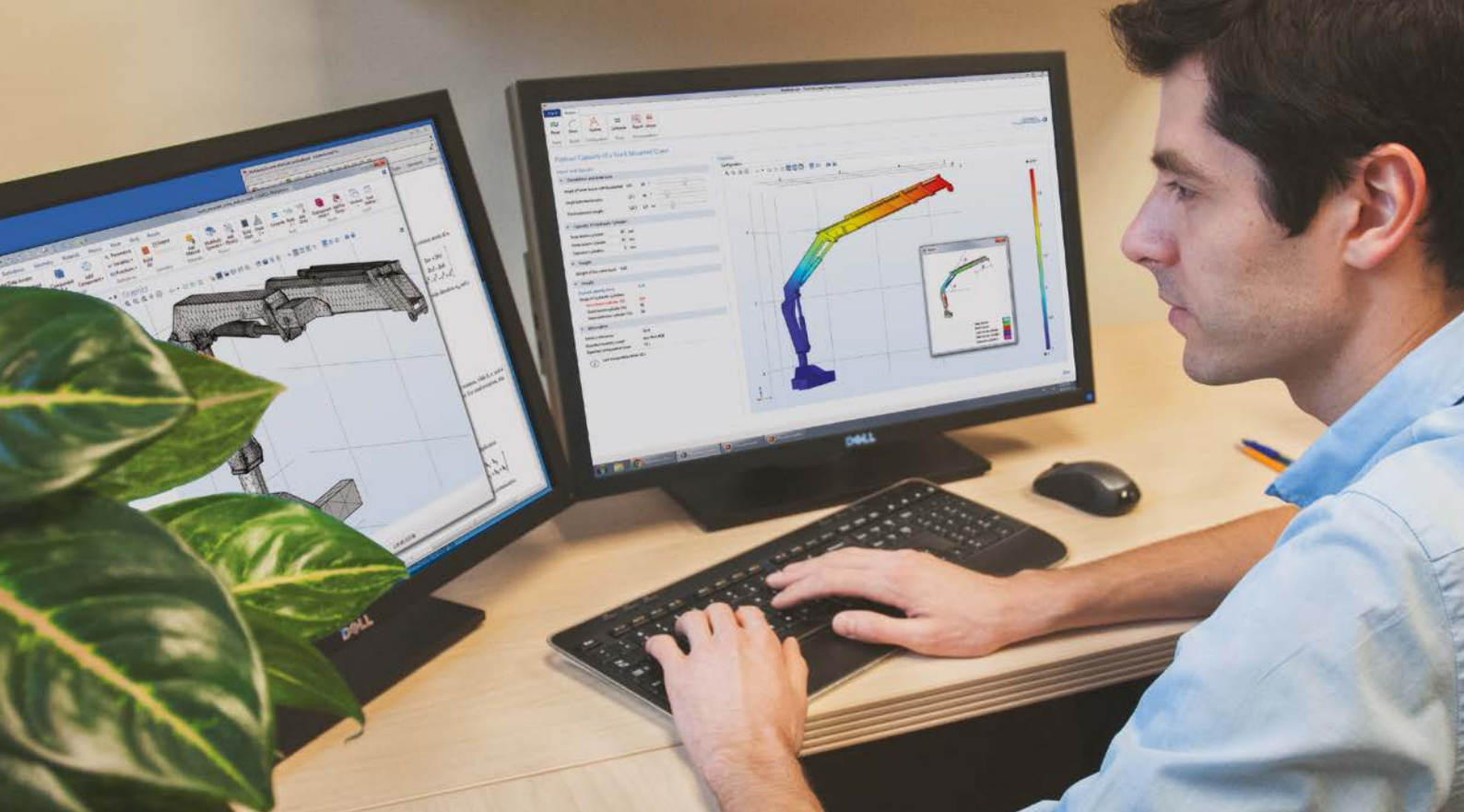




# LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

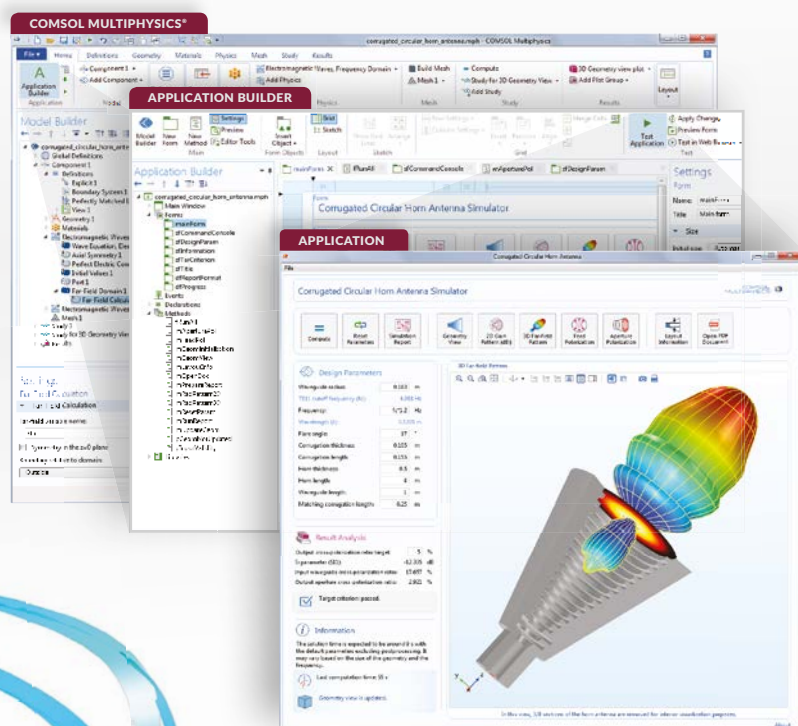
L'évolution des outils de simulation numérique vient de franchir un cap majeur.

Des applis spécialisées sont désormais développées par les spécialistes en simulation avec l'application Builder de COMSOL Multiphysics®.

Une installation locale de COMSOL Server™, permet de diffuser les applis dans votre organisme et dans le monde entier.

Faites bénéficier à plein votre organisme de la puissance de l'outil numérique.

**[comsol.fr/application-builder](http://comsol.fr/application-builder)**



## IDÉES DE PHYSIQUE

# Un poisson-coffre dans la voiture

*Les performances hydrodynamiques du poisson-coffre ont inspiré les concepteurs d'automobiles. Même si ces performances gardent une part de mystère !*

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

**D**ifficile d'imaginer moins aérodynamique qu'un cube. C'est pourtant la forme de poissons qui réalisent des virages à 180 degrés sur place, se faufilent avec aisance dans leur milieu naturel et sont capables de jolies pointes de vitesse. De qui s'agit-il ? Des poissons-coffres, bien sûr !

Ces espèces tropicales, souvent joliment colorées, n'ont pas manqué d'intriguer les physiciens depuis une quinzaine d'années et même d'inspirer les ingénieurs, emportés par la vague du biomimétisme. Ainsi, un modèle de voiture en a adopté la forme (voir l'illustration ci-contre). Cependant, des études un peu contradictoires montrent que l'on n'est toujours pas sûr de ce qui rend ces poissons si bon nageurs.

## Un modèle vivant pour l'industrie automobile

L'histoire débute en 1996. Les ingénieurs de Mercedes, peinant à imaginer ce que pourrait être un véhicule biomimétique, reçoivent une suggestion de leurs voisins ichtyologues de l'université de Stuttgart. « Abandonnez requins et autres thons, souples et effilés, mais bien trop aplatis pour loger conducteur et passagers : calquez plutôt votre véhicule sur le poisson-coffre ! » Étrange proposition que de s'inspirer d'un poisson d'un beau volume parfois presque cubique et doté d'une carapace osseuse et anguleuse...

L'idée des ichtyologues n'est pourtant pas fantaisiste : dans le monde exigu des coraux, cet animal à la forme rigide manœuvre aussi bien, voire mieux, que ses cousins qui ondulent avec grâce. Il pivote sur place, parcourt en une seconde jusqu'à cinq fois sa taille et, cerise sur le gâteau, sa traînée hydrodynamique est étonnamment faible.

Des études menées entre 2002 et 2005 sous l'impulsion de l'armée américaine l'ont confirmé. Comme les poissons-coffres ne se montraient guère coopératifs, il a fallu les congeler et les passer au scanner 3D pour réaliser des modèles (sans nageoires) en résine, truffés de capteurs de pression et de forces, et mesurer l'écoulement grâce à des techniques de vélocimétrie laser.

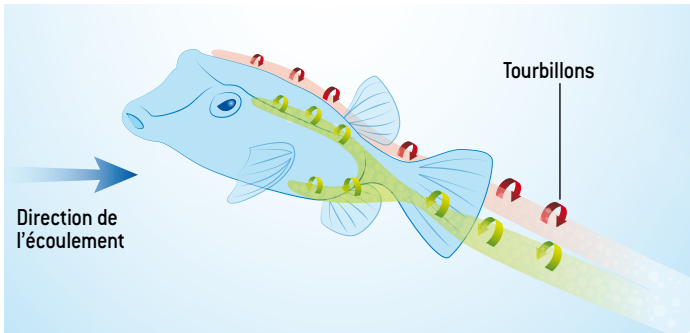
Première constatation : le coefficient de traînée, qui caractérise la résistance à l'avancement dans un fluide, est effectivement très faible. Noté  $C_x$ , ce nombre est le double du rapport entre la force de résistance et le produit de la masse volumique du fluide (ici l'eau), de la superficie frontale de l'objet en mouvement et du carré de sa vitesse.

Lorsque l'écoulement présente de la turbulence au niveau du sillage, mais pas à la surface de l'objet, ce coefficient est à peu près constant. Il est de l'ordre de 0,5 pour une sphère, inférieur à 0,1 pour un objet bien profilé et supérieur à 1 pour un cube ou un cylindre court ! Les mesures sur plusieurs poissons-coffres donnent

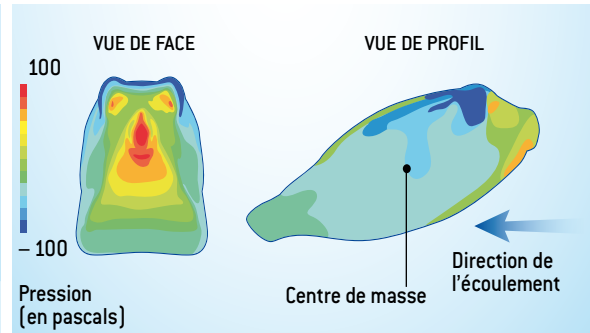


**MALGRÉ SA FORME À PEU PRÈS CUBIQUE,** le poisson-coffre offre peu de résistance à l'écoulement du fluide autour de lui. Il a inspiré les ingénieurs de Mercedes avec leur modèle Bionic.

Dessins de Bruno Vacaro



**DEUX SÉRIES DE TOURBILLONS** naissent de chaque côté du poisson-coffre, au niveau des arêtes du « cube », et fusionnent près de la queue. Les dépressions exercées sur la carapace par ces tourbillons tendent à redresser le poisson pour l'aligner avec la direction de l'écoulement. C'est un effet stabilisant.



**IL RÈGNE UNE FORTE SURPRESSION** au niveau de la bouche et de fortes dépressions au-dessus des yeux et sur le dessus de la carapace quand le poisson est incliné vers le haut. Il en résulte un couple qui l'incline encore plus. C'est un effet déstabilisant.

D'après S. Van Wassenbergh et al., J. R. Soc. Interface, 2015

environ 0,28 pour *Ostracion meleagris*, dont la forme est parallélépipédique, et 0,15 pour *Lactophrys triqueter*, de section triangulaire.

Seconde constatation : ce poisson est stable. Pourtant, d'après notre intuition, la moindre perturbation du fluide devrait le basculer afin qu'il présente à l'écoulement une arête anguleuse (où se soudent les plaques de sa carapace), mieux profilée.

Ce paradoxe a été résolu à l'aide de maquettes diversement inclinées par rapport à la direction horizontale de l'écoulement. Les chercheurs ont observé des tourbillons sur chacune des arêtes (voir la figure ci-dessus), comme sur les bords d'attaque des avions à ailes en delta. Ces tourbillons deviennent de plus en plus forts à mesure que l'inclinaison augmente.

Or, tout comme les tornades qui aspirent les toits, ces tourbillons créent des dépressions au niveau de la carapace, surtout aux endroits où ils en sont proches. Comme ils apparaissent plutôt à l'arrière du poisson (et de chaque côté), cette succion sur la carapace a le même effet qu'une traction vers l'arrière exercée par des cordes attachées aux mêmes endroits : on obtient un couple par rapport au centre de masse qui redresse le poisson vers l'horizontale. Puisque les mêmes phénomènes surgissent pour les embarcées (les mouvements vers la gauche ou la droite), il faut en déduire que, par sa forme anguleuse, le poisson-coffre est muni d'un dispositif passif et permanent de stabilisation de trajectoire.

Avec de telles conclusions, rien d'étonnant à ce que les ingénieurs de Mercedes aient été au bout de leur labeur avec leur modèle Bionic, inspiré de l'espèce *Ostracion cubitus*. Cette berline a, malgré son vaste espace intérieur, un fabuleux coefficient de traînée : 0,19.

Reste une difficulté : comment se fait-il que ces mécanismes de stabilisation ne gênent pas le poisson-coffre dans ses manœuvres ? Car plus un mobile est stable, moins il est maniable. Les avions à aile delta, par exemple, sont maniables, mais intrinsèquement instables. Pour élucider ce paradoxe, profitant des évolutions techniques, l'impression 3D de haute précision notamment, des équipes euro-américaines ont repris les études, à partir de spécimens prêtés par les musées et en y ajoutant des simulations hydrodynamiques pour mieux évaluer les champs de pression et de vitesse de l'écoulement.

## Un paradoxe qui a la peau dure

Hélas, loin de corroborer la précédente étude, les auteurs de la seconde ne sont pas loin de conclure le contraire. D'abord, les coefficients de traînée sont notablement plus élevés : près de 0,3 pour *L. triqueter* et *O. cubitus*. Ensuite, il n'y a pas d'autostabilisation due à la forme, mais bien plus une amplification des écarts de trajectoire. Par exemple, lorsque la maquette de *O. cubitus* est inclinée vers le haut, on observe une forte

### LES AUTEURS



Jean-Michel COURTLY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



Retrouvez la rubrique  
Idées de physique sur  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

suppression au niveau de la bouche et une zone de fortes dépressions au-dessus des yeux et sur le dessus de la carapace (voir la figure page ci-contre) ; compte tenu de l'anatomie du poisson, cela engendre un couple qui l'incline encore plus. Tout compte fait, ces contributions déstabilisantes l'emportent sur l'effet stabilisant des tourbillons, lequel se voit (ouf!) malgré tout confirmé.

Mais pourquoi ces différences entre les deux études ? Les capteurs de pression de la première étude étaient-ils mal disposés ? Les détails anatomiques des espèces ont-ils joué ? Et comment les ingénieurs de Mercedes ont-ils conçu un véhicule particulièrement stable et aérodynamique à partir de conclusions fausses ?

En premier lieu, tous s'accordent à dire que les nageoires doivent jouer un rôle essentiel dans la nage du poisson-coffre. Si la queue (nageoire caudale) et les nageoires pectorales

jouent le rôle de gouvernes, les nageoires dorsales et anales agissent comme des hélices propulsives. Des mesures sur des poissons bien vivants ont montré que ces dernières engendrent leurs propres tourbillons, d'intensité similaire à ceux de la carapace, de même sens ou de sens contraire. Le poisson peut donc, à volonté, soit affaiblir l'effet de stabilisation, soit le renforcer, et cela sans compter la contribution des couples liés à la portance sur ses gouvernes.

Ensuite, si l'allure générale de la voiture, son arrière et la formation des tourbillons s'inspirent du poisson-coffre, il en va tout autrement du nez du véhicule, très arrondi, au contraire du museau pointu et anguleux du poisson. Une différence qui améliore considérablement la pénétration dans l'air et élimine les effets aérodynamiques déstabilisants. Moralité : de la nature tu t'inspireras, mais tu ne la copieras point ! ■

## ■ BIBLIOGRAPHIE

S. Van Wassenbergh *et al.*, **Boxfish swimming paradox resolved : Forces by the flow of water around the body promote manoeuvrability**, *J. R. Soc. Interface*, vol. 12, 20141146, 2015.

S. C. Farina et A. P. Summers, **Biomechanics : Boxed up and ready to go**, *Nature*, vol. 517, pp. 274-275, 2015.

I. K. Bartol *et al.*, **Body-induced vortical flows : A common mechanism for self-corrective trimming control in boxfishes**, *The Journal of Experimental Biology*, vol. 208, pp. 327-344, 2005.

**Dans l'intérêt de la science**

france inter

mathieu vidard | la tête au carré 14:05-15:00

Intervenez franceinter.fr

## SCIENCE &amp; GASTRONOMIE

# Rattraper la sauce hollandaise

*On rate parfois cette sauce, qui peut tourner.*

*En fait, il est facile de la rattraper, juste avec de l'eau.*

*Même si les mécanismes physicochimiques sont à éclaircir.*

Hervé THIS



La sauce hollandaise ? Une belle découverte de la cuisine, puisqu'il y a la puissance du goût du jaune d'œuf, la petite acidité du jus de citron ou du vinaigre réduits, la longueur en bouche du beurre fondu, parfois le piquant frais du poivre, du cayenne... Elle accompagne à merveille le poisson, par exemple. Son seul inconvénient : elle rate parfois. Comment éviter cet écueil ? Le problème n'est pas tant de ne pas rater que de savoir rattraper une sauce ratée. En fait, pourvu que l'on dispose d'un protocole approprié, la sauce hollandaise est inratable !

Depuis environ le XVI<sup>e</sup> siècle, on voit des sauces hollandaises variées : avec ou sans œuf, avec jus de citron ou vinaigre, avec de l'eau... Quoi de commun ? Le beurre, et le fait que ce beurre soit clairement émulsionné.

Utilisons du « bon » beurre. « Bon » ne signifie pas qu'on l'aime, mais que la matière grasse qui le constitue dissout des composés odorants, sapides ou à action trigéminal (les piquants, les frais...). Et si le goût du beurre n'est pas perdu lors de la cuisson, il se retrouve dans la sauce achevée.

Certes, les recettes proposent au choix eau, jus de citron, vinaigre, vin, bouillon, etc., mais il s'agit toujours de solutions aqueuses. Pourquoi peut-on faire une sauce avec seulement de l'eau et du beurre ? Parce que l'eau est la « phase continue » où les gouttelettes de beurre fondu viennent s'émulsionner, entourées par les protéines présentes dans le beurre. En pratique, il est donc simple de mettre de l'eau dans une casserole, d'ajouter du beurre et de fouetter en chauffant. Le goût ? Celui que

l'on veut : les composés hydrosolubles, qui se dissolvent dans la phase aqueuse, sont souvent sapides, tandis que le beurre pourra dissoudre des composés hydrophobes odorants. Par exemple, si l'on ajoute une branche de thym dans la sauce que l'on prépare, on récupérera – après filtration, bien sûr – une sauce où le goût de thym sera présent, les branches ayant laissé échapper des composés tels que le thymol, l'eugénol, etc.

Le jus de citron ou le vinaigre ? Ils apportent de l'acidité, par l'acide citrique ou l'acide acétique qu'ils contiennent. Le jaune d'œuf ? Il apporte beaucoup de goût, mais aussi un peu d'eau et des protéines. Certaines de ces dernières contiennent des résidus d'acides aminés soufrés susceptibles de coaguler, qui sont donc importants pour la question du ratage.

La principale cause de ratage, pour ce qui concerne les émulsions, est la quantité insuffisante d'eau, laquelle s'évapore lors de la production de la sauce. Il faut au minimum 5 % d'eau. C'est d'ailleurs une solution que les cuisiniers ont empiriquement trouvée : dans son *Traité pratique de cuisine bourgeoise*, le cuisinier français Auguste Colombié écrit, en 1893 : « Au cas où elle tournerait, on peut la ramener en ajoutant une cuiller à café d'eau fraîche ».

Nous avons testé ce précepte en préparant des sauces hollandaises selon une recette utilisée dans l'enseignement culinaire français actuel. La sauce a été préparée, puis nous l'avons chauffée excessivement afin de la faire tourner, ce qui est arrivé. Lorsque nous avons ajouté une cuillerée d'eau, rien ne s'est produit, même quand nous avons

bien fouetté la sauce. En revanche, avec deux cuillerées d'eau supplémentaires, la sauce s'est à nouveau liée, comme si de rien n'était. Nous avons alors décidé de faire tourner une deuxième fois cette sauce rattrapée ; après avoir chauffé un certain temps, la sauce a tourné à nouveau. Nous l'avons à nouveau rattrapée avec des cuillerées d'eau. Et ainsi de suite trois fois, quatre fois.

La cinquième fois, ayant ainsi battu le record du monde de sauce hollandaise ratée et rattrapée, nous avons voulu pousser le ratage jusqu'à la cuisson du beurre. Nous avons ainsi chauffé jusqu'à produire un beurre noisette. Quelques cuillerées d'eau ont conduit la sauce à se réémulsionner.

Comment est-ce possible ? Si les protéines coagulent, il est possible que les autres composés tensioactifs du jaune d'œuf prennent le relais pour l'émulsion. En tout cas, l'eau est le paramètre essentiel de réussite. La sauce hollandaise est inratable et, mieux, la compréhension de sa constitution physico-chimique permet de varier son goût à l'infini. La gourmandise en sort grandie ! ■



Hervé THIS, physicochimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique  
Science & gastronomie sur  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)