

**Zeitschrift:** Energeia : Newsletter de l'Office fédéral de l'énergie  
**Herausgeber:** Office fédéral de l'énergie  
**Band:** - (2009)  
**Heft:** 4

**Artikel:** 17 ans de travaux et 16 jours de calcul pour simuler une flamme turbulente  
**Autor:** [s.n.]  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-642740>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

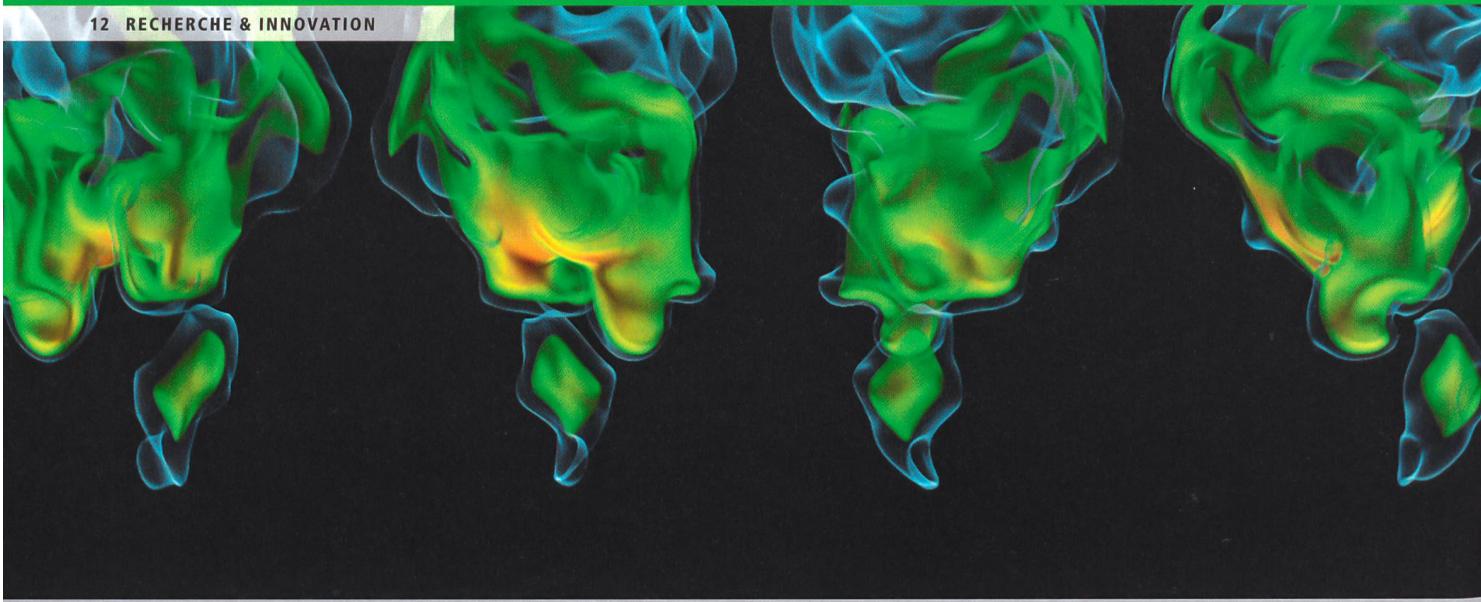
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 17.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**



# 17 ans de travaux et 16 jours de calcul pour simuler une flamme turbulente

## INTERNET

Recherche énergétique à l'Office fédéral de l'énergie (OFEN):

[www.recherche-energetique.ch](http://www.recherche-energetique.ch)

Programme de recherche Combustion à l'Office fédéral de l'énergie (OFEN):

[www.bfe.admin.ch/recherche/combustion](http://www.bfe.admin.ch/recherche/combustion)

Laboratoire d'aérothermochimie et des systèmes de combustion à l'EPFZ:

[www.lav.ethz.ch](http://www.lav.ethz.ch)

Energy Science Center, EPFZ:

[www.esc.ethz.ch](http://www.esc.ethz.ch)

Mathematics and Computer Science Division, Argonne National Laboratory:

[www.mcs.anl.gov](http://www.mcs.anl.gov)

**Illustration: représentation de la concentration en hydroperoxyde ( $HO_2$ ), un indicateur chimique pour l'auto-inflammation (même représentation sous quatre angles différents).**

Saviez-vous que derrière une flamme de quelques centimètres de hauteur, si simple en apparence, se cachent des phénomènes physico-chimiques d'une complexité étonnante? Après 17 ans de travaux de recherche scientifique de haut niveau et près de 16 jours de calculs sur l'un des ordinateurs les plus puissants au monde, l'équipe du professeur Konstantinos Boulouchos à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich (EPFZ) est parvenue à étudier les processus de combustion dans des détails jusqu'alors insoupçonnés. Un pas important en vue de mettre au point de futures installations de combustion plus efficaces pour l'approvisionnement énergétique.

A fin 2008, une équipe de chercheurs du Laboratoire d'aérothermochimie et des systèmes de combustion de l'EPFZ est parvenue à simuler numériquement – par simulation numérique directe – les processus d'auto-inflammation dans une flamme turbulente d'hydrogène. La simulation reproduit le comportement exact d'une flamme d'une hauteur de quelque 50 mm sur une durée de 11,5 millisecondes. Cette simulation a nécessité près de 16 jours de calcul sur 32 768 processeurs de l'un des supercalculateurs les plus puissants au monde. Cela équivaut à un temps de calcul de quelque 1436 années sur un ordinateur standard vendu dans le commerce. La simulation a produit 100 terabytes de données numériques, ce qui correspond à la quantité de données que l'on peut sauvegarder sur une pile de CD de près de 170 mètres de hauteur. Les ressources impressionnantes nécessaires à ce travail illustrent fort bien les efforts investis dans ce secteur de la recherche ainsi que l'importance de la combustion dans l'approvisionnement énergétique mondial.

L'auto-inflammation d'un combustible dans un courant turbulent joue un rôle central dans de nombreux processus de combustion. Pour pouvoir comprendre et développer de nouvelles technologies, il est fondamental d'élargir les connaissances dans ce secteur. En particulier les interactions complexes entre les différents

réactifs chimiques ainsi que la turbulence, deux phénomènes qui sont extrêmement difficiles à prédire.

## Simulation numérique: alternative crédible

Pour tenter de comprendre un phénomène naturel particulier, les scientifiques recourent généralement à des expériences en laboratoire. Dans le cas de la combustion, ces expériences se révèlent toutefois très compliquées et limitées en raison du nombre de variables très important à mesurer: concentrations et vitesses des réactifs, pression, température, nombreux produits chimiques issus de la réaction ... Et tout cela avec une importante résolution spatiale et temporelle, respectivement de l'ordre du micromètre et de la nanoseconde. Le développement rapide des superordinateurs et des algorithmes de calcul efficaces durant ces dernières années permet aujourd'hui aux scientifiques d'analyser des systèmes d'une complexité qu'il n'était pas possible d'atteindre auparavant.

«Nous faisons des simulations numériques dites directes», explique le professeur Konstantinos Boulouchos, responsable du Laboratoire d'aérothermochimie et des systèmes de combustion de l'EPFZ. «Il s'agit d'une méthode qui permet une approche de la turbulence où toutes les structures de l'écoulement potentiellement présentes sont explicitement calculées, sans faire appel à

des modèles simplificateurs.» Numériquement extrêmement coûteuse, l'approche a jusqu'alors été réservée à des très petits systèmes d'intérêt avant tout académique. «Puisque la simulation numérique directe ne fait pas appel à la modélisation de certains comportements mais qu'elle se base directement sur les interactions physico-chimiques, elle permet de dégager un nombre impressionnant d'informations qui ne peuvent pour certaines même pas être obtenues expérimentalement.»

### Puissance de calcul suisse à la traîne

«Ce ne fut pas facile, nous avons mis du temps pour en arriver là, confesse le chercheur établit à Zurich. Nous avons commencé nos premières simulations il y a 17 ans avec le soutien de l'Office fédéral de l'énergie. Les moyens informatiques d'alors ne nous permettaient pas de calculer grand-chose, tout juste une petite flamme laminaire. Nous avons évolué pas à pas vers des

**«UNE SIMULATION NUMÉRIQUE DIRECTE PERMET DE DÉGAGER UN NOMBRE IMPRESSIONNANT D'INFORMATIONS QUI NE PEUVENT POUR CERTAINES MÊME PAS ÊTRE OBTENUES EXPÉRIMENTALEMENT.»**

**PROFESSEUR KONSTANTINOS BOULOUCHOS, RESPONSABLE DU LABORATOIRE D'AÉROTHERMOCHIMIE ET DES SYSTÈMES DE COMBUSTION DE L'EPFZ.**

systèmes plus compliqués en essayant de comprendre, depuis des échelles très petites, comment cela fonctionne.» Avec succès puisque la simulation de l'auto-inflammation dans une flamme turbulente d'hydrogène réalisée fin 2008 est l'une des plus grandes simulations numériques directes jamais réalisées. «Nous avons développé un schéma numérique qui intègre de manière efficace et exacte les équations de conservation», précise Konstantinos Boulouchos. Le code numérique hautement généralisable a été développé par le doctorant Stefan Kerkemeier et le docteur Christos Frouzakis, responsable du groupe de simulation numérique directe dans le laboratoire zurichois, en collaboration avec le professeur Ananias Tomboulides de l'Université grecque de Macédoine de l'Ouest. Il se base sur le code NEK5000 pour la simulation de courants développé par le chercheur Paul Fischer et son équipe du Laboratoire national d'Argonne aux Etats-Unis.

La puissance informatique a été un autre facteur déterminant pour la réussite de cette simulation. Les calculs ont été effectués au Laboratoire national d'Argonne aux Etats-Unis. Dans un classement établi en novembre 2008, cette institution possédait alors le 5<sup>e</sup> ordinateur le plus puissant au monde, un IBM Blue Gene avec 163 840 processeurs. Bien loin devant les possibilités offertes par le Centre suisse de calcul scientifique basé à Manno dans le canton du Tessin regrette le chercheur Christos Frouzakis: «La Suisse est loin derrière les plus grands centres en terme de supercalculateurs.»

### Analyse des données d'ici à début 2010

Effectuer la simulation est une chose, interpréter 100 terabytes de données en est une autre. Le doctorant Stefan Kerkemeier a jusqu'à la fin de son travail de thèse prévu au printemps 2010 pour accomplir cette tâche considérable. «Il n'est pas facile de déduire quelque chose à partir d'un nombre aussi gigantesque de données. Il faut développer une méthode intelligente pour finalement pouvoir générer des représentations visuelles compréhensibles et établir des corrélations entre les différents paramètres, explique le jeune doctorant. Nous espérons des connaissances entièrement nouvelles, notamment dans les interactions entre les différents composants durant l'auto-inflammation.» Pour interpréter les informations issues de la simulation, les chercheurs ont adressé une demande à l'EPFZ pour obtenir un nouveau système d'évaluation des données. Avant cela, il leur faudra toutefois attendre que ces données numériques aient

été transférées avec succès entre Argonne et Zurich, ce qui n'était pas encore le cas au moment de l'entretien mené au début mai. «Cela prend quelques mois pour le transfert par le réseau», s'amuse le thésard.

Et à quoi vont bien pouvoir servir ces 100 terabytes de données numériques une fois décodées? «Aujourd'hui, il n'y a que peu de groupes dans le monde capables de simuler le comportement turbulent d'une flamme, précise Christos Frouzakis. Toutefois, nous sommes encore loin de pouvoir simuler le comportement entier d'une turbine à gaz dans le détail. Et notre idée n'est pas d'attendre encore 20 ans avant de pouvoir le faire. Les résultats que nous avons obtenus, qui nous permettent d'avoir plus de données que nous n'aurions pu en récolter par des expériences, sont en mesure d'être utilisés pour tester et améliorer les modèles qui sont aujourd'hui utilisés par l'industrie pour simuler les grandes installations de combustion.» Mais davantage que l'application elle-même, le professeur Boulouchos souhaite avant tout montrer l'importance et l'utilité qu'il peut y avoir à investir sur le long terme dans la recherche: «La vision correspondante des responsables du programme Combustion à l'Office fédéral de l'énergie dans les années 1990 s'est avérée être un élément clé qui nous a permis d'atteindre le niveau actuel.»

(bum)

### Recherche sur la combustion à l'OFEN

La combustion demeure le principal processus de conversion de l'énergie utilisé pour la propulsion des véhicules comme pour la production de courant électrique et de chaleur. En Suisse (75%) comme à l'étranger (85%), une majeure partie de l'énergie consommée provient de la combustion d'agents fossiles tels que le pétrole, le gaz naturel ou le charbon, ainsi que d'agents renouvelables comme le bois, le bioéthanol, le biogaz ou le biodiesel.

La combustion d'agents fossiles a pour inconvénients de consommer des matières premières disponibles en quantités limitées et d'émettre du CO<sub>2</sub>, sans parler des émissions nocives pour l'homme et pour l'environnement comme les poussières fines, les oxydes d'azote ou le monoxyde de carbone. On accorde de ce fait la priorité à une amélioration de l'efficacité des processus de combustion et à la réduction des émissions de substances nocives ainsi qu'à un recours accru à l'énergie de la biomasse.

La recherche suisse sur la combustion a une longue histoire et une réputation internationale. Plusieurs multinationales ont installé leur centre de développement en Suisse, tout comme certains fabricants de moteurs et nombre de fournisseurs de l'industrie de la combustion, qui génèrent un chiffre d'affaires annuel de CHF 2 milliards. La Confédération investit quant à elle CHF 11 millions par an dans la recherche sur la combustion, axée sur les points clés suivants:

#### • Méthodes et instruments de recherche

Les instruments de recherche tels que les fondements physiques, la simulation numérique, les méthodes de mesure et les supports de test doivent encore être perfectionnés et adaptés aux nouvelles exigences, applicables par exemple à la combustion de la biomasse.

#### • Efficacité des systèmes

Pour réduire la consommation de carburant et les émissions de substances nocives, il convient d'améliorer encore l'efficacité des processus, en tenant compte de l'ensemble du système et des différents états de charge.

#### • Emissions polluantes

Les futures normes en matière d'émissions telles que l'Euro 6 ou la USA 2010/14 imposeront une réduction supplémentaire des émissions d'oxydes d'azote, d'hydrocarbures, de monoxyde de carbone, ainsi que de suies et de poussières fines.

#### • Agents énergétiques

Il y a lieu d'améliorer les systèmes en vue d'un recours accru aux combustibles biogènes, d'adapter la composition des combustibles pour réduire les émissions polluantes et d'accroître le rendement des processus de combustion.