

# Le quatrième miroir, déformable, comporte 5300 actionneurs

## BIBLIOGRAPHIE

S. Ramsay et al., **The ESO Extremely Large Telescope instrumentation programme**, *Advances in Optical Astronomical Instrumentation 2019*, article 1120303, 2020.

**The science case for the European Extremely Large Telescope : The next step in mankind's quest for the universe**, ESO, septembre 2010 : [www.eso.org/public/products/books/book\\_0003](http://www.eso.org/public/products/books/book_0003)

**The E-ELT construction proposal**, ESO, décembre 2011 : [www.eso.org/public/products/books/book\\_0046](http://www.eso.org/public/products/books/book_0046)

**Programme de construction de télescopes géants aux États-Unis** : [www.noao.edu/us-elt-program/overview.php](http://www.noao.edu/us-elt-program/overview.php)

En plus des perturbations que nous venons de décrire, l'atmosphère ajoute d'autres effets non désirés. Les turbulences et la répartition irrégulière de la température provoquent des modifications locales de l'indice de réfraction : les rayons lumineux provenant d'objets lointains sont alors légèrement déviés, de quoi déformer l'image qui se forme dans le télescope. C'est principalement pour éviter cet effet qu'on met en orbite dans l'espace des télescopes, comme *Hubble* ou le futur télescope *James-Webb* de la Nasa, de l'Esa et de l'Agence spatiale canadienne.

Là encore, cet effet, qui rendrait inutile l'effort de construire un télescope géant, du moins en ce qui concerne le pouvoir de résolution, peut être compensé. La solution se trouve du côté des techniques dites « d'optique adaptative » : il s'agit essentiellement d'utiliser des miroirs dont la surface est déformable de façon à contrebalancer les distorsions dues à l'atmosphère. Bien que ces techniques existent déjà et soient mûres, leur application à un miroir de 39,3 mètres constitue un défi hors de portée. Ainsi, dans l'ELT, c'est le quatrième miroir qui est déformable. Il comporte 5300 actionneurs et mesure 2,4 mètres de diamètre pour seulement 2 millimètres d'épaisseur. Ce miroir est l'un des éléments les plus cruciaux et délicats de l'ELT.

## DES LASERS DANS LE CIEL

L'origine de ces techniques d'optique adaptative remonte au milieu du xx<sup>e</sup> siècle, mais elles n'ont été appliquées à l'astronomie qu'à partir des années 1990 avec l'augmentation de la puissance de calcul informatique. On les applique désormais aussi en ophtalmologie et, plus récemment, en imagerie cellulaire. Différents observatoires ont développé ces techniques, parmi lesquels l'ESO. L'un des télescopes de 8,2 mètres qui composent le VLT est équipé d'un miroir déformable pour de l'optique adaptative. Toutefois, jusqu'à il y a peu, cette technique n'était utilisable que pour étudier certaines régions précises du ciel : celles qui contenaient une étoile assez brillante pour servir de référence. Cette limitation a été dépassée grâce au développement des « étoiles laser ».

De quoi s'agit-il ? Pour que les techniques d'optique adaptative fonctionnent, il faut en permanence prendre des images d'objets de référence, les analyser et engendrer ainsi les commandes à envoyer aux actionneurs pour déformer les miroirs et corriger l'image. Puisque l'atmosphère évolue très vite, le système de contrôle doit être lui aussi très rapide. Mais pour cela, il faut que les étoiles de référence soient suffisamment brillantes, ce que l'on ne trouve hélas pas dans la plupart des régions du ciel. Pour résoudre le problème, on crée des étoiles artificielles en tirant divers faisceaux laser. Ces derniers excitent la couche de sodium gazeux se trouvant à 80 kilomètres d'altitude dans la mésosphère, ce qui produit des points lumineux dont l'éclat équivaut à celui d'une étoile naturelle.

L'ELT devrait être équipé de huit lasers de ce type afin de produire autant d'étoiles artificielles. Ces lasers de grande puissance ont été développés et brevetés par l'ESO. Avec l'aide de partenaires industriels, l'ESO a optimisé leur production pour les adapter aux besoins spécifiques de l'ELT.

## DÉFIS ET RÉCOMPENSES

La construction de l'ELT, bien qu'elle ait son lot de problèmes inhérents à des projets de cette envergure, se déroule jusqu'ici comme prévu. En ce qui concerne les différentes parties du télescope, les principales difficultés se concentrent en ce moment autour du miroir primaire et du quatrième miroir, celui de l'optique adaptative. Du point de vue global, la principale difficulté sera le maintien des miroirs dans les bonnes positions et les bonnes formes à chaque instant. C'est là une exigence essentielle pour obtenir une image au plan focal libre de toute aberration. Sans cela, tout l'intérêt d'avoir un télescope géant sera perdu.

Que nous réserve le plus grand œil de la planète ? Les premières découvertes dépendront dans une large mesure de l'ordre selon lequel les différents instruments, qui ont chacun des qualités spécifiques, arriveront à l'observatoire. Peut-être concerneront-elles les galaxies, les planètes ou les trous noirs. Toutefois, celui qui aurait le plus d'impact, bien que la perspective en soit plus éloignée dans le temps, serait d'obtenir l'image d'une planète semblable à la Terre en orbite autour d'une étoile de type solaire.

L'ELT est une machine extrêmement complexe qui, tout en pesant plus de 3 600 tonnes et en étant aussi haute qu'une cathédrale, devra viser des objets stellaires avec une précision de quelques millièmes de degré et fournir des images d'une qualité exceptionnelle à différents instruments scientifiques. Ces derniers sont eux-mêmes des machines gigantesques dont la conception est techniquement très délicate. Le gant est relevé. ■





Ces panicules de diverses variétés de riz sont conservées et étiquetées après la récolte au conservatoire Basudha, fondé en Inde par l'auteur.

© Zoé Savitz

## L'ESSENTIEL

> Avant les années 1960, l'Inde possédait 110 000 riz indigènes aux caractéristiques diverses, mais 90 % ont disparu des cultures aujourd'hui.

> Seules quelques variétés à hauts rendements poussent dans les champs, nécessitant des intrants et ayant de médiocres performances dès que les

conditions environnementales sont défavorables.

> Cependant, Vrihi, un réseau de banques de semences, régénère et documente les riz traditionnels afin de les rendre aux paysans indiens.

## L'AUTEUR



DEBALI DEB  
fondateur de la ferme  
Basudha et de la banque  
de semences de riz Vrihi,  
en Inde

# Sauver les riz traditionnels indiens

En Inde, certaines variétés indigènes de riz résistent aux inondations, aux sécheresses et à moult autres catastrophes. Reste à en relancer la culture...

Un jour de l'été 1991, après avoir passé des heures à étudier la biodiversité des bois sacrés du sud du Bengale-Occidental (État de l'est de l'Inde) dans la chaleur brûlante, je me suis dirigé vers la hutte de Raghu Murmu, un jeune homme du peuple des Santals. Raghu m'a accueilli à l'ombre d'un énorme manguier, pendant que sa fille allait chercher de l'eau fraîche et des sucreries à base de riz. Tandis que je les savourais, j'ai remarqué que l'épouse de Raghu, enceinte, buvait un liquide rougeâtre. Mon hôte m'expliqua qu'il s'agissait d'amidon obtenu en cuisant du bhutmuri, un riz que l'on nomme aussi « tête de fantôme », peut-être à cause de son enveloppe sombre... Cet amidon « restaure le sang des femmes qui n'en ont pas assez pendant la grossesse et après l'accouchement », précisa Raghu. J'en déduisis que l'amidon de bhutmuri était censé guérir l'anémie des femmes enceintes et en *post partum*. Une autre variété de riz, le paramai-sal – le « riz de longévité » – favorise pour sa part la croissance des enfants, me signala aussi Raghu.

Plus tard, j'ai établi que le bhutmuri fait partie des quelques variétés indigènes de riz d'Asie du Sud riches en fer et en certaines vitamines B. Le paramai-sal est pour sa part riche en antioxydants, en micronutriments et en amidon digeste, que le corps convertit facilement en énergie. Au moment de ma rencontre avec Raghu, ces variétés rares de riz étaient des nouveautés pour moi, comme l'étaient leurs noms évocateurs et leurs usages médicinaux traditionnels. Une fois rentré chez moi à Calcutta, j'ai réalisé une recherche bibliographique sur la diversité génétique du riz indien, et compris la chance que j'avais eue de rencontrer Raghu. Les petits riziculteurs comme lui, cultivant et appréciant la valeur des riz indigènes, sont en effet aussi menacés que les variétés de riz elles-mêmes.

Au cours des années qui ont suivi, je me suis familiarisé avec les nombreuses variétés indigènes indiennes. Leurs propriétés sont étonnamment diverses et utiles : certaines résistent aux inondations, à la sécheresse, à la salinité ou aux attaques de parasites ; d'autres sont riches en vitamines ou en >

> minéraux précieux; d'autres encore ont des couleurs, des goûts ou des arômes plaisants, qui expliquent leur rôle dans les cérémonies religieuses traditionnelles. En fait, collecter, régénérer, puis partager avec les riziculteurs ces variétés rares, mais précieuses, est devenu la mission de ma vie!

*Oryza sativa*, riz cultivé en Asie, est le résultat de siècles de sélection d'espèces sauvages de riz pendant le Néolithique, processus que Charles Darwin nommait «sélection artificielle». Des indices archéologiques et génétiques suggèrent que la sous-espèce *Oryza sativa indica*, qui constitue la presque totalité du riz cultivé sur le sous-continent indien, était déjà cultivée sur les contreforts de l'Himalaya oriental il y a de 7000 à 9000 ans. Au cours des millénaires de domestication et de culture qui ont suivi, les riziculteurs ont créé tout un spectre de riz adaptés à divers sols, topographies et microclimats et répondant à des besoins culturels, nutritionnels ou médicaux spécifiques.

## UN TRÉSOR PERDU DE BIODIVERSITÉ

Selon l'expert indien du riz Radhey Richharia, les paysans indiens cultivaient plus de 140 000 variétés de riz jusque dans les années 1970. Si l'on tient toutefois compte des synonymes – c'est-à-dire des variétés ayant plusieurs noms régionaux –, ce chiffre se réduit à 110 000 variétés distinctes environ. Cependant, comme je l'ai constaté en menant mon enquête bibliographique, la biodiversité du riz indien a énormément diminué depuis la Révolution verte.

De quoi s'agit-il? À la fin des années 1960, l'Institut international de recherche sur le riz – ou Irri pour *International rice research institute* –, une organisation non gouvernementale (ONG) basée aux Philippines, a fourni au gouvernement indien plusieurs variétés de riz à haut rendement. De fait, ces variétés de riz produisent des quantités substantielles de grains, à condition de leur fournir assez d'eau, d'engrais et de pesticides. De concert avec les agences internationales de développement, l'Irri a encouragé le remplacement dans les champs indiens des variétés indigènes par ces souches importées. Parfois imposés, toujours largement promus, les nouveaux riz ont vite largement supplanté les riz traditionnels.

À la fin des années 1970 et au début des années 1980, les chercheurs de l'Irri ont recensé au Bengale-Occidental 5556 variétés indigènes et en ont recueilli 3500 afin de constituer une banque de gènes. En 1994, ne trouvant aucune documentation sur les variétés indigènes survivantes dans l'État, j'ai lancé ma propre enquête. Achevée en 2006, elle montre que 90% des variétés indigènes documentées ne sont plus cultivées. Il est en fait vraisemblable que pas

plus de 6 000 variétés de riz subsistent dans les champs indiens. La situation est similaire au Bangladesh: entre 1979 et 1981, l'institut de recherche sur le riz de ce pays a répertorié 12479 variétés, mais selon une étude récente, pas plus de 720 variétés indigènes sont encore cultivées dans le delta du Gange.

Lorsque j'ai commencé à mesurer l'étendue de cette stupéfiante perte de biodiversité sur le sous-continent indien, j'ai été choqué en tant que biologiste et en tant que citoyen engagé. Je me suis demandé pourquoi les institutions agricoles ne s'inquiétaient pas de l'érosion génétique de la plus importante céréale de la région. Depuis la Grande Famine d'Irlande des années 1845 à 1849, le désastre que peut entraîner une trop grande baisse de la diversité génétique d'une culture devrait pourtant être clair!

L'Irish Lumper, la variété de pomme de terre la plus cultivée en Irlande au XIX<sup>e</sup> siècle, était peu résistante au mildiou (*Phytophthora infestans*). En 1846, ce microorganisme anéantit les trois quarts de la récolte, ce qui entraîne une pénurie de nourriture et de semences pendant plusieurs années. La famine tua alors au moins un million d'Irlandais et en poussa au moins un autre million à l'immigration vers l'Australie et l'Amérique du Nord. La leçon de cet épisode est que l'absence de diversité culturelle rend une espèce vulnérable aux parasites

Une paysanne indienne transplante des pousses de riz dans l'une des rizières de la ferme Basudha.



et aux maladies; en d'autres termes, les monocultures sont désastreuses à long terme pour la sécurité alimentaire. De fait, dans le sillage de la Révolution verte, le charançon du riz (*Dicladyspa armigera*) et la cicadelle brune (*Nilaparvata lugens*), qui n'avaient jamais posé de grave problème, ont dévasté les rizières de plusieurs pays.

Aujourd'hui, des monocultures étendues sur de vastes espaces sont autant de banquets pour certains parasites. Les riziculteurs arrosent leurs champs de pesticides pour tenter de les éliminer, ce qui aboutit à tuer les ennemis naturels de ces parasites... Le résultat net est une augmentation de la diversité et de l'abondance des parasites, ce qui fait rouler les épandeuses de pesticides. L'uniformité génétique – en particulier celle des variétés sélectionnées pour leur rendement élevé et mises en culture au cours de la Révolution verte – signifie aussi que les plantes manquent de ressources pour résister aux conditions difficiles, comme les pluies insuffisantes ou tardives, les inondations saisonnières, ou encore les tempêtes qui inondent les champs côtiers d'eau salée. Cette fragilité des cultures rend les riziculteurs pauvres plus vulnérables aux fluctuations environnementales, par exemple quand ils n'ont pas les moyens de s'acheter une pompe d'irrigation...

La disparition des variétés indigènes entraîne en outre le dépérissement de tout le savoir associé à leur culture. Les riziculteurs traditionnels savent par exemple distinguer les variétés en observant leur période de floraison, la couleur de la gaine foliaire (partie de la feuille embrassant la tige de la plante), l'angle de la feuille paniculaire (la dernière feuille qui sous-tend l'inflorescence), la longueur de la panicule (l'inflorescence), ainsi que la taille, la couleur et la forme du grain (voir l'encadré page 47). Ils se servent de ces traits et d'autres pour repérer et éliminer toutes les plantes «hors-type» (se distinguant par un ou plusieurs caractères) afin de maintenir la pureté génétique de la variété. Aujourd'hui, cependant, la plupart des riziculteurs d'Asie du Sud ont un fournisseur de semences, ce qui évite d'avoir à maintenir la pureté de ses propres variétés. Lorsqu'une variété locale n'est plus disponible, la connaissance liée à ses utilisations agronomiques et culturelles s'efface de la mémoire collective. Dès lors, des stratégies millénaires de mise à profit de la biodiversité dans la lutte contre les parasites et les maladies sont supplantées par les conseils des marchands de pesticides, non sans conséquences pour la biodiversité, la qualité des sols et de l'eau, et la santé humaine.

La Révolution verte et, plus largement, la modernisation de l'agriculture ont aussi eu des conséquences sociales et économiques graves. L'augmentation du coût des intrants (semences,

engrais, pesticides, ...) et du carburant pour pompes d'irrigation oblige les riziculteurs indiens à emprunter, souvent à des prêteurs privés. Combiné avec la chute des prix agricoles, l'endettement qui en résulte a provoqué de nombreuses ventes précipitées de terres et une épidémie de suicides parmi les paysans. Au contraire, durant mes décennies de travail avec des cultivateurs autochtones continuant à planter des riz et des millets indigènes dans leurs exploitations marginales, je n'ai été confronté à aucun cas de suicide.

En 1996, ayant déjà 152 variétés de riz dans ma collection, je me suis tourné vers la station de recherche sur le riz de la direction de l'agriculture du Bengale-Occidental, où tout le matériel génétique des riz traditionnels indiens est censé être conservé. Non seulement la station a refusé d'accueillir et de conserver les semences que j'avais collectées, mais le directeur m'a reproché de poursuivre l'objectif «scientifique et rétrograde» de faire revivre les variétés oubliées. Insister pour les cultiver signifierait «revenir à l'âge de l'homme des cavernes» et condamner les riziculteurs à une faible productivité et à une pauvreté permanente, selon lui. Lorsque j'ai rappelé qu'aucune des variétés à haut rendement ne peut survivre dans les champs arides sans irrigation, dans les champs de riz submergés ou dans les fermes en sols salins, il m'a assuré que l'ingénierie génétique aboutirait bientôt aux meilleures variétés pour ce type marginal d'exploitation, de sorte que je devrais plutôt laisser les agronomes experts s'occuper de cette question.

## UNE BANQUE DE SEMENCES DE RIZ INDIGÈNE

Écologue de formation, je m'étais spécialisé dans les structures et les fonctions des écosystèmes, et je travaillais alors au bureau régional oriental de la branche indienne du Fonds mondial pour la nature (WWF). À l'époque, cette ONG et d'autres œuvraient surtout à la conservation des animaux emblématiques comme le tigre. Les céréales cultivées ne faisant pas partie de la «faune sauvage», on ne s'intéressait pas à leur protection. Les organismes de recherche ne s'en inquiétaient pas non plus, car aucune subvention n'était prévue pour aider à la conservation de variétés de plantes cultivées.

La seule option qui me restait était de faire cavalier seul. En 1996, j'ai donc démissionné de mon travail et créé dans un village du Bengale-Occidental une banque de semences de riz indigène qui est aussi un centre d'échange pour riziculteurs. En 1997, je l'ai nommée Vrihi, ce qui signifie en sanskrit «diffusion du riz». Pendant les premières années, j'ai financé cette activité à l'aide de mes économies et du soutien considérable de Navdanya, une ONG basée à New Delhi dédiée à la protection de la ➤



© Zoé Savitz

> biodiversité et au développement de l'agriculture biologique; Navdanya collecte en particulier les semences rares de tout le pays afin de les distribuer gratuitement aux riziculteurs dans le besoin. Depuis 2000, cependant, les dons d'amis et de sympathisants constituent l'essentiel de notre financement.

En 1999, le département des forêts m'a envoyé étudier la biodiversité du nord du Bengale-Occidental et j'en ai profité pour explorer les champs de la région. Un jour, après six heures de voyage en bus et à pied vers le village isolé de Lataguri, je suis tombé sur l'agni-sal. Cette variété de riz est en danger critique d'extinction, c'est-à-dire, selon ma définition de cette notion, qu'elle n'est plus cultivée que dans une unique exploitation. Le grain de ce riz était de couleur rouge feu – d'où son nom *agni*, signifiant «feu» – et sa tige assez solide pour résister aux tempêtes. La saison suivante, j'en ai donné des semences à un riziculteur cherchant un riz capable de pousser dans sa ferme des hauts plateaux, balayée par des vents violents. Il est revenu l'année d'après, avec un sourire de gratitude pour la bonne récolte obtenue malgré un cyclone ayant dévasté les exploitations de ses voisins. Un fonctionnaire du département de l'agriculture du district l'a cependant persuadé l'année suivante de remplacer l'agni-sal par un riz à haut rendement, ce qui a fait disparaître ce riz de notre réseau. Je me suis donc précipité à Lataguri à la recherche d'un autre échantillon. Hélas, mon donneur initial était mort l'année précédente et son fils avait abandonné ce riz. À ma connaissance, l'agni-sal a disparu aujourd'hui.

### LE POUVOIR DES SNORKEL

À la même époque, un autre incident m'a persuadé qu'il fallait faire plus que collecter et redistribuer les semences anciennes. Les riziculteurs traditionnels des basses terres indiennes cultivaient deux types de riz résistant aux inondations. L'un d'eux acquiert une tige de plus en plus grande au fur et à mesure de l'élévation du niveau de l'eau. Régie notamment par les gènes *Snorkel 1* et *Snorkel 2*, situés sur le chromosome 12, cette capacité d'«élongation de la tige» sous l'eau est aussi présente dans les variétés traditionnelles lakshmi dighal, jabrah, pantara et rani kajal. L'autre type résiste à une immersion prolongée dans les eaux de crue. L'un des gènes régissant la tolérance à la submersion est *Sub1*, présent dans plusieurs variétés indigènes bengalis.

En juin 1999, dans un district du sud du Bengale-Occidental, une crue soudaine a détruit toutes les récoltes de riz. Ma banque de semences ne disposait d'aucune variété tolérante la submersion, mais je savais que l'Irri et le Bureau indien des ressources phytogénétiques, à New Delhi, en possédaient plusieurs

dizaines. J'ai donc écrit aux deux institutions, leur demandant de m'envoyer 10 à 20 grammes de ces semences afin de me permettre d'aider les riziculteurs en détresse, mais je n'ai même pas reçu un accusé de réception de l'une ou l'autre. Et de fait, à ma connaissance, aucun riziculteur, dans aucun pays, n'a jamais obtenu de semences auprès de ces nobles banques de gènes, même si elles ont constitué leurs collections à partir des contributions des paysans.

En revanche, les banques de gènes mettent leurs collections à la disposition des semenciers pour leurs programmes d'hybridation et de prises de brevet. Une estimation de l'Institut international de recherche sur les politiques alimentaires indique qu'en 1996, environ trois quarts des rizières américaines ont étéensemencées avec du matériel provenant des collections de l'Irri. Et en 1997, l'Office américain des brevets et des marques a accordé à la société texane RiceTec le brevet d'une portée la plus grande jamais accordée sur un riz indigène. Il s'agit d'une souche de basmati, obtenue à partir de parents issus de la collection de l'Irri

## La tige d'un riz résistant aux inondations s'allonge avec l'élévation du niveau de l'eau

et originaires d'Asie du Sud. L'Irri, qui est censé mettre sa collection à disposition des riziculteurs du monde entier, a lui-même déposé en 2014 une demande de brevet international sur le gène *Spike*, découvert dans la variété indonésienne de riz daringan. Le secrétariat du Traité international sur les ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture (Tirpaa) examinait la légitimité de breveter un tel gène quand l'Irri a abandonné son projet de breveter *Spike*, qui s'était entretemps révélé peu intéressant.

Les grandes banques de semences ont le désavantage d'être géographiquement mais aussi socialement loin des riziculteurs, mais là ne s'arrêtent pas leurs inconvénients: le long isolement de leurs semences diminue leur valeur. Ces dernières sont en effet séchées et placées à - 20°C, ce qui permet de les conserver jusqu'à trente-cinq ans. Figées dans le temps, elles sont >

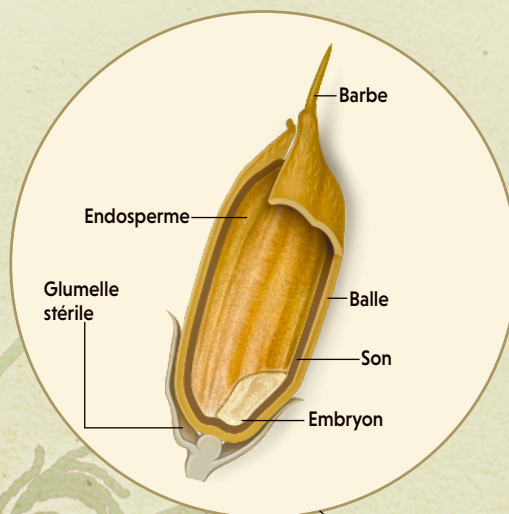
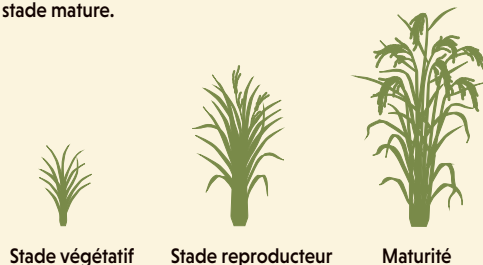
# LE TRÉSOR DES VARIÉTÉS DE RIZ

**L**es paysans d'Asie du Sud savent distinguer des milliers de variétés de riz à partir de l'examen attentif de plus de 50 caractéristiques. Certaines sont temporelles, telles la date de floraison ou encore la période de maturation ; d'autres, tout aussi importantes, sont physiques, telles la longueur, la taille et la couleur de la panicule (l'inflorescence portant les épillets) ; l'angle de la feuille paniculaire ; la longueur, l'épaisseur et la couleur de la tige ; la taille, la forme et la couleur des grains, la couleur des nœuds, etc. Ce savoir-faire, aussi menacé que les variétés elles-mêmes, permet aux paysans de choisir les bonnes variétés à employer dans des niches écologiques différentes, comme les terres arides pentues, les plaines inondables, ou celles qu'il convient d'utiliser à des fins nutritionnelles, culturelles ou médicales.

Les variétés résistantes aux inondations tolèrent jusqu'à deux semaines de submersion ou allongent leurs tiges en fonction de la montée des eaux, ce qui maintient leurs panicules au sec. Des gènes spécifiques régissent ces propriétés, comme *Sub1* (submersion), *Snorkel 1* et *Snorkel 2* (élongation de la tige).

## STADES DE DÉVELOPPEMENT

Les riziculteurs distinguent aussi les variétés à partir de caractéristiques n'apparaissant qu'à certaines étapes du cycle de vie des plantes. Ils observent par exemple la couleur et la pilosité de la feuille pendant le dernier stade du cycle végétatif ; le moment exact de formation de la panicule, l'angle de la feuille paniculaire pendant la reproduction ; ou encore l'angle de la panicule, la couleur de la barbe et divers détails du grain au stade mature.



Feuille paniculaire

Tige

Nœud

Partie basale de la feuille

Racines

Les grains de riz varient dans la longueur de leurs barbes, la taille, la couleur, la forme et les arômes de leur endosperme, et bien d'autres caractéristiques.

Dans certaines variétés rares, une même balle de riz contient deux ou trois grains. Les paysans traditionnels préfèrent souvent les variétés à barbes longues et pointues, car elles découragent la pâture par le bétail. Ils cultivent aussi certaines variétés particulièrement aromatiques, employées lors de certaines festivités.

> donc séparées des formes de vie en constante évolution du monde extérieur. Lorsqu'au bout de trente-cinq ans, on les remettra en culture, elles auront perdu toute résistance à certains agents pathogènes, dont les souches se sont renouvelées. Au contraire, les banques de semences locales, approvisionnées par les fermiers locaux et qui n'ont pas les moyens de conserver les semences au froid, doivent semer leur riz chaque année, sinon leurs grains, pas assez frais, seraient pour la plus grande partie incapables de germer. Grâce à cet impératif, leurs semences continuent à coévoluer avec les agents pathogènes et autres nuisibles.

## SOIXANTE-QUATRE PLANTS CULTIVÉS PAR VARIÉTÉ DE RIZ

Après toute une série d'expériences et de constatations de ce type, j'ai décidé de créer ma propre ferme de conservation pour maintenir une petite population de chaque variété indigène afin qu'elle survive même en cas d'abandon par la plupart des riziculteurs. En 2001, j'ai investi les économies que j'avais faites sur une bourse de recherche postdoctorale à l'université de Californie, à Berkeley, afin de fonder la ferme Basudha. Vrihi est aujourd'hui la plus grande banque de gènes de riz en libre accès d'Asie du Sud, et ses 1 420 variétés sont cultivées chaque année dans la ferme Basudha, dans un village aborigène du sud d'Odisha. Pas moins de 182 variétés de notre collection ont aujourd'hui disparu des champs indiens.

Comme nous avons moins de 0,7 hectare à notre disposition, nous cultivons 64 plants de chaque variété sur seulement quatre mètres carrés de terrain (d'après notre expérience, le nombre minimum de plants nécessaires pour maintenir tous les traits d'une variété donnée est d'environ 50). Comme nous ne pouvons pas respecter la distance d'isolement recommandée au niveau international (au moins 110 mètres entre cultures), empêcher la pollinisation croisée entre variétés voisines est un défi. Je pense l'avoir surmonté en plantant les différentes variétés de telle façon que chacune d'elles est entourée seulement par des variétés à dates de floraison différentes. Nous éliminons les plants hors-type de chaque population à différents stades de vie en suivant 56 caractéristiques différentes, conformément aux directives de l'ONG Bioversity International, basée à Rome. Une fois ce tri effectué, à l'exception de quelques mutations non détectées, toutes les graines récoltées sont supposées génétiquement pures à 100%.

À la ferme Basudha, toutes les variétés sont cultivées selon le principe agroécologique «zéro intrant», donc sans produits agrochimiques, sans eau d'irrigation pompée dans le sol et sans aucun usage de combustibles fossiles. L'apport en nutriments provient de paillis de feuilles et

de paille (couche de matériau protecteur posée sur le sol) ou de cultures de couverture de légumineuses (dont les racines sont riches en microbes fixateurs d'azote), de légumes verts compostés et de fumier animal, ou encore de biochar (biomasse pyrolysée) et de microbes du sol. Nous luttons contre les parasites en cultivant des «mauvaises herbes» qui fournissent des habitats tant aux prédateurs à insectes parasites tels les araignées, les fourmis et les reptiles qu'aux parasites eux-mêmes. Une autre stratégie consiste à maintenir des flaques d'eau servant d'habitats de reproduction aux insectes aquatiques et aux grenouilles, qui chassent aussi les parasites des cultures. Occasionnellement, nous utilisons aussi des répulsifs antiparasitaires à base de plantes telles que le tabac, l'ail et le tulsi (*Ocimum sanctum*; connu aussi sous le nom de basilic sacré). Les maladies végétales ne sont jamais un problème à Basudha: avoir des variétés et des espèces diverses est la meilleure stratégie de protection contre les agents pathogènes des cultures, selon nombre d'études.

Les semences récoltées sont en partie stockées dans des poteries, ce qui les protège des insectes et des rongeurs tout en leur permettant de «respirer» jusqu'aux semailles suivantes. Nous distribuons le reste des graines, en échange d'une poignée de semences d'autres variétés indigènes, que nous cultivons et

L'auteur et son associé Debdulal Bhattacharya examinent et décrivent les grains de riz de la nouvelle récolte.



© Zoé Savitz

redonnons. Ce système est une tentative raisonnée de faire revivre les échanges traditionnels de semences, cette pratique ancienne qui a concouru autrefois à répandre les variétés cultivées sur les continents.

Mes collègues et moi-même avons aussi contribué à la création de plus de vingt autres banques de semences dans différentes régions de l'Inde, afin que les riziculteurs locaux puissent obtenir les variétés dont ils ont besoin sans avoir à se rendre à Vrihi. Nous encourageons également les réseaux d'échange de semences entre riziculteurs. Nos banques et ces réseaux ont bénéficié à plus de 7800 riziculteurs dans cinq États indiens. En outre, nous

# 182 variétés de notre collection ont aujourd'hui disparu des champs indiens

Debal Deb



documentons les caractères et les propriétés de chaque variété indigène et les enregistrons au nom des riziculteurs qui les fournissent afin d'éviter toute biopiraterie. Nous visons par là à restaurer la souveraineté des riziculteurs sur les semences, essentielle à leur sécurité financière et nutritionnelle à long terme.

## DES CÉRÉALES AUX MILLE VERTUS

Nous espérons ainsi réduire la précarité des riziculteurs. Dans les exploitations agricoles précaires pour cause de sécheresse ou d'inondations saisonnières, les variétés traditionnelles sont le seul moyen fiable d'assurer la sécurité alimentaire des riziculteurs pauvres. Après vingt-deux ans de culture de ces variétés, je suis convaincu qu'en cas de sécheresse, le kelas, le rangi, le gadaba, le kaya ou le velchi donneront des rendements supérieurs à ceux de tous les riz modernes. Les variétés lakshmi dighal, rani kajal et jabra, qui allongent leurs tiges lorsque la crue monte, sont capables de maintenir leurs panicules porteuses de graines hors de l'eau jusqu'à quatre mètres d'eau. Les riz matla, getu, talmugur et kallurundai réussissent à pousser sur un sol salin et survivent à l'incursion d'eau de mer. Ces variétés indigènes sont des lignées stables dotées d'une série de gènes conférant une large plasticité adaptative.

En outre, étant donné les conditions optimales du sol dans les exploitations agricoles alimentées par la pluie, nombre de variétés de riz traditionnels tels le bahurupi, le bourani, le kerala sundari ou encore le nagra parviennent à dépasser les rendements des variétés modernes. Quelques-uns ont même des rendements relativement élevés. Il s'agit notamment des riz à double et à triple grains, des variétés peut-être issues de sélections et de mutations rares des gènes structuraux de la fleur de riz. Notre ferme semble être la dernière dépositaire de l'une de ces variétés de riz à triple grain: le sateen.

Par ailleurs, plusieurs variétés indigènes résistent bien aux parasites et aux agents pathogènes. Les riz kalo nunia, kalanamak, kartik-sal et tulsi manjari sont robustes face au champignon *Magnaporthe oryzae*, un des agents pathogènes du riz les plus dévastateurs. Le bishnubhog et le rani kajal sont résistants au flétrissement bactérien du riz, une autre maladie parmi les plus graves. Le riz kataribhog est modérément résistant au virus du tungro, un virus qui ravage les cultures du sud et du sud-est de l'Asie depuis plusieurs décennies. Les variétés gour-nitai, jashua et shatia semblent résister au lépidoptère *Nymphula depunctalis*, qui s'en prend aux feuilles des plants de riz et cause de sévères défoliations. Enfin, les attaques des insectes foreurs de tiges sur les variétés khudi khasa, loha gorah, malabati, sada dhepa et sindur mukhi sont rares. Au cours des quelque vingt-cinq dernières années, toutes ces semences distribuées par Vrihi ont réduit les pertes de récoltes dues aux parasites et aux maladies de milliers d'exploitations.

Aujourd'hui, la sélection de nouvelles variétés de riz est axée sur l'augmentation du nombre de grains, mais les divers micronutriments que contiennent les nombreuses variétés indigènes de riz sont absents des cultivars modernes. Nos recherches récentes ont identifié au moins 80 variétés populaires contenant plus de 20 milligrammes de fer par kilogramme de riz, voire entre 131 et 140 pour le harin kajli, le dudhé bolta et le jhuli. Une fourchette à comparer aux 9,8 milligrammes de fer par kilogramme du riz transgénique enrichi en fer de la variété IR68 144-2B-2-2-3, développé à grands frais par l'Irri...

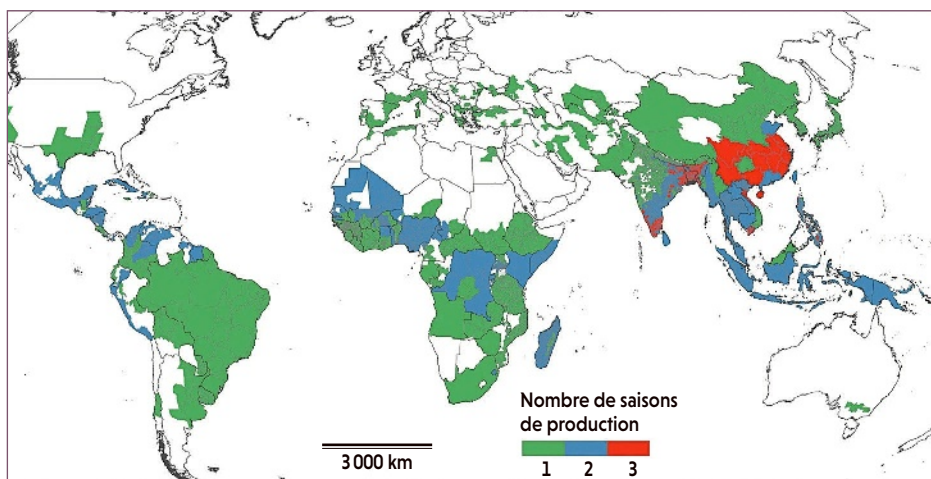
Certaines variétés indigènes pourraient aussi être utiles en médecine. L'ayurveda, le système de médecine traditionnelle indienne, recommande le riz nyavara du Kerala pour aider à traiter une classe de troubles neurologiques. Avec mes collègues, nous analysons sa chimie et espérons étudier son efficacité dans le traitement de ces affections. Un autre riz médicinal, le garib-sal du Bengale-Occidental, est prescrit en médecine traditionnelle dans le traitement des infections gastro-entériques. De fait, dans un article publié en 2017, mes collaborateurs et moi-même avons documenté la bioaccumulation d'argent dans les grains de garib-sal (15 parties par million). Or, >

## LA RECHERCHE SUR LE RIZ DEPUIS LA RÉVOLUTION VERTE

**L**e bilan de la Révolution verte divise les spécialistes. Pendant cette période qui va de 1950 à 1970, des politiques publiques affirmées ont promu une industrialisation rapide de l'agriculture par le moyen d'évolutions technologiques et sociales. On a alors intensifié la mécanisation agricole, l'irrigation, l'utilisation d'engrais chimiques et de produits phytosanitaires et introduit des variétés végétales capables de valoriser ces investissements ; dans le même temps, les agriculteurs ont été poussés à se spécialiser. La Révolution verte – un terme qui fait allusion à la Révolution rouge communiste et à la Révolution blanche despotique – concerne les pays en développement, mais l'agriculture des pays développés a connu une évolution parallèle. Certains y voient le recul tant attendu de la famine dans les pays en ayant vraiment besoin ; d'autres considèrent plutôt que l'objectif unique de rendement a conduit à une destruction massive des environnements, à des ruptures d'équilibres biologiques et sociaux tout en accentuant les inégalités sociales.

Depuis une trentaine d'années, cependant, un nouveau paradigme prend le relais, qui fixe comme objectif un développement durable et équitable. L'Organisation des Nations Unies le décline actuellement en 17 objectifs, dont la recherche internationale tire ses grandes orientations, en particulier s'agissant de développement agricole.

Dans ce concert, le Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale (GCRAI) joue un rôle central. Or ce consortium d'une quinzaine



La base RiceAtlas, mise au point par une équipe de l'Irri, répertorie plus de 2 700 unités spatiales de culture de riz et le nombre de saisons où l'on peut le récolter.

d'instituts et de centres focalisés sur la recherche agronomique pour le développement englobe les instituts promoteurs de la Révolution verte (dont l'Institut international de recherche sur le riz – l'Irri – et Bioersity International). Le GCRAI est financé par des crédits internationaux et par de grandes fondations privées, et chargé de mettre en œuvre de grands programmes. Celui du riz est coordonné au niveau mondial par trois membres du GCRAI (l'Irri, le Centre international d'agriculture tropicale et le Centre du riz pour l'Afrique), deux organismes français (le Cirad et l'IRD) et le Centre de recherche international japonais pour les sciences de l'agriculture (le JIRCAS), et il associe les instituts de recherche de nombreux autres pays.

Cinq projets étendards sont en cours : caractérisation de la diversité des riz, développement de nouvelles variétés, élaboration de systèmes de culture durables, développement de nouvelles chaînes de valeur et finalement intégration de tout cela dans une riziculture plus équitable. Leurs objectifs pour 2022 ciblent une augmentation de la sécurité alimentaire et nutritionnelle (carence en zinc en particulier) dans un meilleur respect de l'environnement. Nous sommes loin des objectifs des années 1960 centrés sur le rendement !

Autre aspect : les collections internationales des GCRAI sont maintenant gérées par le Traité international sur les ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture (Tirpaa) qui permet le partage juste et équitable des avantages découlant de leur utilisation par tous. Ainsi, entre 2014 et 2018, l'Irri, dont la collection

Comme le fait remarquer Debal Deb, les variétés mises en collection il y a plusieurs décennies n'ont pas pu coévoluer avec les environnements de culture, mais elles ont préservé des formes rares d'adaptation qui peuvent être remobilisées dans de nouveaux systèmes avec de nouveaux objectifs. Cela n'enlève rien à la valeur d'initiatives comme celle du centre de distribution de semences de variétés traditionnelles qu'il anime avec rigueur, passion et efficacité. Et encore moins à la valeur des savoirs traditionnels attachés à ces variétés. C'est probablement la déconcentration de la pratique de l'amélioration des plantes qui permettra de répondre au mieux aux grands enjeux de préservation des ressources du passé, d'exploitation des capacités de valorisation de la diversité génétique et d'adaptation des variétés cultivées à une multitude de conditions locales et d'usages différents.

JEAN CHRISTOPHE  
GLASZMANN  
Cirad

Entre 2014 et 2018,  
l'Irri a distribué  
près de 9 000 lots  
de riz par an

renferme plus de 130 000 variétés, a distribué chaque année près de 9 000 lots de semences en dehors du GCRAI. Ces lots sont assortis d'un agrément standard qui assure la traçabilité complète de ces graines, prévenant ainsi les tentatives d'appropriation abusive et libérant des impératifs de protection qui existaient à certaines époques. L'idée est bien de préserver et mettre au service des agricultures du monde cette biodiversité issue de millénaires de gestion paysanne.

> selon des travaux de Kyaw Kaung, de l'université de Kumamoto, au Japon, et ses collègues, publiés la même année, les nanoparticules d'argent se révèlent capables de détruire des biofilms de bactéries du genre *Salmonella* et *Pseudomonas*, sources de pathologies intestinales humaines. Ce riz pourrait donc aider à combattre de telles bactéries. Une pléthore de variétés médicinales de riz de ce type attendent d'être testées en laboratoire et en clinique.

Une autre valeur chère aux riziculteurs indigènes est la beauté du riz. Ils cultivent certaines variétés indigènes uniquement pour leurs couleurs ou leurs motifs: sillons dorés, bruns, violets et noirs sur les balles jaunes du riz, apex violets (l'apex est la pointe du grain), barbes noires, etc. Nombreux sont ceux qui, dans l'est de l'Inde, sont fiers des riz moynatundi et ramigali et de la beauté des extensions ailées des glumelles stériles. Dans toutes les cultures fondées sur l'exploitation du riz, les variétés aromatiques sont associées aux cérémonies religieuses et aux festivals traditionnels. Lorsque ces types de riz disparaissent des champs, de nombreuses préparations culinaires cessent d'être possibles et les cérémonies associées perdent une part de leur signification culturelle et symbolique. Les 195 variétés de riz aromatiques de la ferme Basudha ont déjà contribué à faire revivre de nombreuses traditions locales en voie de disparition.

## UNE BIODIVERSITÉ SACRALISÉE DANS LES RITES RELIGIEUX

La complexité des interactions écologiques a donné naissance à une autre série de variétés de riz. Les petits riziculteurs du Bengale-Occidental et du Jharkhand préfèrent les variétés à barbes longues et fortes (arêtes situées à l'extrémité de l'enveloppe du grain), qui découragent les bovins et les chèvres. Les riziculteurs optent aussi pour les variétés indigènes comportant des feuilles paniculaires dressées, car les oiseaux granivores ne peuvent pas s'y percher.

À l'inverse, certains riziculteurs d'Odisha cultivent une combinaison de variétés barbées ou non, indépendamment de leur intérêt direct. D'autres variétés rares possèdent des tiges et des feuilles violettes, sans que l'utilité de ce trait ne soit évidente. En fait, dans la tradition sud-asiatique, la biodiversité paraît si essentielle à l'agriculture qu'elle a été sacralisée dans des rites religieux. Certains parents sauvages du riz cultivé, comme le buno dhan (*Oryza rufipogon*) et l'uri dhan (*Hygroryza asiatica*), sont par exemple associés à des rites hindous locaux et conservés dans de nombreuses exploitations du Bengale-Occidental et de l'État voisin du Jharkhand. L'importance de ces bassins génétiques sauvages, sources de traits inhabituels pouvant être incorporés si nécessaire dans les cultivars existants, n'a jamais été aussi grande.

La présence dans les rizières de certains arbres tels que le neem (*Azadirachta indica*), dont les feuilles constituent un pesticide naturel, et de prédateurs telle la chouette, est aussi considérée comme favorable.

En mai 2009, le cyclone Aila a frappé la côte des Sundarbans au Bengale-Occidental et au Bangladesh; il a fait près de 350 morts et détruit les habitations de plus d'un million de personnes;

# Le riz garib-sal aiderait à combattre des pathologies intestinales bactériennes

une vague marine due à la tempête a inondé les champs, les polluant de sel, ce qui a mis la sécurité alimentaire de la région en danger. Apprenant cela, nous avons distribué à quelques riziculteurs des villages insulaires des Sundarbans une petite quantité de semences de variétés tolérant la salinité (lal getu, nona bokra, talmugur) et provenant de Vrihi. Ces variétés se sont révélées les seules capables de produire une quantité importante de grains dans les fermes salées pendant cette saison désastreuse. De même, en 1999, plusieurs variétés populaires telles que jabra, rani kajal et lakshmi dighal ont assuré la production de riz des riziculteurs du sud du Bengale après une crue soudaine de la rivière Hugli. Et en 2010, les variétés bhutmuri, kalo gorah, kelas et rangi ont sauvé de nombreux riziculteurs indigènes dans le district de Puruliya (Bengale-Occidental) lorsque l'arrivée tardive de la mousson a provoqué une grave sécheresse.

Ces catastrophes et leurs solutions prouvent que le maintien d'une riziculture durable dépend de façon essentielle de la restauration des pratiques agricoles traditionnelles, car elles permettent d'avoir recours au spectre entier des variétés ayant survécu à l'arrivée de l'agriculture industrielle. Convaincus par la stabilité supérieure des rendements des variétés indigènes, plus de 2000 riziculteurs de l'Odisha, de l'Andhra Pradesh, du Bengale-Occidental, du Karnataka, du Kerala et du Maharashtra ont déjà adopté plusieurs variétés traditionnelles de riz fournies par Vrihi et abandonné la culture de celles à haut rendement. ■

## BIBLIOGRAPHIE

S. S. Gupta et al., **Unusual accumulation of silver in the aleurone layer of an Indian rice (*Oryza sativa*) landrace and sustainable extraction of the metal**, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol.5(9), pp. 8310-8315, 2017.

D. Deb et al., **Variable effects of biochar and P solubilizing microbes on crop productivity in different soil conditions**, *Agroecol. Sust. Food*, vol. 40(2), pp. 145-168, 2016.

D. Chakraborty et al., **An analysis of variation of the aroma gene in rice (*Oryza sativa* L. subsp. *indica* Kato) landraces**, *Genet. Resour. Crop. Evol.*, vol. 63, pp 953-959, 2016.

D. Deb et al., **A profile of heavy metals in rice (*Oryza sativa* ssp. *indica*) landraces**, *Current Science*, vol. 109(3) pp. 407-409, 2015.

M. Mukerjee, **The imperial roots of hunger**, *Himal. Southasian*, vol. 26(2), pp. 12-25, 2013.

## L'ESSENTIEL

> Dans le Système solaire, de nombreux astéroïdes et comètes sont susceptibles de croiser la trajectoire de la Terre. Un impact pourrait être catastrophique.

> Plusieurs sondes spatiales explorent des astéroïdes et des comètes pour mieux connaître ces objets.

> Des systèmes de surveillance sont mis en place pour suivre ces corps célestes et l'on prévoit de tester des façons de dévier leur trajectoire.

> La science-fiction s'inspire de ces menaces bien réelles et propose parfois des scénarios intéressants.

## LES AUTEURS



**JEAN-SÉBASTIEN STEYER**  
paléontologue  
au CNRS-MNHN,  
à Paris



**ROLAND LEHOUCQ**  
astrophysicien  
au CEA, à Saclay

# Impact!

## La menace venue de l'espace

Elles ont mis fin au règne des dinosaures et détruisent des villes et des civilisations dans les films catastrophes. Mais avons-nous les moyens d'empêcher que l'une de ces météorites géantes entre en collision avec la Terre ?

**S**i les astéroïdes, les comètes et les météorites nous passionnent, c'est peut-être que ces objets sont à la fois des symboles de vie et de mort. De vie, car ils auraient fourni à la Terre une grande part de son eau lors d'intenses bombardements il y a environ 4 milliards d'années. Et d'après certains scénarios, ils auraient aussi apporté sur la planète des molécules complexes, telles que des aminoacides, qui constituent les briques élémentaires du vivant (ce scénario, nommé panspermie, reste à démontrer). Mais les météorites sont aussi sources de mort, comme nous le rappellent les dinosaures non aviens disparus il y a 66 millions d'années...

Moteurs à la fois d'apparition et d'extinction du vivant, ces bolides de l'espace, qui filent à une vitesse comprise entre 12 et 72 kilomètres par seconde par rapport à la Terre, ont donc un statut tout particulier dans notre imaginaire collectif. La menace que représentent ces objets tombés du ciel est un grand classique des œuvres de science-fiction. Toutefois, face à un danger bien réel, quelles sont aujourd'hui les stratégies à l'étude pour éviter un impact cataclysmique ?

Pour répondre au mieux à cette menace, les œuvres de fiction donnent des pistes. Mais c'est dans la science et les techniques que les chercheurs et les ingénieurs puisent des solutions concrètes. Ces dernières années, notamment grâce à des sondes spatiales qui ont observé de près des comètes et des astéroïdes, les astrophysiciens ont amélioré leur connaissance de ces corps. Ils ont une meilleure appréciation de leur composition, de leur nombre, de leur origine, de leur trajectoire...

De tous les corps célestes, les plus spectaculaires sont certainement les comètes. Il s'agit de petits objets (de quelques centaines de mètres à quelques dizaines de kilomètres de diamètre) en orbite autour du Soleil et caractérisés par un noyau, une chevelure (*o komêtês* signifie « astre chevelu » en grec) et une ou plusieurs queues (ou traînées).

Le noyau est constitué principalement de roche et de glace – les astrophysiciens parlent de « neige sale ». La chevelure ou *coma*, qui résulte de la sublimation de cette glace à l'approche du Soleil, est un halo de gaz et de poussières d'environ 50 000 à 250 000 kilomètres de diamètre entourant le noyau. Enfin, à la queue



© Capture d'écran / Armageddon/Touchstone Pictures