



6. UN CHARNIER DE 70 CORPS sans tête a été découvert le long de l'enceinte sacrée du sanctuaire de Ribemont-sur-Ancre, dans la Somme. Il s'agit probablement d'ennemis, ramassés sur le champ de bataille. Les corps accrochés en position verticale et équipés de leur panoplie guerrière pourrissaient sur place, sans aucune intervention humaine.



de l'aire sacrée. Là encore, cette pratique du trophée est proche de celle en vigueur en Grèce ou à Rome : une loi attribuée à Numa, deuxième roi légendaire de Rome, interdisait de remonter les trophées, alors constitués d'armes réelles, que le temps faisait tomber de leur support, comme si la nature seule devait mettre un terme à la vengeance contre les ennemis et à l'orgueil de la victoire.

Des trophées humains

À Ribemont-sur-Ancre, nous avons mis en évidence des rites plus macabres : les trophées guerriers contiennent les armes, mais aussi les corps des ennemis, privés de leur tête. Posidonius et d'autres auteurs nous apprennent que les Gaulois ont pour coutume, chaque fois qu'ils tuent un ennemi, de lui prendre le crâne, qu'ils rapportent ensuite chez eux, comme un butin personnel. Ces corps sans tête seraient donc le produit d'un ramassage sur un champ de bataille, la part revenant à la divinité ou à la communauté qu'elle est censée incarner.

Ce butin funèbre, après avoir été rapporté en triomphe par les vainqueurs, était traité en plusieurs phases. Une partie des corps demeurait à la périphérie du sanctuaire, où elle y pourrissait sans intervention humaine ni animale (l'absence de traces de charognage indique que ces dépouilles étaient protégées des prédateurs). Une sorte de « charnier » d'au moins 70 corps a été mis au jour. À l'intérieur du sanctuaire et le long de sa clôture, d'autres corps étaient présentés, probablement en position verticale, là aussi jusqu'à ce qu'ils se délabrent et tombent sur le sol. Les membres

devaient alors être prélevés pour constituer d'étranges constructions, des sortes de boîtes cubiques aux parois constituées d'os longs alignés et entrecroisés. Bon nombre de ces os longs étaient ensuite percutés contre une pierre, afin vraisemblablement d'en extirper la moelle. Les esquilles d'os étaient alors brûlées et déversées dans un trou cylindrique creusé dans le sol sacré, encore une sorte d'autel « chthonien ».

Ce traitement funéraire distingue les guerriers des autres hommes : dans le Nord de la Gaule, les sépultures de cette époque ne livrent pas de restes de guerriers. L'hommage rendu dans le sanctuaire est collectif, comme cela était l'usage en Grèce dans le courant du V^e siècle.

Ces actes ne prennent un sens que s'ils sont confrontés aux modestes témoignages de la littérature grecque et latine. La dégradation naturelle des trophées a certainement le même sens qu'en Grèce et à Rome. Plutarque a tenté de l'expliquer dans ses *Questions romaines* : le trophée a pour mission de fixer, pendant un temps, une violence d'ordre divin que les hommes seuls ne peuvent maîtriser. La précaution de ne pas utiliser le couteau, de laisser la nature suivre son cours, le soin pris à libérer la moelle, probablement considérée comme le siège de l'âme, le retour des morts vers une divinité infernale dont les Gaulois considéraient qu'ils étaient issus autant d'échos rituels aux croyances druidiques sur les cycles de la vie et des êtres, une théorie certainement très élaborée sur la vie, la mort et l'éternité de l'âme, proche de la métempsycose des philosophes grecs.

De telles découvertes archéologiques et les premiers résultats des études qu'elles suscitent font progresser la connaissance de la vie quotidienne des druides. Elles nous rappellent surtout que, hormis quelques lignes de Posidonius, nous ne possédons sur eux aucune information. Les rites que l'archéologie des sanctuaires gaulois restitue partiellement étaient soigneusement tenus secrets, à l'abri des monumentales enceintes sacrées et au plus profond de la mémoire orale. Ils ne sont qu'une part infime d'un ensemble de connaissances et de croyances que le monde dit « barbare » avait acquises.

Le formalisme de la religion romaine a permis aux plus anciennes institutions de se maintenir encore au Haut-Empire, voire d'être restaurées. Le régime des castes en Inde a pérennisé la place des brahmanes. Les druides, en revanche, n'ont pas survécu à l'occupation romaine, au moins dans leur état authentique.

Jean-Louis BRUNAUX est chargé de recherches au Laboratoire d'archéologie d'Orient et d'Occident du CNRS et de l'École normale supérieure.

Christian GOUDINEAU, *César et la Gaule*, éditions Errance, Paris, 1990.

Les sanctuaires celtiques et le monde méditerranéen, Actes du colloque de Saint-Riquier, édité par J.-L. Brunaux, éditions Errance, Paris, 1991.

Camille JULIAN, *Histoire de la Gaule*, éditions Hachette, Paris, 1993.

S. PIGGOTT, *The Druids*, éditions Thames and Hudson, Londres, 1994.

Jean-Louis BRUNAUX, *Les religions gauloises*, éditions Errance, Paris, 1996.

Les superordinateurs analysent la turbulence

PARVIZ MOIN • JOHN KIM

Seuls les ordinateurs les plus puissants parviennent à décrire les écoulements turbulents simples. Dans certains cas, les calculs révèlent des possibilités de commander la turbulence.

Les fluides en mouvement nous entourent et nous font vivre : du sang circule dans notre corps et de l'air est en mouvement dans nos poumons ; certains de nos véhicules se déplacent dans la couche d'air qui enveloppe notre planète, tandis que d'autres sillonnent l'eau des lacs et des océans, alimentés par des fluides, tels le carburant et le comburant, qui se mélangent dans les chambres de combustion des moteurs. Nombre de problèmes environnementaux ou énergétiques auxquels nous sommes aujourd'hui confrontés ne peuvent être abordés sans une connaissance détaillée de la mécanique des fluides.

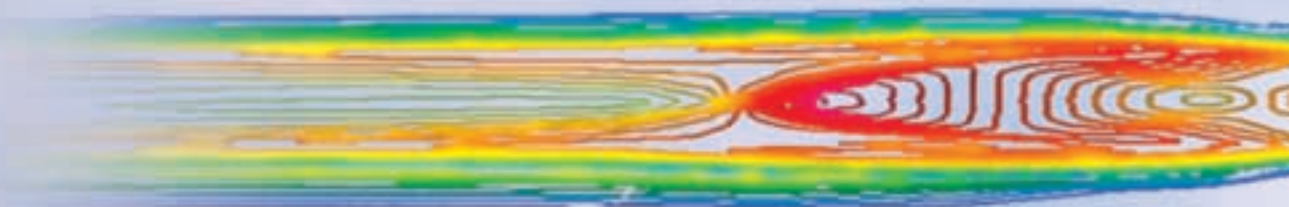
La plupart des écoulements de fluides qui intéressent les scientifiques et les ingénieurs sont turbulents. Aussi les ingénieurs doivent comprendre la turbulence pour réduire les frottements aérodynamiques des automobiles ou des avions de ligne, accroître la manœuvrabilité des avions de combat et améliorer le rendement des moteurs. Les médecins aussi doivent faire face à la turbulence quand ils analysent l'écoulement du sang dans le cœur et, notamment, dans le ventricule gauche, où le mouvement est particulièrement rapide.

Qu'est-ce que la turbulence ? Examinons deux exemples. Si nous ouvrons légèrement un robinet de cuisine, le filet d'eau qui coule est lisse et homogène :

c'est ce qu'on nomme un écoulement laminaire. Puis, si nous ouvrons davantage le robinet, l'écoulement devient irrégulier et sinueux : il est «turbulent». Ce même phénomène s'observe avec la fumée de cigarette : juste au-dessus de la cigarette, son écoulement est laminaire, mais, un peu plus haut, la fumée ondule de façon complexe, turbulente.

Les écoulements turbulents sont composés de fluide qui zigzague, qui s'enroule sur lui-même et semble se déplacer au hasard, autour de la direction générale du mouvement. Cet état chaotique survient lorsque la vitesse du fluide est supérieure à une limite après laquelle la viscosité ne suffit plus à régulariser les mouvements.

1. CETTE SIMULATION DE LA NAVETTE SPATIALE en vol a été superposée à une photographie de l'appareil. Sur la moitié inférieure de l'image, les couleurs indiquent les valeurs de la pression de l'air à la surface de la navette (le bleu correspond à une pression faible, le rouge à une pression élevée).



La turbulence n'est pas toujours indésirable ; nombre d'ingénieurs cherchent à l'amplifier. Dans les cylindres d'un moteur à combustion interne, par exemple, la turbulence améliore le mélange du carburant et de l'air, de sorte que la combustion est plus efficace et plus propre. Grâce à la turbulence créée par le relief bosselé des balles de golf, les bons golfeurs envoient les balles à 250 mètres, au lieu des 100 mètres qu'ils atteindraient avec des balles lisses.

La turbulence doit probablement sa mauvaise réputation à la difficulté de son analyse : bien qu'omniprésente dans la nature, elle reste mal comprise quantitativement. Pour Richard Feynman, la turbulence était le plus important des problèmes ouverts en physique classique. Lors d'une allocution qu'il prononça en 1932 devant l'Association britannique pour l'avancement de la science, le physicien britannique Horace Lamb exprima la même idée avec plus d'humour : «Je suis maintenant un vieil homme, et je mourrai bientôt, mais quand j'irai au ciel, il y a deux sujets sur lesquels j'espère avoir des éclaircissements : l'un est l'électrodynamique quantique, l'autre est le mouvement turbulent des fluides. Pour le premier, je suis sûr d'avoir une réponse, mais pour le second...»

Lamb ne prévoyait pas l'avènement des superordinateurs, qui donnent enfin des éléments de compréhension de la turbulence. Les informations ainsi recueillies ont déjà débouché sur des techniques, en phase de mise

au point, que l'on utilisera pour réduire de plusieurs pour cent la traînée aérodynamique des ailes d'avion, ce qui économisera le carburant. De surcroît, ces techniques permettront aux ingénieurs de perfectionner les moteurs d'avion à réaction.

Malgré son caractère abscons, l'étude de la turbulence est l'une des composantes principales de la dynamique des fluides, discipline qui traite du mouvement des liquides et des gaz. L'utilisation d'ordinateurs rapides pour l'étude des écoulements fluides turbulents est une partie importante de la mécanique des fluides numérique, une discipline qui se développe rapidement. Ces dernières années, les physiciens des fluides ont utilisé des superordinateurs pour simuler des écoulements aussi divers que celui de l'eau sur la coque des bateaux de la Coupe de l'America ou que celui du sang dans un cœur artificiel.

Une longue gestation

En quoi consiste la simulation numérique d'un écoulement fluide ? L'ordinateur résout une série d'équations et détermine, en tout point de l'espace proche d'un objet, la vitesse et la pression du fluide qui s'écoule autour de lui. Les équations utilisées furent découvertes indépendamment, il y a plus d'un siècle et demi, par l'ingénieur français Claude Navier et par le mathématicien irlandais George Stokes. Les équations de Navier-Stokes dérivent

directement des lois newtoniennes du mouvement. L'emploi d'ordinateurs pour résoudre ces équations a engendré la mécanique des fluides numérique, après un mariage qui fut l'un des plus grands succès de la dynamique des fluides, depuis la formulation même de ces équations.

Pourtant le flirt dura longtemps : ce fut seulement à la fin des années 1960 que les ordinateurs atteignirent des vitesses de calcul suffisantes pour résoudre les équations de Navier-Stokes dans des cas simples, tels les écoulements lents autour d'un obstacle, dans un espace à deux dimensions seulement. Auparavant, les essais en soufflerie étaient le seul moyen de tester l'aérodynamique des prototypes d'avion. Aujourd'hui, les ordinateurs ne sont pas encore assez puissants pour éviter le recours à la soufflerie, lors de la conception des nouveaux avions, mais l'étude numérique est de plus en plus présente dans les phases initiales de la conception, notamment lors du choix des dimensions et d'autres paramètres fondamentaux. Cette phase, qui procède par essais-erreurs, était très coûteuse, parce qu'elle nécessitait la construction et le test en soufflerie de chacun des modèles successifs. Grâce au rôle croissant pris par la mécanique des fluides numérique, le cycle de conception d'une aile comprend aujourd'hui entre deux et quatre tests en soufflerie, au lieu de 10 à 15 autrefois.

Parfois, les simulations sur ordinateur donnent même une vision plus réa-

