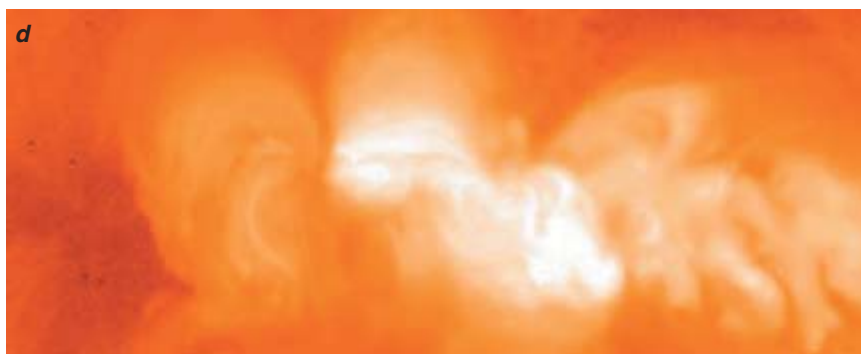
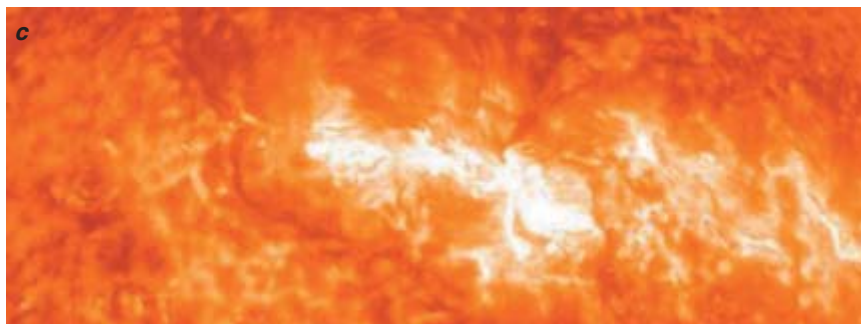
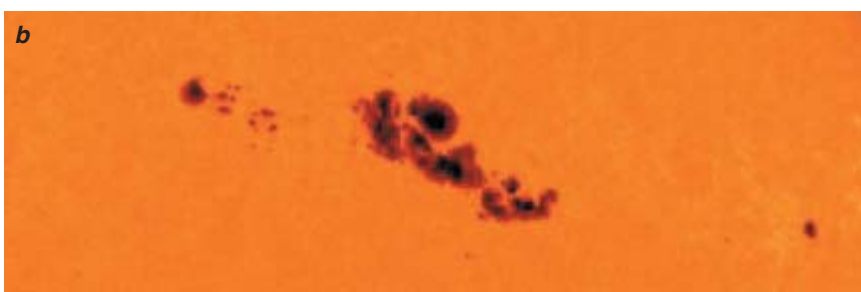
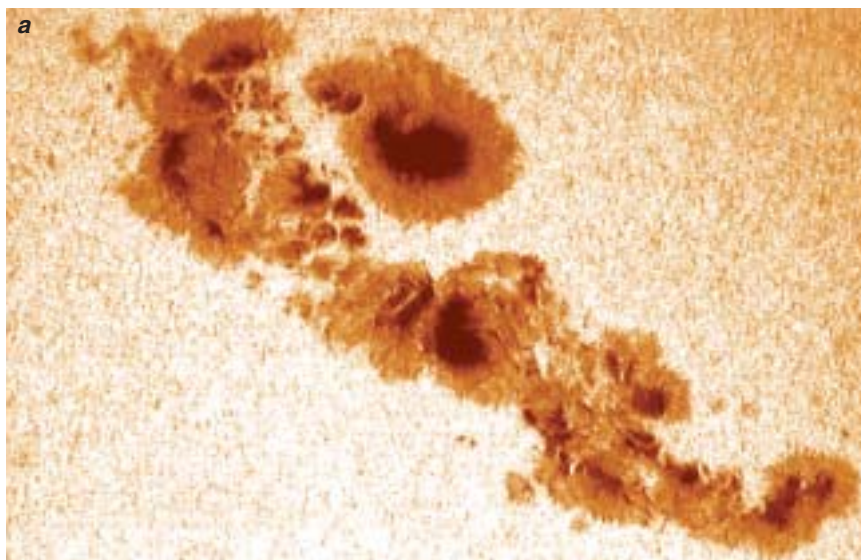


efficace aux pôles, les particules solaires pénètrent plus aisément dans les régions polaires. Les doses reçues à bord des avions ou des stations spatiales (la station internationale est en orbite basse, à 400 kilomètres de la Terre), ne sont notablement accrues en cas d'éruption solaire que pour les hautes latitudes.

Les méfaits ne sont pas seulement biologiques : une partie de l'électronique embarquée à bord des satellites, tels les microprocesseurs, subit des interactions qui peuvent non seulement être la source d'erreurs de calcul, mais aussi endommager les circuits. La dimension des composants diminue à mesure que leur nombre augmente (d'un facteur dix tous les sept ans), les rendant toujours plus sensibles aux rayonnements. De plus, le coût des composants spéciaux (qui résistent aux rayonnements) étant important, les industriels cherchent à en diminuer le nombre. Lors des lancements de satellites, des éléments essentiels à la réussite du tir et de la mise en place du satellite, tels que la centrale d'inertie du lanceur et les capteurs solaires et stellaires, peuvent être perturbés par les particules énergétiques issues des éruptions.

En ce qui concerne les avions, qui dépendent aujourd'hui de l'électronique embarquée, les constructeurs se préoccupent aussi des effets néfastes des particules solaires sur les microprocesseurs et sur leurs mémoires numériques. Au sol, en cas de très grande éruption, des effets néfastes sur les ordinateurs ne sont plus à exclure en raison de la miniaturisation des composants électroniques.

Une troisième source de perturbation de l'environnement par le Soleil est due aux éjections coronales qui accompagnent fréquemment les éruptions. Le nuage de plasma éjecté perturbe le vent solaire, un flux permanent de particules beaucoup moins rapides que celles évoquées précédemment. L'éjection coronale parcourt la distance Soleil-Terre en quelques jours et déclenche les orages géomagnétiques et les aurores polaires. Cette matière éjectée de la couronne n'est pas nécessairement liée à des phénomènes éruptifs visibles dans le domaine optique. Quand leur vitesse est suffisante, ces nuages sont précédés d'une onde de choc capable, elle aussi, d'accélérer des particules (voir l'article Éjections coronales et tempêtes spatiales, par James Burch, page 46).



SOHO-MIDJET Consortiums, YOHKOH/SXT Project

2. CERTAINS GROUPES DE TACHES SOLAIRES (a) sont le signe avant-coureur d'une éruption solaire. Ce groupe (repris sur la photographie b) a été photographié le 29 mars 2001, quelques jours avant l'éruption importante du 2 avril. Sur la photographie en rayonnement visible émis par la photosphère (b), les taches apparaissent en noir. La photographie du rayonnement ultraviolet (c) émis par des couches supérieures de l'atmosphère solaire (la chromosphère et la région de transition avec la couronne, à quelques centaines de milliers de degrés) a été prise par le satellite européen SOHO ; on y observe les boucles de champ magnétique à moyenne échelle qui surplombent les taches. Enfin la photographie en rayons X (d) a été prise par le satellite japonais YOHKOH ; elle montre les structures des boucles de plasma (à quelques millions de degrés) qui circulent au-dessus du groupe de taches, à plus grande échelle (les photographies b, c et d ont été prises exactement sur la même région).

Structure et dynamique du champ magnétique solaire : la magnétohydrodynamique

Comme on ne connaît pas précisément la structure du champ magnétique de la couronne solaire, où les éruptions se déclenchent, on la modélise à partir des données enregistrées dans la photosphère. Selon les hypothèses de calcul, on obtient des modélisations plus ou moins précises.

Les tubes de champ magnétique issus de la zone interne de convection, sont comprimés et malmenés par le fluide turbulent qui circule dans le Soleil. Les mouvements internes les font remonter vers la surface d'où ils émergent dès qu'une instabilité leur en donne l'occasion. Ces tubes de champ magnétique apportent avec eux du flux magnétique dans une région où des taches solaires sont déjà présentes, ou bien ils créent des taches solaires dans une région qui en était auparavant dépourvue : ces dernières sont les traces observables des tubes de champ magnétique.

Ces tubes de champ magnétique véhiculent des courants électriques importants ; ils percent la photosphère, et débouchent dans le milieu externe très dilué, où ils occupent tout l'espace offert. Les mouvements de la photosphère exercent des contraintes sur le champ magnétique, notamment aux pieds des lignes de champs qui subissent des forces de cisaillement et de torsion. À chaque instant, le champ magnétique tente de trouver un état d'équilibre compatible avec ces diverses contraintes, et accumule également de l'énergie d'origine mécanique. Comment cette évolution aboutit-elle au déclenchement d'un phénomène éruptif violent ?

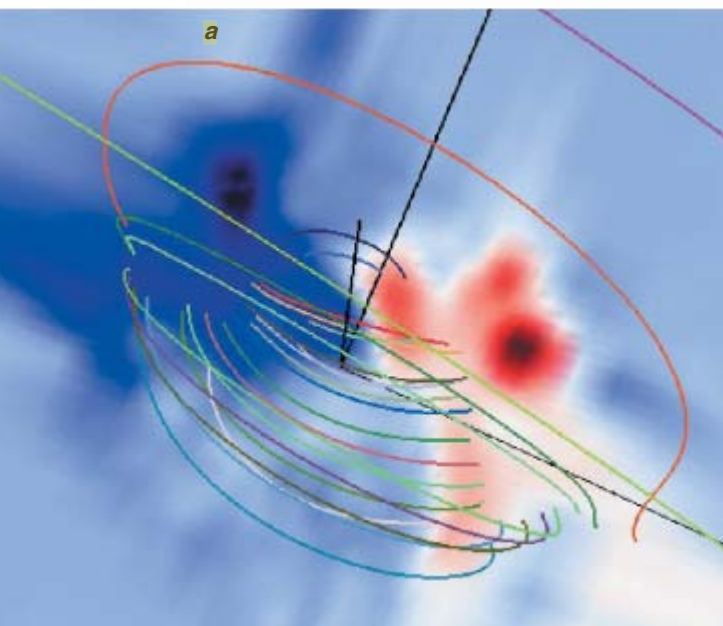
Pour caractériser la phase prééruptive dans les modélisations les plus simples, les astrophysiciens négligent le courant électrique et les composantes du champ magnétique contenues dans le plan de la surface du Soleil. On simule le champ magnétique uniquement par sa composante dirigée vers l'observateur. On obtient alors une

configuration magnétique simple (voir la figure a), dont l'énergie minimale ne peut expliquer l'énergie pourtant libérée dans une éruption.

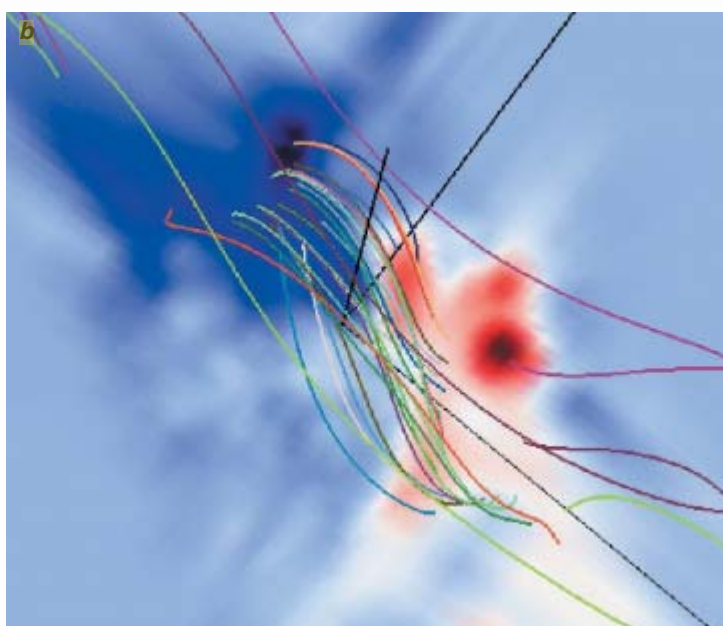
Le perfectionnement suivant consiste à considérer les trois composantes du champ magnétique à la surface du Soleil, qui apportent avec elles le courant électrique débité par la photosphère (la région qui produit la quasi-totalité du rayonnement visible). On obtient ainsi une meilleure approximation des lignes de champ (voir la figure b) qui s'étirent d'une tache (la rouge) à une autre (la bleue). Ces lignes de champ, plus élaborées, porteuses du courant, ont une forme de S, dont la réalité est confirmée par l'observation de l'émission des rayonnements X des régions qui ont donné de grosses éruptions : les images de ces émissions X ont la même forme en S que les lignes de champ, et elles coïncident. Contrairement au modèle précédent, ce dernier permet l'évaluation du réservoir énergétique de la configuration.

Ces modélisations offrent des modèles statiques plus ou moins élaborés du champ magnétique solaire avant une éruption. Or l'enjeu reste de trouver des modèles prévisionnels, de découvrir une configuration particulière du champ qui annoncerait de façon fiable qu'une éruption de telle intensité aura lieu à tel endroit, à tel moment. Pour améliorer la fiabilité des prévisions et élaborer un modèle dynamique, un des paramètres introduits est le champ électrique, négligé dans les modèles précédents. Dans ce nouveau modèle, la magnétohydrodynamique, on applique la mécanique des fluides électriquement conducteurs à l'évolution du champ magnétique solaire.

Dans ce cadre, les astrophysiciens ont tenté de simuler l'évolution du champ magnétique solaire en imposant à diverses configura-



Le champ magnétique solaire est modélisé de diverses façons. La plus simple (a) correspond à une absence de courant électrique et à une énergie minimale. Les lignes de champ partent de la tache rouge pour se diriger vers la bleue (le champ est modélisé seulement par sa composante dirigée vers la Terre). Quand on affine le modèle en tenant compte des trois composantes du champ magnétique à la surface du Soleil, les lignes de champ prennent la forme d'un S (b). L'approxi-



mation des lignes de champ qui courent d'une tache à l'autre, à un instant donné, est meilleure. On améliore encore le modèle en considérant non plus la modélisation statique des lignes de champ, mais leur évolution dynamique. Avant une éruption, on constate la présence de boucles de lignes de champ qui relient deux taches et également d'un tube de flux magnétique spiralé (c). Quand se produisent des perturbations de cet état en équilibre instable, l'énergie magnétique