

unique et fondamentale. Nos résultats nuancent cette hypothèse en faisant apparaître la part de déperdition et d'emprunt de mythèmes, mais ils la confortent aussi en la validant sur des bases phylogénétiques.

Ainsi, l'une des premières versions du mythe de Pygmalion aurait été la suivante : une femme est sculptée dans un tronc d'arbre par un homme qui veut briser sa solitude. Le dieu donne vie à la sculpture qui se transforme en une belle jeune femme. Elle devient la femme de son créateur, bien qu'un autre individu souhaite qu'elle devienne également sa compagne.

Remonter aux premières versions

Dans le mythe de Polyphème, tel que l'aurait entendu son premier public, des animaux sont enfermés dans une grotte. Un chasseur y entre sans être invité et s'y retrouve enfermé par une lourde pierre. Un monstre tente de le tuer et, pour le découvrir, fait sortir les animaux, en scrutant chacun d'entre eux. Le héros parvient cependant à s'échapper en se cachant sous le ventre d'un animal.

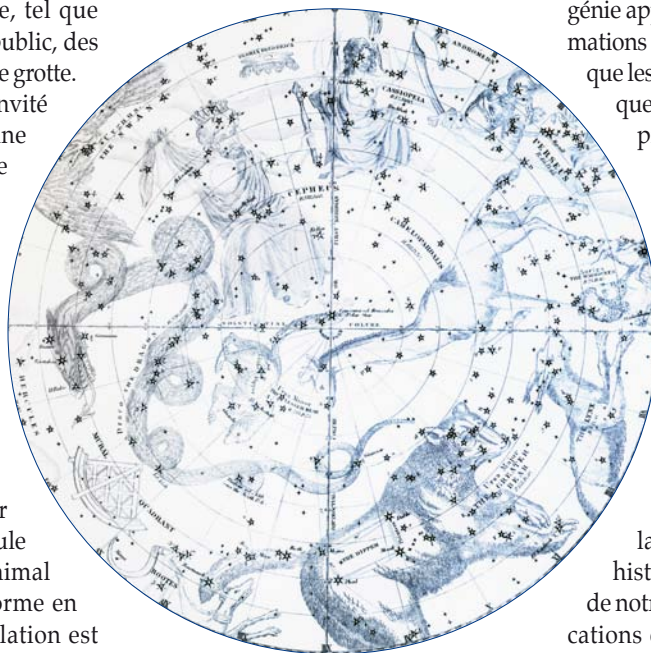
Enfin, la première version de la Chasse cosmique, ancêtre entre autres de l'histoire de Callisto, aurait été la suivante : un ongulé est pourchassé par un homme ; la chasse se déroule dans le ciel ou y aboutit ; l'animal est vivant quand il se transforme en constellation, et cette constellation est celle de la Grande Ourse.

Il est à noter que les récits reconstruits pour Polyphème et la Chasse cosmique remonteraient jusqu'au Paléolithique supérieur, autrement dit, bien plus loin que ne permet de remonter aujourd'hui la linguistique comparée.

La reconstruction du récit de Polyphème évoque la croyance, si répandue dans les cultures du passé, en l'existence d'un maître des animaux, qui les garderait dans une grotte. Or dans la grotte des Trois-Frères (dans les Pyrénées), fréquentée au Paléolithique supérieur, un panneau présente un petit être à tête de bison et corps humain, qui semble tenir un arc court. Perdu au milieu d'un troupeau de bisons, un autre animal, similaire à un bison, tourne la tête vers l'homme hybride, et les deux êtres

échangent un regard. Quand on observe la cuisse de l'arrière-train du « bison », on constate que ce n'est pas une cuisse de ruminant, mais que ses proportions sont plutôt celles d'une cuisse d'homme, beaucoup plus grêle, au point que le préhistorien André Leroi-Gourhan y a vu une silhouette humaine. Par ailleurs, l'artiste a détaillé l'anus et l'orifice vulvaire.

Ces deux éléments pourraient être mis en parallèle avec certaines versions amérindiennes du mythe de Polyphème, où l'homme se dissimule dans l'animal, en s'y introduisant par l'anus. Le fait que la peinture se trouve dans une grotte, le fait que l'être hybride (le monstre ?) tienne un arc et scrute du regard l'animal à la cuisse



humaine, que la scène ait été placée au milieu d'un troupeau, rappelle notre reconstruction du protomythe de Polyphème.

De même, la reconstruction du récit de la Chasse cosmique pourrait expliquer la célèbre scène du Puits à Lascaux (voir la figure 5). L'intrigant point noir isolé près du garrot du bison serait alors une étoile. La rigidité de l'animal, qui ne donne pas l'impression de charger réellement, s'expliquerait s'il représentait une constellation plutôt qu'une action. De plus, selon certains spécialistes, l'homme serait en réalité représenté redressé, et le bison en position ascendante, ce qui rappelle l'ascension au ciel de l'animal du protomythe. Enfin, des taches noires parsèment le sol sous l'animal,

6. LES CHASSES COSMIQUES constituent une famille de mythes si ancienne qu'elles se sont durablement inscrites dans notre imaginaire en peuplant le ciel d'animaux ou de personnages, même si elles ont varié beaucoup d'une culture à l'autre depuis le Paléolithique, leur époque d'origine.

rappelant le sang dont l'animal pourchassé teinte parfois les feuillages automnaux.

Il reste cependant délicat d'associer précisément un récit et une image paléolithique. Nous ne donnons ces exemples que pour illustrer le pouvoir interprétatif de notre méthode, qui permet de proposer des hypothèses solides et de ressusciter des récits disparus depuis bien longtemps.

Les méthodes statistiques de la phylogénie apportent ainsi de précieuses informations sur la mythologie : elles montrent que les mythes migrent en même temps que les hommes, et que l'étude des premiers renseigne sur les migrations des seconds ; par ailleurs, les mythes semblent surtout évoluer par ponctuations ; enfin, il devient possible de reconstituer des récits paléolithiques.

Quand ils racontaient l'histoire de Callisto ou celle de Polyphème, les aèdes grecs émouvaient leur auditoire. Avaient-ils conscience de prolonger une tradition plurimillénaire ? Sans doute pas. Mais la mythologie a une permanence historique qui en fait la gardienne de notre histoire. De nombreuses explications en ont été proposées. On peut imaginer que la mythologie donnait au moins deux avantages adaptatifs à une société ancienne.

Tout d'abord, les groupes qui survivaient et se reproduisaient bien étaient ceux qui transmettaient le mieux l'expérience de vie des anciens, dont les mythes sont l'un des véhicules. Ensuite, on peut noter qu'avec la conscience de soi est venue l'angoisse existentielle, que les mythes ont contribué à canaliser en mettant de l'ordre dans le monde, grâce à la cosmogonie qu'ils véhiculent. Mais peut-être les mythes trouvent-ils une origine plus simple dans le fait que l'homme ne peut percevoir le monde sans ressentir aussitôt le besoin de le comprendre. Les mythes seraient alors l'une des plus anciennes manifestations de cette pulsion. ■

Neil Ribe, Mehdi Habibi et Daniel Bonn

Ils s'enroulent, oscillent, se plient, serpentent...
Soumis à la gravité, les filets de miel, d'huile ou d'autres
fluides visqueux ont des comportements étonnants
et qui restent imparfaitement compris.

Les acrobaties

Si vous aimez le miel sur votre tartine au petit-déjeuner, vous êtes prêt à réaliser l'une des expériences de physique des fluides les plus simples et les plus belles. Plongez une cuillère dans le pot de miel, sortez-la et tenez-la verticalement, quelques centimètres au-dessus de la tranche de pain. Le filet de miel qui s'en écoule ne rejoint pas la tartine en ligne droite, mais forme, dans le bas, une structure hélicoïdale. À la fin des années 1950, cette ressemblance avec un tas de cordage enroulé a conduit les Américains George Barnes et Richard Woodcock, les premiers chercheurs à examiner le phénomène, à parler d'«enroulement d'une corde liquide».

Nous sommes tous trois fascinés depuis longtemps par cet effet, mais nous n'avions jamais trouvé l'occasion de l'étudier jusqu'à il y a une dizaine d'années, quand N. Ribe et D. Bonn ont découvert par hasard leur intérêt commun lors d'un atelier scientifique à Paris. À l'époque, D. Bonn collaborait avec l'Institut d'études avancées en sciences fondamentales de Zanján, en Iran, et nous

L'ESSENTIEL

■ **En tombant sur un plan, les fluides visqueux tels que le miel s'enroulent en hélice. Ce phénomène, dont l'étude systématique est récente, présente une complexité inattendue.**

■ **Un fluide très visqueux manifeste quatre modes distincts d'enroulement, selon le bilan des forces de gravité, de viscosité et d'inertie qui s'exercent sur le filament liquide.**

■ **Plusieurs phénomènes, tel celui de la formation de bulles en spirales, restent à expliquer de façon complète.**

Photographies de Damien Paparo

avons donc invité M. Habibi et quelques autres chercheurs qui y travaillaient (dont, à divers moments, Ramin Golestanian, Maniya Maleki, Yasser Rahmani et Seyed Hossein Hosseini) à compléter l'équipe.

L'expérience de la tartine en version contrôlée

Nous avons ainsi développé une version contrôlée de l'expérience du petit-déjeuner, en remplaçant le miel par des huiles de silicone, car ces dernières sont disponibles avec un large éventail de viscosités. La viscosité est une mesure de l'«épaisseur» d'un liquide, de sa résistance à l'écoulement due aux frottements internes. Nous avons fait varier les conditions d'écoulement (tels le débit du fluide et la hauteur de laquelle il tombe) et examiné comment elles modifient la fréquence d'enroulement (la vitesse à laquelle la colonne verticale de fluide s'enroule).

Au début, nous nous attendions à ce que l'enroulement soit une affaire de tout



des filaments liquides

EN S'ÉCOULANT VERTICALEMENT, un filet de liquide visqueux peut s'enrouler sur lui-même. Quand cet enroulement est assez rapide, un cylindre creux se forme. Ce cylindre grossit, atteint une certaine hauteur et s'effondre. Et le processus recommence...

ou rien, c'est-à-dire à ce qu'il ait lieu ou non, selon les conditions expérimentales. Nous n'étions donc pas du tout préparés à la profusion de comportements différents que nous avons observés.

Par exemple, pour un faible débit, nous avons constaté que plus la hauteur de chute du fluide est grande, plus il s'enroule lentement. Mais pour des débits plus importants, c'est le contraire : quand la hauteur de chute augmente, la fréquence aussi augmente rapidement. De plus, quand on maintient constante la hauteur de chute, le liquide s'enroule en passant, de façon apparemment aléatoire, d'un état à l'autre, les deux états correspondant à des fréquences différentes.

Trois principales forces à l'œuvre

Parallèlement à ces expériences, nous avons élaboré un modèle mathématique afin d'identifier les principes de base à l'œuvre dans l'enroulement d'une corde liquide. Le point de départ était les lois du mouvement de Newton, écrites sous une forme appropriée pour un mince filet liquide beaucoup plus long que son diamètre.

Trois principales forces agissent sur chaque élément de volume d'une telle

■ LES AUTEURS



Neil RIBE est directeur de recherche du CNRS au laboratoire FAST (Fluides, automatique et systèmes thermiques) à l'Université Paris-Sud, à Orsay.



Mehdi HABIBI est chercheur invité à l'Institut de physique de l'Université d'Amsterdam. Il est aussi professeur à l'Institut d'études avancées en sciences fondamentales à Zanjan, en Iran.



Daniel BONN dirige l'Institut de physique de l'Université d'Amsterdam. Ses travaux sur les enroulements liquides ont été en partie réalisés alors qu'il était chercheur du CNRS à l'École normale supérieure, à Paris.

corde liquide. Il y a d'abord la gravité, qui s'exerce vers le bas, et les forces visqueuses (forces de frottement interne). La corde peut se déformer de trois façons : elle peut s'étirer, se courber ou se tordre. À chacun de ces modes de déformation est associée une force visqueuse qui s'y oppose.

La forme de la corde dépend des intensités relatives de ces forces ainsi que de la force d'inertie du fluide (c'est-à-dire le produit de la masse de l'élément fluide par son accélération). La tension de surface, force importante dans de nombreux autres écoulements fluides, s'est révélée ne jouer ici qu'un rôle mineur.

La résolution des équations était un défi. Dans la plupart des problèmes de physique figurant dans les manuels universitaires, les frontières du système sont spécifiées, et la tâche de l'étudiant est de déterminer ce qui se passe à l'intérieur. En revanche, l'enroulement d'une corde liquide est ce que les physiciens nomment un « problème aux frontières libres », où la forme de la frontière est inconnue et fait elle-même partie du problème à résoudre. Avec beaucoup de précaution, nous avons réussi à montrer que l'enroulement d'un fluide très visqueux peut avoir lieu selon quatre modes distincts, chacun caractérisé

Enroulements et balancements

Les filaments de fluide visqueux peuvent s'enrouler de quatre façons différentes selon les intensités relatives des forces de gravité, d'inertie et de viscosité (forces de frottement). Dans les exemples illustrés ci-contre, les auteurs ont laissé couler un filet d'huile de silicone sur une plaque métallique de hauteur variable. Le filet avait un diamètre de 0,7 millimètre et s'écoulait avec un débit de 0,23 millilitre par minute. Les huiles présentant une viscosité telle que celle utilisée ici (100 000 centistokes) mettent quelques minutes à s'écouler entièrement de la cuillère. Pour comparaison, l'eau à température ambiante a une viscosité de 1 centistoke ; la viscosité du miel est, elle, de 10 000 centistokes.

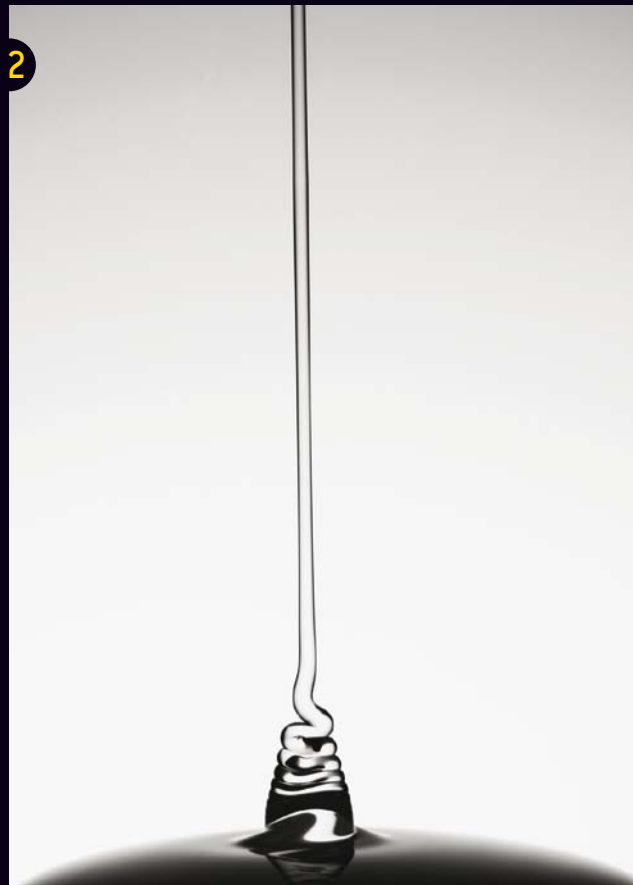
① Mode visqueux. Lorsque le filet d'huile tombe d'une faible hauteur (4 à 8 millimètres), il se comporte comme du dentifrice qu'on fait sortir lentement du tube en le pressant. Le fluide s'enroule si lentement que la gravité et l'inertie sont négligeables par rapport aux forces de frottement. La force visqueuse dominante est celle qui s'oppose à la flexion.

② Mode gravitationnel. Pour des hauteurs de chute comprises entre 1,5 et 7 centimètres, la gravité devient un facteur important. La corde liquide présente deux parties, une longue queue au-dessus et un enroulement plus court en dessous. Dans la queue, la gravité équilibre la résistance visqueuse à l'étirement, alors que dans l'enroulement elle équilibre la résistance visqueuse à la flexion.

③ Mode pendulaire. Pour des hauteurs comprises entre 7 et 12 centimètres, la queue se balance d'avant en arrière à la manière d'un pendule. Pour la plupart des hauteurs, la queue ne peut pas se balancer librement, car son mouvement est régi par l'enroulement, dans le bas. Mais pour certaines hauteurs d'écoulement, la fréquence d'enroulement correspond à l'une des fréquences naturelles d'oscillation de la queue (un effet de résonance, par lequel la situation s'auto-renforce). La queue tournoie alors en décrivant un large cercle.

④ Mode inertiel. Au-delà de 15 centimètres de chute, la queue est quasiment verticale, parce que l'enroulement n'exerce plus sur elle d'attraction latérale significative. Au sein de l'enroulement, la force visqueuse qui résiste à la flexion est presque entièrement équilibrée par l'inertie, la gravité ne jouant plus qu'un rôle mineur.





Au-delà du simple enroulement

Les liquides très fluides, contrairement aux liquides visqueux, peuvent faire beaucoup plus que juste s'enrouler. Dans ces exemples, les auteurs ont utilisé des huiles de viscosité comprise entre 400 et 6 000 centistokes : des liquides plus coulants que le miel, mais plus épais que l'eau.

❶ **Écoulement stationnaire.** Pour une viscosité relativement faible, de petites hauteurs de chute et des débits élevés, le fluide tombe tout droit et s'étale de façon égale dans toutes les directions de la plaque. Ces conditions s'appliquent à des liquides ménagers courants tels que l'eau ou l'huile d'olive. Cela dit, même ces liquides peuvent s'enrouler si les conditions sont réunies. Ainsi, de l'huile d'olive versée d'une hauteur de 10 centimètres à un débit de 1 millilitre par 40 minutes s'enroulerait.

❷ **Pliage rotatif.** La corde liquide se replie périodiquement sur elle-même tandis que l'ensemble du motif de pliage tourne autour d'un axe vertical, créant un effet de torsion.

❸ **Surenroulement.** Le surenroulement désigne ce qui se passe avec des cordons téléphoniques entortillés, c'est-à-dire subissant un enroulement secondaire qui se superpose à la structure déjà bien enroulée. Dans le cas des fluides, le filament qui s'écoule crée un cylindre creux, qui à son tour s'enroule dans son ensemble. L'enroulement secondaire se fait à un rythme environ dix fois plus lent que l'enroulement primaire.





Des spirales de bulles

Les auteurs ont découvert ce motif par hasard en expérimentant avec une huile de silicone de haute viscosité (30 000 centistokes), à un débit élevé (0,14 millilitre par seconde) et à de faibles hauteurs de chute (3 à 4 centimètres). Les spirales ont toujours cinq branches. Elles naissent parce que le centre de l'enroulement n'est pas fixe, mais décrit un cercle. Aux points de croisement entre les boucles successives du filament liquide qui s'enroule, des bulles d'air sont facilement piégées. La position des points de piégeage migre lentement autour d'un cercle tandis que les bulles précédentes sont entraînées radialement par le fluide qui s'étale. Les spirales résultent de la combinaison de ces deux mouvements.

par un bilan de forces différent (voir l'encadré page 32).

Ayant déterminé les grands types d'enroulements, nous pensions avoir brossé un tableau assez complet – à tort. Des expériences complémentaires, menées à titre exploratoire et sans idées préconçues, ont révélé des phénomènes nouveaux et remarquables.

Le premier est l'apparition de magnifiques ondes spirales de bulles d'air dans la mince couche de fluide qui s'écarte du filament en train de s'enrouler (voir la photographie ci-dessus). Elles se forment quand les boucles successives du filament sont légèrement décalées l'une par rapport à l'autre, piégeant de petites poches d'air. Mais nous ne comprenons toujours pas ce qui confère à ces spirales leur forme précise, ni pourquoi elles ne se créent que dans une plage étroite de valeurs de la viscosité, du débit et de la hauteur de chute du fluide.

Nous avons également joué avec des huiles de silicone de viscosité beaucoup plus faible. Ces fluides s'enroulent beau-

coup plus rapidement (jusqu'à 2 000 fois par seconde) et il nous a donc fallu des caméras rapides pour enregistrer leur comportement. Les fluides peuvent s'enrouler et même se plier de façons bien plus complexes (voir l'encadré page 34). Un état donné persiste longtemps en l'absence de perturbation, mais bascule soudainement dans un autre si l'on donne au dispositif un petit coup bien sec.

Dans toutes les expériences décrites ci-dessus, le fil de liquide tombait sur une surface immobile. Mais d'autres effets peuvent apparaître si la surface et la source de liquide sont en mouvement relatif, comme ont pu l'observer l'artiste américain Jackson Pollock avec ses tableaux d'*action painting* ou les fabricants de textiles avec des fils de polymère fondu.

Couler sur un tapis roulant

En 2006, à l'Université de Cambridge en Grande Bretagne, nos collègues Keith Moffat, Sunny Chiu-Webster et John Lister ont étudié ces situations en utilisant une sorte de « machine à coudre du fluide ». Ce dispositif extrude un filament de fluide visqueux sur un tapis qui roule horizontalement à vitesse constante. À grande vitesse, le fil tiré laisse une trace rectiligne sur le tapis. Mais quand le tapis avance plus lentement, des motifs irréguliers plus complexes émergent : des méandres, des boucles qui alternent, des doubles enroulements et même une forme en W.

Nous avons encore beaucoup de chemin à faire avant de comprendre parfaitement les cordes liquides. L'une des grandes priorités est de comprendre le mécanisme qui engendre les ondes spirales de bulles. Pourquoi le centre de l'enroulement se met-il à décrire une trajectoire distincte ? Un autre objectif est de modéliser l'enroulement secondaire complexe qui se produit dans les fluides de faible viscosité.

Nous projetons aussi d'étendre notre exploration à des systèmes plus exotiques, notamment des fluides complexes qui réagissent de façon inhabituelle aux forces appliquées, ainsi que des fluides électriquement chargés qui s'enroulent à des échelles micrométrique ou nanométrique dans un champ électrique. À en juger par nos expériences passées, bien d'autres surprises nous attendent. ■

■ SUR LE WEB

Instructions pour réaliser vos propres expériences et des liens vers des vidéos d'enroulements de cordes liquides : ScientificAmerican.com/feb2014/coils

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Javadi et al., *Delayed capillary breakup of falling viscous jets*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110, 144501, 2013.

N. M. Ribe, M. Habibi et D. Bonn, *Liquid rope coiling*, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 44, pp. 249-266, 2012.

P.-Th. Brun, *Dynamique des filaments élastiques et visqueux*, thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 17 septembre 2012.

A. Herczyński et al., *Painting with drops, jets, and sheets*, *Physics Today*, vol. 64, pp. 31-36, juin 2011.

Mieux traiter le glaucome

Christophe Baudouin, Alexandre Denoyer et William Rostène

Les traitements actuels de cette maladie de l'œil ont leurs limites. Mais de nouvelles pistes se dessinent pour les améliorer et pour en proposer d'autres, qui agiraient à un stade plus précoce.

Le glaucome est l'une des maladies graves de l'œil les plus fréquentes. Deuxième cause de cécité dans le monde après la cataracte, il touche 50 à 60 millions de personnes, dont 6 à 7 millions sont aveugles. On estime qu'environ 800 000 personnes sont traitées en France pour un glaucome, mais que 400 000 à 500 000 autres présentent cette maladie sans le savoir.

Le glaucome est en effet une pathologie sournoise que l'on ne ressent en général pas : il est souvent indolore et atteint la vision de façon progressive, en commençant par les côtés. Ce n'est que dans les formes tardives, très avancées, que l'on se rend compte d'un déficit visuel menaçant. En revanche, la perte de vision est définitive : lorsque la vision centrale est atteinte, le handicap visuel est majeur et irréversible. Ainsi, seul un dépistage systématique passé la quarantaine permet le diagnostic et, donc, une réponse thérapeutique précoce et adaptée.

Le glaucome est une neuropathie optique, c'est-à-dire une maladie qui détruit le nerf optique. Dans la plupart des cas, cette

destruction est causée par une surpression oculaire chronique. Aujourd'hui, les traitements médicamenteux – qui constituent la première thérapie, avant le laser et la chirurgie – se bornent à réduire la pression oculaire afin d'éviter la neuropathie optique ou d'empêcher sa progression vers la cécité. Mais ces traitements – des gouttes instillées dans l'œil – ont leurs limites, car, utilisés sur le long terme, ils peuvent endommager la surface oculaire.

Depuis quelques années, l'amélioration de ces traitements est ainsi devenue un enjeu scientifique et pharmacologique de premier plan. Parallèlement, une meilleure compréhension des mécanismes en jeu dans la survenue du glaucome ouvre de nouvelles perspectives pour traiter de façon précoce la pathologie, voire pour la faire régresser. Du dépistage, toujours plus précis, aux nouvelles pistes de traitement, voici les dernières avancées thérapeutiques dans la prise en charge de cette maladie.

Il existe deux grandes familles de glaucomes selon l'anatomie de l'œil, et plus particulièrement de l'angle iridocornéen – la structure formée par la cornée

L'ESSENTIEL

■ Deuxième cause de cécité dans le monde, le glaucome est une destruction progressive du nerf optique liée à une surpression oculaire.

■ Les traitements visant à réduire la pression oculaire sont la première ligne thérapeutique, avant les lasers et la chirurgie.

■ Mais leur administration au long cours peut endommager la surface oculaire, notamment à cause des conservateurs.

■ De nouvelles approches offrent des pistes pour éliminer les conservateurs ou pour cibler les causes de surpression oculaire.