

Éditorial

OUTILS DE SIMULATION POUR LA CONCEPTION ET LE CONTRÔLE DU GROUPE MOTOPROPULSEUR

Le contexte social, politique et environnemental actuel impose des réductions importantes des émissions de gaz à effet de serre, en particulier du CO₂, ainsi que des émissions de gaz polluants liées au transport. La mise en place d'exigences réglementaires européennes de plus en plus sévères (Euro 5a en 2009, Euro 5b en 2011*) impose une optimisation des systèmes de propulsion moteur et véhicule ainsi que le développement de nouveaux concepts. Ces thèmes deviennent des domaines de recherche et de développement incontournables.

La modélisation et la simulation numérique sont des termes génériques qui désignent à la fois le développement et l'utilisation d'outils de calcul. Leur objectif est la description des performances en termes de consommation d'énergie et d'émissions de polluants des systèmes moteurs, des groupes motopropulseurs et des véhicules. La simulation numérique est réalisée à l'aide de codes de calcul où sont implantés des modèles, permettant de décrire les phénomènes complexes associés aux systèmes physiques et ayant un niveau de précision variable selon le degré de prédictivité recherché.

Les instruments de modélisation et de simulation numérique constituent des outils efficaces. La formalisation de projets de conception et d'optimisation de moteurs et de groupes motopropulseurs autour de ces moyens permet un gain de temps considérable dans le processus de conception. Ils constituent aussi des moyens clés de liaison et de collaboration entre les équipes de recherche pluri-disciplinaires, intra et inter entreprises et les organismes de recherche. Enfin, ils permettent de capitaliser de manière centralisée des connaissances multi-disciplinaires au sein d'une plateforme commune.

Aujourd'hui, l'utilisation des outils de modélisation et de simulation dans le domaine des moteurs et des groupes motopropulseurs peut être résumée en deux catégories qui répondent à des besoins précis : la compréhension et l'aide à la conception d'un composant relèvent de la simulation 3D ; et le dimensionnement, la conception et le contrôle de systèmes complexes sont l'objet de la simulation système.

La simulation 3D est surtout utilisée dans des phases amonts de projets de compréhension, de conception et d'optimisation de composants individuels du moteur ou du groupe motopropulseur. Elle vise à une meilleure compréhension du comportement des phénomènes ayant lieu en leur sein. Ceci permet de comparer qualitativement, mais également de plus en plus de manière quantitative, différentes options de dessin afin de permettre un choix optimum. La compréhension des résultats expérimentaux peut aussi être améliorée car l'information fournie par simulation est chaque fois plus riche. Cette description est obtenue à l'aide de la résolution numérique des équations fondamentales traduisant le phénomène étudié. Un exemple dans le cadre de la mécanique des fluides est la CFD (Computational Fluid Dynamics) qui cherche à résoudre les équations de

* À titre d'exemple, la norme Euro 5a impose aux véhicules équipés d'un moteur à allumage commandé une limite de 100 mg/km de HC totaux, de 68 mg/km de HC non méthaniques, de 60 mg/km de NOx, de 1000 mg/km de CO et de 5 mg/km de particules, uniquement pour les moteurs à injection directe. Pour les véhicules équipés d'un moteur à allumage par compression, la norme Euro 5a impose une limite de 230 mg/km de HC+NOx, de 180 mg/km de NOx, de 500 mg/km de CO et de 5 mg/km de particules (source: AECC Newsletter, juillet-août 2008).

Navier-Stokes et qui est largement utilisée pour étudier les écoulements réactifs dans la chambre de combustion des moteurs à combustion interne. La simulation 3D nécessite une description détaillée de la géométrie de l'écoulement. Sa complexité ainsi que les détails de la résolution impliquent des temps de calcul au moins 10^4 fois plus élevés que le temps réel.

La simulation système est, elle, utilisée pour dessiner et pour valider des systèmes complets pouvant aller du moteur jusqu'au véhicule, avec des temps de retour qui dépendent des besoins de l'étude en cours. Ceci devient particulièrement intéressant aujourd'hui avec l'hybridation croissante des véhicules qui implique la conception de systèmes multi-physiques de plus en plus complexes. La résolution des équations traduisant le comportement de tels systèmes est effectuée à l'aide de méthodes globales ou intégrales permettant de décrire les principales caractéristiques de chaque composant et leur interaction dans l'ensemble du système. Tous les phénomènes présents doivent alors être traités : écoulement, combustion, interactions thermo-mécaniques, électriques et électromagnétiques, hydrauliques, vibrations, etc. La simplification de la description permet une résolution dont le temps de calcul varie de quelques centaines de fois le temps réel jusqu'au temps réel.

Des simulateurs précis de systèmes moteur et de groupes motopropulseurs tournant en temps réel sont aujourd'hui amplement utilisés lors de la mise en place de stratégies et de composants de contrôle du moteur et du groupe motopropulseur. Leur complexité croissante impose des algorithmes de contrôle performants capables d'adapter en permanence le fonctionnement du moteur et du véhicule à leur environnement. Le contrôle détient donc un rôle majeur et doit être accompagné par des simulateurs efficaces, répondant en temps réel aux changements de cet environnement. En effet, un simulateur basé sur des modèles physiques capables de reproduire la dynamique des phénomènes en jeu, couplé à l'algorithme de contrôle, a un potentiel très élevé d'optimisation du fonctionnement du système. Un environnement de simulation et de contrôle couplés pourra également être utilisé durant le processus de conception pour tester d'abord un composant et parvenir enfin jusqu'au système complet.

Les articles présentés dans ce numéro spécial cherchent à illustrer comment la modélisation et la simulation numérique sont aujourd'hui abordées et appliquées à la conception, à la compréhension et à l'optimisation d'un groupe motopropulseur.

Des études théoriques des phénomènes en jeu sont à la base de la démarche. Elles peuvent être décrites mathématiquement par des systèmes d'équations qui sont discrétisées numériquement afin de rendre possible leur résolution informatique. La physique qui gère le fonctionnement des groupes motopropulseurs étant très complexe (écoulements turbulents réactifs non stationnaires, transferts thermiques, interaction entre de nombreux organes, etc.), ces systèmes ne sont pas fermés et des techniques de modélisation sont alors nécessaires. Elles reposent sur des hypothèses plus ou moins fortes, fonction de la complexité et du temps de réponse souhaités. Ainsi, les trois premiers articles de ce numéro spécial illustrent cette idée en proposant des modèles adaptés à la simulation de la combustion dans les moteurs. La démarche repose sur le constat que la physique des systèmes traités est indépendante de la technique de modélisation. Il doit alors être possible d'alimenter la simulation système avec des modèles conçus pour le calcul 3D. Elle peut ainsi bénéficier de modèles détaillés issus du 3D, spatialement et temporellement plus précis. Cette approche rencontre aujourd'hui un franc succès. L'article de Richard *et al.* présente un modèle réduit applicable à la combustion dans les moteurs à allumage commandé. L'article de Pera *et al.* expose un modèle générique applicable aussi bien en simulation système qu'en calcul 3D, dédié à la simulation fine de la cinétique chimique en milieu turbulent. L'article de Dulbecco *et al.* applique ce dernier modèle au cadre de la simulation système de moteurs HCCI.

Dans le cadre de la simulation système, la modélisation détaillée du post-traitement est abordée dans l'article de Mauviot *et al.* La démarche est la même que celle décrite précédemment. Les lois de la physique sont discrétisées dans un code numérique adapté, et une modélisation des termes relatifs au fonctionnement des organes de post-traitement est réalisée. Les auteurs s'intéressent à

tous les organes présents sur les véhicules légers et sur les poids lourds actuels : catalyseur trois voies (3WC), catalyseur d'oxydation Diesel (DOC), filtre à particules (DPF), catalyseur de réduction sélective (SCR) et piège à NOx en milieu pauvre (LNT).

Le code de calcul constitue le point d'ancrage de toute la démarche de modélisation/simulation. Il existe aujourd'hui une multitude de codes disponibles, reposant chacun sur une stratégie propre de gestion de maillages, de discrétisation des équations et de modélisation de leurs différents termes. La simulation des groupes motopropulseurs à l'IFP repose sur trois codes de calcul distincts dont deux font l'objet d'articles dans cette revue. Le premier article de Bohbot *et al.* décrit les développements du code IFP-C3D, un code de simulation 3D moteur conçu à l'IFP, capable de gérer des maillages mobiles non structurés et de traiter des écoulements réactifs turbulents moyennés (approche RANS), compressibles et à deux phases (liquide et vapeur). Cet article aborde en particulier la parallélisation du code IFP-C3D, indispensable à son utilisation sur des super-calculateurs parallèles largement répandus aujourd'hui. Le second article de Bohbot *et al.* traite du couplage de codes de calcul multi-échelles. Ce couplage a pour intérêt la simulation d'un système complexe comme le moteur avec une description détaillée de certains organes (la combustion à l'intérieur de la chambre par exemple). Cette démarche est de plus en plus répandue, stimulée par l'accroissement de la puissance des machines de calcul. Les codes dont le couplage est décrit dans cet article sont le code 3D IFP-C3D et la plateforme de simulation système LMS-AMESim-Lab. Celle-ci, développée par la société LMS, intègre plusieurs bibliothèques, dont celles développées à l'IFP pour la simulation du moteur, du post-traitement et du véhicule complet.

Les quatre derniers articles de cette revue illustrent des simulations numériques réalisées à l'aide des codes de calcul moteur où les modèles physiques ont été implantés. Il s'agit de la phase de capitalisation de la démarche décrite précédemment. Son objectif est de concevoir, de mieux comprendre et d'optimiser des systèmes de groupes motopropulseurs.

Les articles de Gautier *et al.* et d'Albrecht *et al.* décrivent les systèmes moteur Diesel où des simulateurs d'un moteur complet ont d'abord été développés, puis utilisés dans le cadre d'études de contrôle. Ce contrôle moteur est réalisé à l'aide d'outils dédiés et nécessite une description fine de la physique des systèmes. Les simulateurs moteur créés à l'aide du logiciel LMS-AMESim-Lab et de la bibliothèque moteur IFP-Engine ont été utilisés.

Les articles de Laget *et al.* et de Réveillé *et al.* montrent des applications de calcul 3D RANS, à des chambres de combustion de moteur Diesel, pour le premier, et à un moteur à allumage commandé, pour le second. Ils ont pour objet l'étude de modes de fonctionnement non conventionnels de ces deux types de moteurs, problématiques qui intéressent fortement les constructeurs automobiles. Dans le cas du moteur Diesel, il s'agit du démarrage à froid qui reste un thème de recherche d'actualité nécessitant encore de nombreux efforts de compréhension. Dans le moteur à allumage commandé, l'accent est mis sur les combustions anormales résultant d'une forte réduction de la cylindrée de ces moteurs, accompagnée d'une forte augmentation de la charge, le tout visant à une réduction importante de la consommation et des émissions de CO₂ qui en résultent.

Aujourd'hui, à l'époque de la généralisation d'un ordinateur personnel de plus en plus puissant et de la banalisation du calcul massivement parallèle, la simulation numérique a gagné toute sa place, non seulement au niveau des centres de recherche mais également dans les bureaux d'étude des constructeurs automobiles. Elle est, en effet, tout à fait intégrée dans le processus de conception industrielle.

Les voies de progrès sont très nombreuses. Par exemple, l'électrification des véhicules terrestres, avec des possibilités de couplage variées entre moteur thermique, moteur électrique, batterie, transmission et contrôle moteur, rend la simulation des systèmes véhicules complets incontournable dans le cadre de l'avant-projet ou de l'optimisation des systèmes. La simulation système peut aussi être utilisée pour la création de bancs moteurs HIL (*Hardware In the Loop*). Il s'agit d'un

ensemble faisant appel à des simulateurs liés à des algorithmes de contrôle, couplés à des systèmes physiques réels. L'IFP a mis en fonctionnement un tel banc dont l'objectif est la pré-étude de stratégies d'hybridation véhicule et qui est composé d'un moteur thermique et d'un simulateur du moteur électrique, de la transmission, de la batterie et du véhicule. L'ensemble est géré par un contrôle moteur dédié.

Quant à la simulation 3D, la complexité des phénomènes physiques traités laisse place à de nombreux autres progrès, notamment dans les domaines de la combustion multi-carburants, des écoulements à deux phases ou dans le domaine numérique. En effet, l'utilisation de machines massivement parallèles et de nouveaux processeurs ouvre la voie à des développements significatifs. Des géométries de plus en plus complexes liées à des modèles plus sophistiqués pourront à terme être utilisées. La résolution d'écoulements turbulents via la simulation aux grandes échelles (ou LES en anglais pour *Large-Eddy Simulation*) est un thème d'actualité auquel des ressources importantes sont aujourd'hui dédiées. Le couplage fort entre différents outils de calcul (cf. le second article de Bohbot *et al.*) est également un sujet aux nombreux débouchés. Différentes solutions peuvent être envisagées, comme le couplage entre codes de mécanique des fluides, de structures, de thermique, de rayonnement, d'acoustique, en utilisant des outils de simulation système de plus en plus performants.

Au regard de l'évolution de l'utilisation de la simulation, au sens large, dans la conception de véhicules et de ses nombreuses possibilités d'application exposées précédemment, on peut dire qu'un processus d'évolution vers ce qu'on peut appeler « le véhicule virtuel » est en marche. Ce processus pourrait à terme permettre la simulation du système complet intégrant différentes échelles (de l'approche système au calcul 3D détaillé) et combinant toutes les problématiques rencontrées ainsi que leurs interactions (aérodynamique, acoustique, combustion, écoulement polyphasique, etc.).

António Pires da Cruz et Christian Angelberger
Département Modélisation et Simulation systèmes
Direction Techniques d'Applications énergétiques - IFP

Adlène Benkenida
Centre de Résultats Moteurs-Énergie - IFP

Editorial

SIMULATION TOOLS FOR POWERTRAIN DESIGN AND CONTROL

The current social, political and environmental context requires significant reductions in greenhouse gas emissions, CO₂ in particular, as well as gaseous pollutant emissions related to transportation. The implementation of European regulatory requirements, which have become more and more stringent (Euro 5a in 2009, Euro 5b in 2011*), requires engine and vehicle propulsion systems to be optimized and new concepts to be developed. These themes have become essential areas of research and development.

Modeling and numerical simulation are generic terms which refer to both the development and use of computational tools. Their goal is to describe performances in terms of energy consumption and pollutant emissions of engine systems, powertrains and vehicles. Numerical simulation is performed with the help of calculation codes which include models to describe complex phenomena associated with physical systems, and which have a variable level of accuracy depending on the degree of predictivity required.

Modeling and numerical simulation tools constitute an efficient way to centralize and accumulate multi-disciplinary knowledge within a platform of numerical simulation tools necessary for the development and optimization of such concepts. The formalization of design and optimization projects for engines and powertrains using these tools helps to save a considerable amount of time in the design process. They also constitute key liaison and collaboration resources between multi-disciplinary research teams, intra- and inter-enterprises and research organizations.

Nowadays, the use of modeling and simulation tools in the field of engines and powertrains can be summarized in two categories that meet specific needs: understanding and assistance in component design falls within 3D simulation; and system simulation focuses on the dimensioning, design and control of complex systems.

3D simulation is mainly used in the early phases of projects dealing with the understanding, design and optimization of individual engine or powertrain components. The aim is to better understand the behavior of the phenomena happening within the components. This not only allows for a qualitative comparison, but also (in an increasingly quantitative manner) for a comparison between different design options in order to choose the optimum option. The understanding of experimental results can also be improved because the information provided by the simulation becomes increasingly richer each time. This description is obtained using the numerical solution of fundamental equations reflecting the phenomenon studied. One example in the context of fluid mechanics is CFD (Computational Fluid Dynamics), which attempts to solve Navier-Stokes equations and is widely used to study reactive flows in the combustion chamber of internal combustion engines. 3D simulation requires a detailed description of the geometry of the flow. Its complexity, as well as the details of the solution, implies a computation time that is at least 10⁴ times higher than the real-time.

* For example, for vehicles equipped with a spark ignition engine, the Euro 5a standard imposes a limit of 100 mg/km for the total HC, 68 mg/km for non-methane HC, 60 mg/km for NO_x, 1000 mg/km for CO and 5 mg/km for particulates. The latter only to direct injection engines. For vehicles equipped with compression ignition engines, the Euro 5a standard imposes a limit of 230 mg/km for HC + NO_x, 180 mg/km for NO_x, 500 mg/km of CO and 5 mg/km of particulates (source: AECC Newsletter, July-August 2008).

System simulation itself is used to design and validate complete systems, ranging from the motor up to the vehicle, with a turn-around time that depends on the needs of the current study. This has become particularly relevant today with the increasing hybridization of vehicles, which involves the design of multi-physical systems that are increasingly more and more complex. The solving of equations reflecting the behavior of such systems is carried out using global or integral methods to describe the main characteristics of each component and their interaction throughout the entire system. Therefore, all the present phenomena must be treated: flow, combustion, thermo-mechanical interactions, electrical and electromagnetic interactions, hydraulic interactions, vibrations, etc. The simplification of the description allows one to obtain a solution with a computation time ranging from a few hundred times up to the actual real-time.

Accurate simulators for engine and powertrain systems running in real-time are now widely used in the implementation of strategies and control components for engines and powertrains. Their increasing complexity requires efficient control algorithms capable of continually adapting the operation of the motor and the vehicle to their environment. Therefore, the control plays an important role and must be accompanied by efficient simulators, responding in real-time to changes from that environment. Indeed, a simulator based on physical models capable of reproducing the dynamic of the phenomena involved, coupled with the control algorithm, has a very high potential to optimize the operation of the system. A coupled simulation and control environment may also be used during the design process to first test a component and then finally the complete system.

The articles presented in this special issue aim to illustrate how modeling and numerical simulation are currently addressed and applied to the design, understanding and optimization of powertrains.

This approach is based on theoretical studies of the phenomena involved. They can be described mathematically by systems of equations that are numerically discretized in order to allow problem solving using a computer. The physics that control powertrain operation are very complex (non-stationary reactive turbulent flows, heat transfer, interaction between many components, etc.). These systems are not closed and thus, modeling techniques are necessary. They are based on more or less strong assumptions, depending on the complexity and desired response time. As such, the first three articles of this special issue illustrate this idea by proposing suitable models for the simulation of combustion in engines. This approach relies on the finding that the physics of treated systems are independent of the modeling technique. Thus, it must be possible to build system simulation tools using models designed for 3D calculation. System simulation can therefore benefit from detailed models coming from the 3D, which are spatially and temporally more accurate. This approach is very successful today. The article by Richard *et al.* presents a reduced model applicable to combustion in spark ignition engines. The article by Pera *et al.* outlines a generic model equally applicable to both system simulation and 3D calculation, which is dedicated to the detailed computation of the chemical kinetics in a turbulent environment. The article by Dulbecco *et al.* applies this model in the framework of system simulation of HCCI engines.

Within the context of system simulation, the article by Mauviot *et al.* discusses the detailed modeling of the after-treatment. The steps are the same as described above. The laws of physics are discretized in an adapted numerical code, and a modeling of terms relative to the after-treatment of components is carried out. The authors focus on all components onboard current passenger and heavy-duty vehicles: three-Way Catalyst (3WC), Diesel Oxidation Catalyst (DOC), Diesel Particulate Filter (DPF), Selective Catalytic Reduction (SCR) and Lean NO_x Trap (LNT).

The computation code is the back-bone for the entire modeling/simulation approach. Today, there are a multitude of codes available, each based on its own strategy for grid management, equation discretization and modeling of their various terms. At IFP, powertrain simulation is based on three distinct calculation codes, two of which are the subject of articles presented in this review. The

first article by Bohbot *et al.* describes the developments of the IFP-C3D code, a 3D engine simulation tool conceived at IFP, capable of managing mobile non-structured grids and handling averaged turbulent reactive flows (RANS approach), compressible and at two-phases (liquid and vapor). In particular, this article discusses the parallelization of the IFP-C3D code, which is essential for its use in parallel supercomputers widely available today. The second article by Bohbot *et al.* treats the coupling of multi-scale calculation codes. The main interest in this coupling is the simulation of a complex system, such as an engine, with a detailed description of certain components (combustion within the chamber, for example). This approach is becoming more and more widespread and is stimulated by an increase in the power of computation machines. In this paper, coupling is described for the following codes: the 3D IFP-C3D code and the LMS-AMESim-Lab system simulation platform. The latter is developed by the LMS company and integrates several libraries including those developed at IFP for engine, after-treatment and complete vehicle simulation.

The remaining four articles in this review illustrate numerical simulations performed using the engine calculation codes that include physical models. This is the capitalization phase of the approach outlined above. Its objective is to design, to better understand and to optimize powertrain systems.

The articles by Gautier *et al.* and Albrecht *et al.* describe Diesel engine systems where simulators for a complete engine were first developed, and then used as part of the control studies. This engine control was carried out using dedicated tools and requires a detailed description of the physics of the systems. Engine simulators created using the LMS-AMESim-Lab software and the IFP-Engine library were used.

The articles by Laget *et al.* and Réveill   *et al.* show applications of 3D RANS calculation for combustion chambers for a Diesel engine in the first article and a spark ignition engine in the second. Their aim was to study methods of non-conventional functioning for these two types of engines, a problem of great interest to car manufacturers. In the case of the Diesel engine, the problem concerns cold start, which is still a current research theme that needs further efforts to be understood. In the spark ignition engine, emphasis is placed on abnormal combustion caused by the sharp reduction in the swept volume of these engines, accompanied by a sharp increase in the load, all aimed at significantly reducing the resulting consumption and CO₂ emissions.

Today, in a time when personal computers are becoming more and more powerful and massively parallel computing is trivialized, numerical simulation has earned its place not only in research centers but also in research departments of car manufacturers. In fact, numerical simulation is now completely integrated into the industrial design process.

There are numerous opportunities for progress. For example, the electrification of land vehicles with numerous possibilities of coupling between IC engines, electric engines, batteries, transmissions and engine control makes the simulation of complete vehicle systems essential in the context of a preliminary project or optimization of the systems. System simulation could also be used to create HIL (Hardware in the Loop) engine test benches. It comprises a set that uses simulators linked to control algorithms, coupled with real physical systems. IFP has put such a bench into operation. The objective is the preliminary study of vehicle hybridization strategies. The bench is composed of an IC engine and a simulator handling the electric engine, the transmission, the battery and the vehicle. The unit as a whole is managed by a dedicated engine control.

As for 3D simulation, the complexity of the treated physical phenomena leaves room for many other advances, notably in the areas of multi-fuel combustion, two-phase flows or in the numerical field. Indeed, the use of massively parallel machines and new processors opens the way for significant developments. More and more complex geometries linked to more sophisticated models may eventually be used. The understanding of turbulent flows using Large Eddy Simulation (LES) is a current theme to which significant resources are dedicated. The strong

coupling between different computation tools (*e.g.*, the second paper by Bohbot *et al.*) is also a theme with numerous potential applications. Different solutions can be envisaged, such as coupling between fluid mechanics, structure analysis, heat transfer, radiation, and acoustics codes using system simulation tools that are becoming more and more efficient.

In light of developments in the use of simulation (in a broad sense) in vehicle design and its wide range of applications outlined above, it is possible to say that a process of evolution toward what we can call the “virtual vehicle” is on its way. This process could eventually allow the simulation of the complete system integrating different scales (from the system simulation approach to detailed 3D calculation) and combining all sets of problems encountered as well as their interactions (aerodynamics, acoustics, combustion, multiphase flow, etc.).

António Pires da Cruz and Christian Angelberger
Engine CFD and Simulation Department
Energy Applications Techniques Division - IFP

Adlène Benkenida
Powertrain Engineering Technology Business Unit - IFP