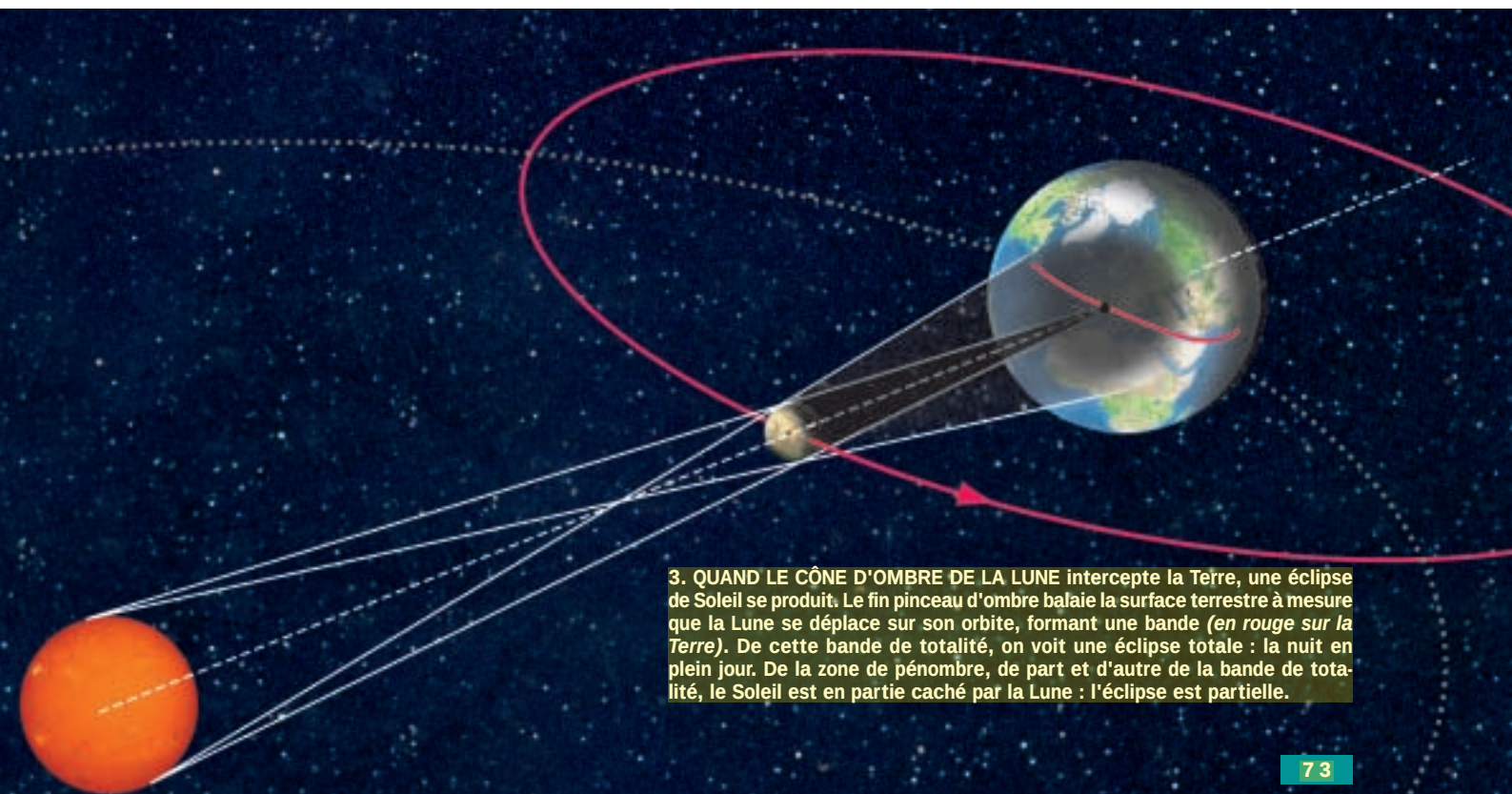
Une à deux minutes avant la totalité, les ombres volantes apparaissent : ce sont des stries sombres et claires qui courent sur le sol (on les distingue mieux sur une grande surface lisse, tel un mur). Ces ombres résultent de la turbulence de la haute atmosphère : lorsque seul un point de Soleil nous éclaire, sa lumière parvient d'une direction bien définie. La direction des rayons lumineux est alors très sensible à la turbulence atmosphérique : le paysage se couvre de moires furtives, analogues aux reflets que l'on perçoit sur le fond d'une piscine agitée par le vent.

Entre 40 et 20 secondes avant la totalité, la lumière émanant du fin croissant solaire est arrêtée par les hauts cratères lunaires, mais de la lumière passe encore à travers les vallées lunaires. Le bord de la Lune ressemble alors à un collier de diamants solaires, nommés grains de Baily, du nom de l'astronome anglais qui décrit le premier ce phénomène, en 1836.

Entre 20 et 10 secondes avant la totalité, venant de l'horizon Ouest, un mur d'obscurité qui s'élève jusqu'au ciel se précipite sur le site d'observation à une vitesse supersonique. L'ombre de la Lune vous enveloppe, c'est l'un des instants les plus spectaculaires d'une éclipse. Cinq à trois secondes avant la totalité, le dernier rayon de lumière fait apparaître un anneau de lumière fantomatique. La chromosphère rose et surtout les protubérances commencent à apparaître. Enfin, la Lune recouvre complètement le disque solaire : c'est le début de la totalité (ou le deuxième contact).

C'est seulement lors de cette phase de totalité qu'il est possible (et même recommandé) de regarder l'éclipse à l'œil nu en toute sécurité, et c'est pendant ces précieux instants que l'on étudie la couronne solaire. Les protubérances, condensations de gaz en mouvement, portées par le champ magnétique solaire, sont alors observables, avec des jumelles par exemple. Ces langues rouges sont souvent visibles juste avant le début et juste après la fin de la totalité, car, au milieu de la totalité, pour des éclipses longues (totalité de plus de cinq minutes), le disque lunaire apparent peut être suffisamment vaste pour masquer la plupart des protubérances.

Dès que la vision est adaptée à la semi-obscurité de la totalité, la couronne apparaît, ressemblant à une fleur aux pétales blancs avec un capitule noir. La couronne est un gaz très chaud



3. QUAND LE CÔNE D'OMBRE DE LA LUNE intercepte la Terre, une éclipse de Soleil se produit. Le fin pinceau d'ombre balaie la surface terrestre à mesure que la Lune se déplace sur son orbite, formant une bande (en rouge sur la Terre). De cette bande de totalité, on voit une éclipse totale : la nuit en plein jour. De la zone de pénombre, de part et d'autre de la bande de totalité, le Soleil est en partie caché par la Lune : l'éclipse est partielle.



(plasma) perturbé dans le champ magnétique solaire. D'une éclipse à l'autre, l'aspect de la couronne varie : au minimum d'activité du cycle solaire de onze ans, la couronne paraît symétrique par rapport à l'axe des pôles solaires, tandis que, lorsque le Soleil est au maximum d'activité, la couronne est irrégulière.

Au milieu de la phase de totalité, le site d'observation est au centre du disque d'ombre créé par la Lune. L'illumination de l'horizon est telle que l'on semble assister à un lever de Soleil sur 360°, comme si le Soleil se levait de toutes les directions en même temps. Le ciel peut-être suffisamment noir pour qu'apparaissent les planètes et les étoiles les plus brillantes. Lorsque la Lune laisse entrevoir un rayon lumineux, c'est la fin de la totalité (troisième contact). Une protection oculaire (filtre) est de nouveau indispensable. Le scénario du premier au deuxième contact se déroule à l'envers du troisième au quatrième contact, instant où le Soleil retrouve son aspect habituel.

Éclipses et physique solaire

Paradoxalement, alors que les éclipses cachent le Soleil, elles révèlent aux astrophysiciens plusieurs aspects de sa physique. C'est grâce aux éclipses que l'on a découvert la chromosphère et la couronne solaire. La couronne solaire, atmosphère externe de notre Soleil, constitue un objet d'étude important, car elle est l'un des principaux acteurs des relations Soleil-Terre ; la météorologie de l'espace, qui examine l'effet de l'activité solaire sur l'espace circumterrestre, nécessite une bonne compréhension des mécanismes physiques qui se déroulent au sein de la couronne, en particulier pour prévenir les dommages aux satellites de télécommunications.

4. LES ÉCLIPSES TOTALES DE SOLEIL des 20 prochaines années. Les lignes en pointillés représentent des trajectoires d'éclipses mixtes, totales sur une partie de leur trajectoire et annulaire sur une autre.

La couronne, un million de fois moins brillante que la photosphère (la surface du Soleil), est difficile à voir. En principe, on devrait l'observer en bloquant la lumière du disque solaire avec son pouce, ou à l'aide d'un coronographe (une sorte de pouce artificiel), mais la lumière diffusée par l'atmosphère terrestre est trop intense pour que la couronne soit entièrement observable. Le «pouce lunaire», offert de temps à autre aux astronomes, est une magnifique occasion d'observer la couronne dans son intégralité.

Les physiciens ont tiré de précieux enseignements des éclipses totales. Même aujourd'hui, alors que les sondes spatiales et les radioastronomes observent en continu la couronne dans des gammes étendues du spectre électromagnétique, une éclipse totale de Soleil permet un instantané de l'intégralité de la couronne solaire, dans le domaine visible, à un coût bien inférieur à celui des expériences spatiales.

Constituée de gaz très peu dense, la couronne solaire est divisée en deux parties : la couronne interne, qui s'étend jusqu'à deux rayons solaires au-dessus du bord, et la couronne externe, qui s'étend au-delà, jusqu'à une dizaine de rayons solaires (le rayon du Soleil est d'environ 700 000 kilomètres). Cette couronne a trois caractéristiques principales : elle est très chaude (plus d'un million de kelvins), elle est structurée, vraisemblablement en raison de la présence d'un champ magnétique, et elle émet

des particules (la couronne est entièrement renouvelée tous les trois jours). Comment la couronne atteint-elle ces températures extrêmes, alors que la surface solaire est à une température de 5 000 kelvins ? Quelle est l'origine des structures et de l'émission de particules sous la forme d'un vent qui se propage jusqu'aux confins du Système solaire ? Telles sont les grandes questions de la physique solaire.

Chauffage par les ondes

Depuis longtemps, les astronomes pensent que le chauffage de la couronne résulte de la dissipation d'ondes magnétohydrodynamiques engendrées dans l'atmosphère solaire. Pour comprendre comment ces ondes sont formées, comment elles se propagent et quels sont les mécanismes de dissipation, les astronomes examinent les émissions de la couronne dans le domaine visible.

La couronne solaire contient quantité d'atomes ionisés. Ces atomes émettent un rayonnement caractéristique, et ces raies révèlent la composition de l'atmosphère solaire. Malheureusement, l'émission dans le domaine visible est dominée par une composante diffuse, dont l'origine est tout autre que l'émission coronale : la composante *F*, visible sous la forme d'une auréole assez blanche, est en fait due à la lumière solaire diffusée sur les petites poussières du milieu interplanétaire.

L'«atmosphère interplanétaire» gêne l'observation de la couronne. Par chance, l'émission de la composante *F* est très homogène et surtout constante dans le temps, de sorte que l'on sait aisément la soustraire. Cette composante retranchée, la couronne de plasma apparaît avec ses riches structures et ses raies peuvent alors être étudiées.

Quand on mesure l'émission d'une raie, on enregistre sa largeur, caractéristique de l'agitation thermique qui règne dans le milieu. À l'aide d'hypothèses sur l'équilibre thermodynamique des ions, on calcule par ailleurs la vitesse d'agitation due à la température. On constate alors que ces raies sont plus larges que ce qu'elles devraient être : autrement dit, une partie de l'agitation des ions de la couronne n'est pas due à l'agitation thermique, mais à un mouvement d'ensemble. Ce mouvement d'ensemble est engendré par des ondes magnétohydrodynamiques qui se déplacent en même temps que le champ magnétique solaire (on nomme ces vitesses «non thermiques»).

Lors d'une éclipse, on étudie les structures formées par ces ondes. La vitesse des ondes magnétohydrodynamiques varie en raison inverse de la densité du gaz où elles se propagent. Aussi, comme la densité de la couronne décroît très rapidement avec l'altitude, la vitesse de ces ondes devrait croître, d'où une augmentation attendue des vitesses non thermiques dans la largeur des raies d'émission. Cette augmentation n'a pas encore été observée, mais, lors de la prochaine éclipse, notre équipe de l'Institut d'astrophysique de Paris tentera de vérifier cette hypothèse.

Comment ces ondes se dissipent-elles? Vraisemblablement en raison de la viscosité magnétique : le plasma

est stratifié en densité, de sorte qu'il y a dissipation par «frottements magnétiques», analogue à la dissipation par frottement mécanique. On ignore encore où le plasma se magnétise, c'est-à-dire quand le rayon des particules qui tournent dans le champ magnétique solaire devient inférieur à la distance moyenne entre deux collisions ; lorsque le plasma est magnétisé, c'est le champ magnétique qui régit le mode de propagation des ondes.

Aucune bonne mesure n'a pu encore être faite lors d'éclipses, et les observations au coronographe de Lyot (à l'Observatoire de Sacramento Peak, au Nouveau-Mexique notamment) ne portent que sur la partie la plus interne de la couronne ; elles indiquent

Éclipse pratique

Le cône d'ombre de la Lune touchera les côtes française le 11 août 1999, à 10h 16 en temps universel (pour avoir le temps légal français, ajouter deux heures) et foncera vers l'Allemagne. Seulement dans la bande de centralité vous verrez l'éclipse totale ; partout ailleurs, elle ne sera que partielle.

Si vous décidez d'aller voir l'éclipse, où vous placer? Plus vous serez prêt de la ligne de centralité, c'est-à-dire de la ligne médiane de la bande de centralité, plus l'éclipse totale sera longue. Évitez de vous trouver trop près du bord de la bande de centralité, car vous risqueriez de manquer la totalité :

en raison des montagnes sur la Lune, le bord de la bande est mal défini. Ainsi, selon les estimations américaines, la ville de Nancy n'est pas dans la bande de centralité, alors que, selon le Bureau des longitudes, elle y est.

Installé sur le lieu d'observation, attendez l'heure du premier contact à partir duquel vous pourrez observer une éclipse partielle. Une heure durant, la Lune voilera petit à petit le Soleil, puis arrivera la phase de totalité.

Durant ces deux minutes, vous pourrez observer la couronne solaire dans toute sa splendeur. Ensuite, le disque solaire réapparaîtra petit à petit.

Tout cela, si le temps le permet ! Les statistiques météorologiques des régions françaises où passe l'éclipse montrent que les chances d'observer celle-ci dans sa phase de totalité ne sont que de une sur deux. Il est évidemment intéressant d'étudier la météo la veille et de se déplacer en conséquence. Attention tout de même à la circulation traditionnellement importante les jours d'éclipse.

En dehors de la bande de centralité, vous verrez une éclipse d'autant plus partielle que vous serez loin de celle-ci. À Paris, l'éclipse ne sera pas totale : le Soleil sera caché à 99,3 pour cent. Plus au Sud, à Marseille par exemple, il ne sera obscurci qu'à 80,6 pour

cent (voir la figure). Si, comme la majorité des gens vous observez l'éclipse sans instruments, n'oubliez pas de vous protéger les yeux (voir l'encadré de la page 76).

Pour ceux de nos lecteurs qui veulent immortaliser le spectacle sur une pellicule, quelques précautions s'imposent. L'obscurité sera importante durant la totalité. Aussi tous les réglages seront-ils anticipés. La mise au point devra être placée sur l'infini, le diaphragme sera réglé sur l'ouverture maximale ; le flash est bien entendu inutile.

Avec des objectifs standards, on devra se contenter de photographies d'ambiance. En revanche, avec des téléobjectifs dont la focale varie entre 105 et 800 millimètres, il est possible de réussir de splendides clichés de la couronne solaire. On opérera avec un film de sensibilité comprise entre 200 et 800 ISO, avec un temps de pose compris entre une seconde et un huitième de seconde, suivant l'ouverture de l'objectif. Pour des temps de pose aussi longs, l'appareil photographique devra être fixé sur le sol ou installé sur un trépied ; un déclencheur souple réduira également le «bougé».

Enfin, ceux qui disposent d'un caméscope pourront réaliser une vidéo de l'éclipse. Le caméscope sera placé sur un trépied stable. Durant les phases partielles, on prendra soin de protéger le capteur de la caméra CCD à l'aide d'un filtre placé devant l'objectif (un verre de soudeur, par exemple).

Durant la totalité, les caméscopes dont le seuil de sensibilité est faible (inférieur à deux lux) seront favorisés car le phénomène est faiblement lumineux. Le zoom sera réglé de manière que la couronne solaire apparaisse entièrement dans le champ (entre 8 et 16 fois). On n'oubliera pas d'ôter le filtre !

