

## LES PROGRÈS DU PROTOTYPAGE VIRTUEL

Se représenter un objet et son comportement avant d'en avoir une ébauche matérielle est une possibilité exploitée de plus en plus largement par l'industrie. Les progrès du prototypage virtuel, devenu interactif grâce au calcul en temps réel, ouvrent à cette forme de simulation de nouvelles perspectives dans de nombreux domaines. Le CEA participe activement à ces développements.



#### De la conception à la maintenance

Le prototypage virtuel utilisé en milieu industriel a déjà permis de réduire le temps de développement, le coût de l'industrialisation des produits, ainsi que les coûts de formation et de maintenance associés. Les capacités de calcul disponibles permettent désormais la création d'environnements virtuels, représentant des systèmes manufacturés dont le comportement se rapproche de celui qu'ils auraient dans le monde réel. Elles permettent aussi de visualiser et de manipuler ces objets virtuels en temps réel, autorisant l'interactivité.

Le prototypage virtuel n'est en fait que la partie amont d'un processus de gestion du cycle de vie d'un produit (en anglais PLM, product life management) qui prend en compte toutes les contraintes de fabrication (robotique, ergonomie), d'utilisation et de maintenance du produit (formation). Tous les grands de la conception assistée par ordinateur (CAO) comme Catia

(Dassault Systèmes) ou PTC (Parametric Technology Corporation) proposent dorénavant cette approche. La demande s'exprime dans tous les secteurs industriels porteurs tels que l'automobile, l'aérospatial, le transport, l'énergie mais aussi dans l'architecture, la culture et le médical, par exemple.

Aujourd'hui, les industriels de l'automobile et de l'aérospatial utilisent encore largement des maquettes physiques pour "prototyper", par exemple, les opérations de montage ou de maintenance. Utilisées comme outil de visualisation, ces maquettes présentent cependant un certain nombre d'inconvénients. Elles sont onéreuses et souvent obsolètes avant d'être utilisées car elles ne reflètent pas toujours la dernière version du produit. C'est pourquoi ces industriels essayent de plus en plus de leur substituer la maquette numérique(1) et les technologies de réalité virtuelle. Celles-ci doivent permettre d'immerger l'être humain de façon réaliste dans un monde virtuel et d'en tirer des avantages conséquents.

#### Le développement des interfaces haptiques

Prenons comme premier exemple la conception de l'intérieur d'un véhicule automobile. Les concepteurs souhaitent déterminer si le conducteur peut accéder facilement aux différents équipements (autoradio, boîte à gants, etc.). La pratique actuelle consiste à utiliser des maquettes physiques ou la visualisation stéréoscopique d'un modèle numérique pour prototyper l'intérieur de véhicule. Il semble judicieux de développer

(1) Le consortium AIT (Advanced Information Technology) définit la maquette numérique comme "une simulation réaliste sur ordinateur d'un produit ayant la capacité de toutes les fonctionnalités exigées pour la conception, la fabrication et le service du produit et qui est employée comme une plate-forme pour le développement du produit et des processus, pour la communication et la décision, de la première esquisse de conception jusqu'à la maintenance et le recyclage du produit".

des interfaces haptiques(2), qui permettront de "toucher" cet intérieur virtuel. En exploitant ces interfaces, les études ergonomiques recouvriront un domaine d'expertise plus vaste lors de la conception du véhicule. Cette méthode est beaucoup plus rapide, moins onéreuse et plus exhaustive que la réalisation d'un prototype physique.

Un deuxième exemple dans l'industrie automobile est celui du montage. Actuellement, les concepteurs des chaînes utilisent des pièces réalisées en stéréolithographie pour tester le montage des pièces et les outillages associés. Les utilisateurs jugent l'emploi des logiciels de simulation actuels de type Catia ou Robcad trop complexe pour ce type d'opération. Dans un futur proche, les concepteurs pourront utiliser, d'une part, des systèmes de visualisation stéréoscopiques pour prototyper leurs chaînes et d'autre part, des interfaces haptiques couplées à des logiciels de simulation physique temps réel (calcul des collisions et des forces de contact) afin de prototyper les tâches. L'objectif? Rendre utilisables les outils de prototypage virtuel par les gens de métier et non par des spécialistes, sans qu'ils aient, par exemple, à programmer une seule ligne de code.

(2) Haptique; du grec haptein qui veut dire "toucher, manipuler": relatif au sens du toucher. Un dispositif haptique restitue la sensation du toucher au niveau des doigts ou de la main.

## Les partenaires du projet PERFRV

Le projet de plate-forme PERFRV, centre d'expérimentation en réalité virtuelle sur la thématique du bureau d'études du futur, regroupe des partenaires du monde de la recherche et des industriels. Les partenaires académiques du projet sont : les INRIA Rennes et Rocquencourt, le CEA/List, l'École des mines de Paris, l'Institut de l'image de Chalon-sur-Saône, le Labri (Laboratoire bordelais de recherche en informatique), le LRP (Laboratoire de robotique de Paris) et le Limsi (Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur). Les partenaires industriels sont : l'Adepa, EADS/CCR (centre commun de recherche Aérospatiale-Matra), l'IFP (Institut français du pétrole), CLARTE (Centre lavallois de ressources technologiques), Dassault Aviation, GIAT Industries, PSA, Renault, Alstom Transport, EDF (Direction des études et recherche).

À très court terme, les autres applications majeures du prototypage virtuel et du retour haptique semblent donc être la simulation virtuelle des opérations de montage et/ou de maintenance ainsi que la formation au geste technique. Mais toutes ces technologies peuvent aussi être utilisées dans le domaine de la culture. Dans le cadre du projet européen MUVII (Multi-User Virtual Interactive Interface), les équipes du CEA développent le concept de visite virtuelle de musée avec rendu haptique. Le visiteur pourra, par exemple, visualiser des statues en stéréoscopie et surtout les toucher virtuellement. La question de savoir si les technologies de prototypage virtuel sont capables de remplacer entièrement l'utilisation des maquettes physiques est devenue d'actualité. La puissance de calcul des PC et des

cartes graphiques associées, grâce à l'essor des jeux vidéo, permet depuis peu d'envisager le déploiement massif de ces technologies dans l'industrie.

### Le projet PERFRV

Fin 1999, deux chercheurs, Raymond Fournier, du Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies (List) du CEA, et Bruno Arnaldi, de l'Irisa, l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires (Inria Rennes) ont souhaité créer une structure d'expérimentation permettant de développer des solutions innovantes en simulation virtuelle à partir des besoins concrets exprimés par les industriels dans le domaine du design, de la formation, de la maintenance, du montage ou de l'assemblage. Cette volonté a abouti au projet PERFRV (PlatEfoRme Française de Réalité Virtuelle). C'est une plate-forme RNTL (Réseau national des technologies logicielles) labellisée en juin 2000 et financée par le ministère chargé de la Recherche. Elle est destinée à soutenir un programme scientifique sur plusieurs thèmes de la simulation physique de systèmes mécaniques en temps réel (qui doit s'appuyer sur de nouvelles méthodes de modélisation numérique) : l'interaction physique – geste et retour haptique - qui impose l'étude de périphériques innovants, le travail coopératif (interaction multi-utilisateurs en environnement virtuel) et l'ergonomie des interfaces (encadré 1).

Le CEA/List intervient dans plusieurs actions du projet liées au rendu haptique, à l'ergonomie et à la simulation physique en temps réel. Il travaille par exemple avec EADS, Dassault Aviation et l'Inria sur l'évaluation des différentes possibilités de simulation en réalité virtuelle d'une opération de type assemblage. L'opération type consiste à intégrer un équipement dans un environnement complexe, par exemple une tuyauterie hydraulique dans le mât d'un réacteur d'Airbus. L'enjeu consiste à proposer une solution optimale à un problème significatif du monde de l'atelier numérique aéronautique. Cela



Le système immersif et les deux bras Virtuose du système Phare permettent un travail virtuel en 3D très réaliste.



### La plate-forme Phare

La plate-forme de réalité virtuelle Phare créée par le CEA/List est composée de cinq éléments principaux (figure):

• un simulateur physique temps réel. Un tel simulateur de rendu graphique a pour vocation principale de décrire visuellement le monde virtuel et les objets qui le peuplent. Les différents éléments de la scène virtuelle possèdent des attributs de base (forme, situation dans l'espace) et des attributs complémentaires qui enrichissent le réalisme (texture) ou apportent des informations d'état spécifiques (code de couleurs pour exprimer un niveau de chaleur, par exemple). Ce type de simulateur offre également souvent des effets complémentaires (éclairages, mouvements de caméra...) et parfois des fonctionnalités d'animation ou de gestion cinématique.

Dans une scène réelle, un certain nombre de phénomènes physiques

interviennent, que l'on peut souhaiter simuler, qu'ils soient thermiques, ondulatoires, mécaniques, dynamiques... Selon leur nature, les équations modèles mises en œuvre (de diffusion, de transport...), et les méthodes de résolution sont différentes;

• un système de capture de mouvement temps réel et optique proposé par ActiCM (start-up du CEA/List). Composé de 16 caméras réparties sur 4 colonnes, ce système exploite des capteurs de mesure 3D optiques conçus, fabriqués et commercialisés par ActiCM. Ces capteurs comprennent chacun deux caméras vidéo numériques. deux éclairages infrarouge (IR) pulsés ainsi qu'une électronique de commande. Chacun est capable de fournir précisément, en trois dimensions, la position de points habituellement matérialisés par des cibles rétroréfléchissantes autocollantes. Ces cibles sont passives, ce qui évite toute instrumentation contraignante de l'objet en mouvement (mise en place rapide, aucune alimentation électrique). Un éclairage dans le proche IR est associé à chaque tête afin de les "activer". Disposées en nombre suffisant sur un objet, de telles cibles permettent de retrouver à chaque instant, en temps réel, ses paramètres de position et d'orientation. Plusieurs capteurs peuvent être associés pour permettre de suivre ses déplacements;

- deux interfaces à six degrés de liberté avec retour d'effort Virtuose 6D-RVTM d'Haption (start-up du CEA/List). Conçu par le Service de robotique et systèmes interactifs du CEA/List et réalisé par Haption, Virtuose 6D-RV $^{\text{TM}}$  est une interface haptique qui permet à son utilisateur de toucher et de manipuler des objets situés dans l'environnement virtuel, avec une très grande sensibilité. Elle présente de nombreuses perspectives d'application dans les secteurs industriels (prototypage virtuel, formation au geste technique), médicaux (téléchirurgie, assistance aux personnes handicapées, rééducation)
- un *cluster* de PC dédiés au graphique. Le site du List sera l'un des premiers en France à utiliser un tel cluster pour la visualisation stéréoscopique multi-écrans. Or l'utilisation des technologies de type PC pour le prototypage virtuel est essentielle pour le déploiement en milieu industriel:
- un système de visualisation stéréoscopique, réalisé par Barco, comprenant deux plans de travail de  $2,5 \times 5$  m mur et sol avec des rétroprojections stéréoscopiques (stéréo active).

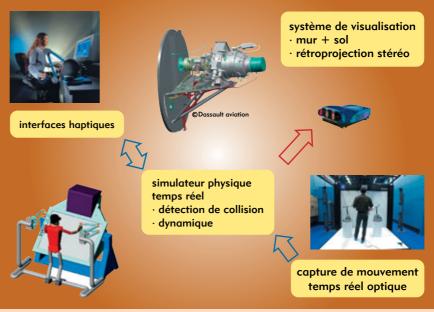
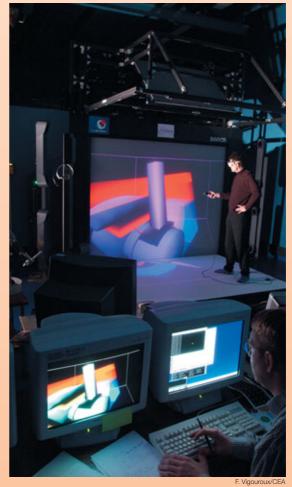


Figure. Schéma de principe de la plate-forme de réalité virtuelle Phare.

photos F. Vigouroux/CEA





Un opérateur évolue dans l'espace en trois dimensions restitué dans la plate-forme Phare par un système de visualisation stéréoscopique comprenant deux plans de travail "mur et sol"

101

et des rétroprojecteurs.



Conçu par le CEA/LIST et réalisé par sa start-up Haption, le bras Virtuose 6D-RV est une interface haptique qui permet de manipuler et de manipuler des objets dans un environnement virtuel avec une très grande sensibilité.

nucléaire, offshore et médical, pour l'aide aux handicapés et la téléchirurgie. Son activité mobilise des compétences fortes en mécanique, électronique, automatique, informatique, interface homme-machine (IHM) et ergonomie des systèmes. Cette pluridisciplinarité, ainsi que sa mission de R&D technologique, lui permet de proposer une approche globale unique en France pour l'intégration et la mise en œuvre des systèmes de réalité virtuelle.

Pour les besoins du projet PERFRV et plus généralement pour les siens propres en réalité virtuelle, le CEA/List a créé la plate-forme Phare qui associe un simulateur physique temps réel, un système de capture de mouvement également en temps réel, des interfaces à six degrés de liberté avec retour d'effort, une "grappe" de PC dédiée au traitement graphique et un système de visualisation stéréoscopique (encadré 2).

Les simulateurs de rendu physique temps réel, qui simulent essentiellement des phénomènes mécaniques et dynamiques, sont apparus il y a quelques années. En prototypage virtuel et interactif, il faut en effet calculer en temps réel les interactions mécaniques entre les différents sous-systèmes. Deux raisons majeures expliquent ce développement : la demande croissante du secteur des jeux vidéo, pour simuler avec davantage de réalisme la dynamique et les interactions, et la puissance des systèmes informatiques, qui permet maintenant de mettre en œuvre des équations modèles appropriées à ce type de physique.

L'un des objectifs majeurs en R&D du List dans ce domaine va consister à développer ou à adapter des codes de calcul aux contraintes liées au temps réel et à l'interactivité.

Le système de capteur de mouvement temps réel permet, par exemple, de piloter de manière naturelle un avatar ("mannequin numérique") représentant un opérateur de montage et d'étudier ainsi l'ergonomie d'un poste de montage. Le List développe aussi des algorithmes qui permettent de traquer les mouvements (posture, bras, doigts) de la personne qui pilote l'avatar.

Dans le domaine des interfaces haptiques, un des objectifs majeurs de l'équipe du List en R&D est de développer des algorithmes qui permettent d'améliorer le rendu haptique ainsi que de nouvelles générations d'interfaces, par exemple des interfaces portables.

Au total, le projet PERFRV et la plate-forme Phare vont permettre aux chercheurs et ingénieurs du List d'occuper une place importante dans le domaine du prototypage virtuel et interactif en Europe. Ils leur offriront aussi la possibilité d'utiliser ces développements en simulation interactive dans des domaines aussi variés que la culture, le médical ou le jeu vidéo.

#### de l'opérateur en informations et en retours sensoriels et la recherche d'une solution multimodale exploitant périphériques, substitutions et illusions sensorielles.

Phare, la réponse du List

implique une étude approfondie des besoins

Le Service robotique et systèmes interactifs (SRSI) du List développe depuis plus de trente ans des systèmes de téléopération à retour d'effort pour le contrôle et la commande de robots pour différentes applications :

#### **Claude Andriot**

Direction de la recherche technologique CEA centre de Fontenay-aux-Roses

## Qu'est-ce qu'une simulation numérique?

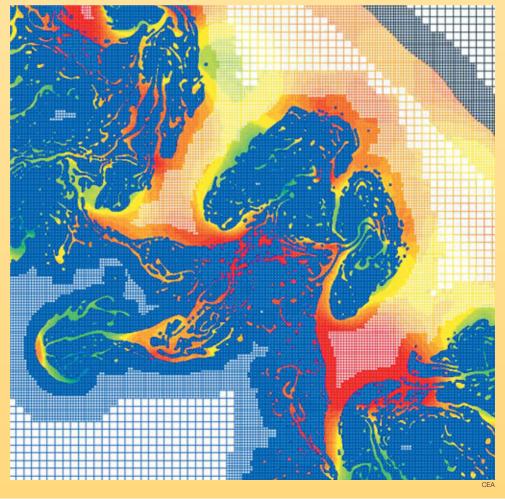
La simulation numérique consiste à reproduire par le calcul le fonctionnement d'un système, préalablement décrit par un ensemble de modèles. Elle s'appuie sur des méthodes mathématiques et informatiques spécifiques. Les principales étapes de la réalisation d'une étude par simulation numérique sont communes à de nombreux secteurs de la recherche et de l'industrie, en particulier le nucléaire, l'aérospatial ou l'automobile.

En chaque point de l'"objet" considéré, plusieurs grandeurs physiques (vitesse, température...) décrivent l'état et l'évolution du système étudié. Celles-ci ne sont pas indépendantes, mais reliées et régies par des équations, généralement aux dérivées partielles. Ces équations constituent la traduction mathématique des lois de la physique qui modélisent le comportement de l'objet. Simuler l'état de ce dernier, c'est déterminer – idéalement en tout point - les valeurs numériques de ses paramètres. Comme il y a un nombre infini de points, donc une infinité de valeurs à calculer, cet objectif est inaccessible (sauf dans des cas bien particuliers où l'on peut résoudre les équations de départ à l'aide de formules analytiques). Une approximation naturelle consiste donc à ne considérer qu'un nombre fini de points. Les valeurs des paramètres à calculer sont ainsi en nombre fini et les opérations nécessaires deviennent abordables grâce à l'ordinateur. Le nombre effectif de points traités dépendra bien sûr de la puissance de celui-ci : plus il sera élevé, meilleure sera finalement la description de l'objet. À la base du calcul des paramètres comme à la base de la simulation numérique, il y a donc la réduction de l'infini au fini, la discrétisation.

Comment opère-t-on précisément à partir des équations mathématiques du modèle ? Deux méthodes sont très souvent utilisées, respectivement représentatives des méthodes de **calcul déterministe**, qui résolvent les équations régissant les phénomènes étudiés après avoir discrétisé les variables, et des méthodes de **calcul statistique** ou **probabiliste**.

Le principe de la première, connue sous le nom de méthode des volumes finis, est antérieur à l'usage des ordinateurs. Chacun des points de l'objet est assimilé simplement à un petit volume élémentaire (un cube par exemple), d'où le nom de volume fini. Un plasma, par exemple, est ainsi vu comme un ensemble ou un réseau de volumes contigus qui, par analogie avec la trame d'un tissu, sera dénommé maillage. Les paramètres de l'état de l'objet sont maintenant définis dans chaque maille du maillage. Pour chacune d'elles, en reformulant les équations mathématiques du modèle par des moyennes volumiques, il sera alors possible de construire des relations algébriques entre les paramètres de la maille et ceux de ses voisines. Au total, il y aura autant de relations que de paramètres inconnus et ce sera à l'ordinateur de résoudre le système de relations obtenu. Il faudra pour cela recourir aux techniques de l'analyse numérique et programmer des algorithmes spécifiques.

L'accroissement de la puissance des ordinateurs a permis d'augmenter la finesse de discrétisation, permettant de passer de quelques dizaines de mailles dans les années soixante à plusieurs dizaines de milliers dans les années quatre-vingt, à des millions dans les années quatre-vingt-dix et jusqu'à la dizaine de milliards de mailles aujourd'hui (machine Tera de la Direction



Exemple d'image d'une simulation 2D d'instabilités réalisée avec le supercalculateur Tera du CEA. Le calcul a fait appel au maillage adaptatif, qui se fait plus fin dans les zones où les phénomènes sont les plus complexes.

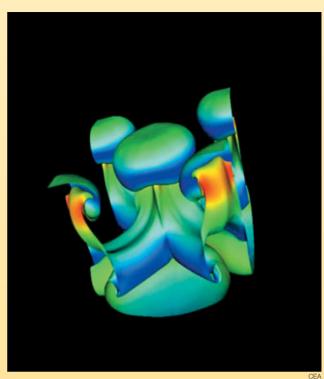
des applications militaires du CEA), chiffre qui devrait décupler à la fin de la décennie.

Un raffinement du maillage, le **remaillage adaptatif**, consiste à ajuster la taille des mailles en fonction des circonstances, par exemple en les rendant plus petites et plus serrées aux interfaces entre deux milieux, là où les phénomènes physiques sont les plus complexes, ou là où les variations sont les plus importantes.

La méthode des volumes finis s'applique dans des contextes physiques et mathématiques très variés. Elle autorise toute forme de maille (cube, hexaèdre, tétraèdre...) et le maillage peut être modifié durant le calcul, en fonction de critères géométriques ou physiques. Enfin, elle est aisée à mettre en œuvre dans le contexte des ordinateurs parallèles (encadré B, *Les moyens informatiques de la simulation numérique hautes performances*), le maillage pouvant en effet faire l'objet d'un découpage pour des calculs sur ce type de machines (exemple figure B, p. 13).

Appartiennent à la même famille la méthode des différences finies, cas particulier de la méthode des volumes finis où les côtés des mailles sont orthogonaux, et la méthode aux éléments finis, qui peut juxtaposer divers types de mailles. La deuxième grande méthode, dite de Monte-Carlo, est particulièrement adaptée pour simuler le transport de particules, par exemple des neutrons ou des photons d'un plasma (voir Les simulations en physique des particules). Un tel transport est en fait caractérisé par une succession d'étapes lors desquelles chaque particule peut subir différents événements (diffusion, absorption, émission...) possibles a priori. Les probabilités élémentaires de chacun de ces événements sont connues individuellement pour chaque particule.

Il est alors naturel d'assimiler un point du plasma à une particule. Un ensemble de particules, en nombre fini, va constituer un échantillon représentatif de l'infinité de particules du plasma, comme lors d'un sondage statistique. D'étape en étape, l'évolution de l'échantillon sera déterminée grâce à des tirages au hasard (d'où le nom de la méthode). L'efficacité de cette méthode, mise en œuvre à Los Alamos dès les années 1940, dépend bien sûr de la qualité statistique des tirages au hasard.



Simulation 3D réalisée à l'aide du supercalculateur Tera installé fin 2001 au centre CEA/DAM Île-de-France à Bruyères-le-Châtel (Essonne).

Il existe pour cela des méthodes de nombres aléatoires, bien adaptées au traitement par un ordinateur.

Les méthodes des volumes finis et de Monte-Carlo ont suscité et suscitent de nombreuses études mathématiques. Ces études s'attachent notamment à préciser la convergence de ces méthodes, c'est-à-dire comment la précision de l'approximation varie avec le nombre de mailles ou de particules. Cette question est naturelle lors de la confrontation des résultats de la simulation numérique à ceux de l'expérience.

## Comment se déroule une simulation numérique?

Il est souvent question d'expérience numérique pour souligner l'analogie entre la pratique d'une simulation numérique et la conduite d'une expérience de physique.

Brièvement, cette dernière utilise un dispositif expérimental, configuré selon des conditions initiales (de température, de pression...) et des paramètres de contrôle (durée de l'expérience, des mesures...). Durant l'expérience, le dispositif produit des points de mesures qui sont enregistrés. Ces enregistrements sont ensuite analysés et interprétés.

Dans une simulation numérique, le dispositif expérimental consiste en un ensemble de programmes informatiques exécutés sur des ordinateurs. Les **codes** ou **logiciels de calcul** sont la traduction, à travers des algorithmes numériques, des formulations mathématiques des modèles physiques étudiés. En amont et en aval du calcul, les *logiciels d'environnement* effectuent la gestion de plusieurs opérations complexes de préparation des calculs et de leur dépouillement.

Les données initiales de la simulation comporteront d'abord la délimitation du domaine de calcul à partir d'une représentation approchée des formes géométriques (produite par le dessin et la CAO, conception assistée par ordinateur), suivie de la discrétisation de ce

domaine de calcul sur un maillage, ainsi que les valeurs des paramètres physiques sur ce maillage et les paramètres de contrôle du bon déroulement des programmes...Toutes ces données (produites et gérées par les logiciels d'environnement) seront saisies et vérifiées par les codes. Les résultats des calculs proprement dits, c'est-à-dire les valeurs numériques des paramètres physiques, seront sauvegardés au fur et à mesure. En fait, un protocole spécifique structurera les informations produites par l'ordinateur afin de constituer une base de données numériques.

Un protocole complet organise l'échange informatique des informations requises (dimensions notamment) suivant des formats prédéfinis: modeleur<sup>(1)</sup>, mailleur<sup>(2)</sup>, découpeur de maillage, code



(1) Le modeleur est un outil qui permet la création et la manipulation de points, courbes et surfaces en vue par exemple de la création d'un maillage. (2) Les formes géométriques d'un maillage sont décrites par des ensembles de points reliés par des courbes et des surfaces (de Bézier par exemple) qui en représentent les frontières.

de calculs, logiciel de visualisation et d'analyse. Les études de sensibilité des résultats (au maillage et aux modèles) font partie des "expériences" numériques.

À l'issue des calculs (résolution numérique des équations décrivant les phénomènes physiques qui se déroulent dans chaque maille), l'analyse des résultats par des spécialistes reposera sur l'exploitation de la base de données numériques. Elle comportera plusieurs étapes : extraction sélective des données (selon le paramètre physique recherché) et visualisation, extraction et transfert des données pour calculer et visualiser des diagnostics.

Le parallèle entre la conduite d'un cas de calcul, d'une expérience numérique et la conduite d'une expérience physique ne s'arrête pas là : les résultats numériques seront comparés aux résultats expérimentaux. Cette analyse comparative, effectuée sur la base de critères quantitatifs standardisés, fera appel et à l'expérience et à l'art de l'ingénieur, du physicien, du mathématicien. Elle débouchera sur de nouvelles améliorations des modèles physiques et des programmes informatiques de simulation.

#### **Bruno Scheurer**

Direction des applications militaires CEA centre DAM-Ile de France

Frédéric Ducros et Ulrich Bieder Direction de l'énergie nucléaire CEA centre de Grenoble

## L'exemple d'un calcul de thermohydraulique

La mise en œuvre d'un protocole de simulation numérique peut être illustrée par les travaux réalisés par l'équipe de développement du logiciel de calcul **thermohydraulique** Trio U. Ces travaux se sont déroulés dans le cadre d'une étude faite en collaboration avec l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). L'objectif était d'obtenir des données très précises pour fournir à l'ingénieur les sollicitations en température à la paroi des composants d'un réacteur à eau sous pression dans le cas d'un accident grave impliquant une circulation naturelle turbulente de gaz chauds. Cette étude requiert la modélisation simultanée d'effets "système" à grande échelle et de phénomènes turbulents à petite échelle (encadré F, *Modélisation et simulation des écoulements turbulents*).

Elle débute par la définition du modèle de calcul global (figure A), suivie de la réalisation du modèle CAO et du maillage correspondant avec des logiciels du commerce (figure B). Les maillages de plus de cinq millions de mailles exigent l'utilisation de puissantes stations graphiques. Dans cet exemple, le maillage d'un générateur de vapeur (figures C et D) a été découpé pour répartir les calculs sur huit processeurs d'un calculateur parallèle du CEA: chaque couleur symbolise une zone affectée à un processeur particulier. Les calculs, dont les conditions aux limites sont données par un calcul "système" (Icare-Cathare), produisent des résultats qu'il appartient aux spécialistes d'interpréter. En l'occurrence, les visualisations sur des stations graphiques des valeurs instantanées des champs de vitesse montrent l'impact d'un panache chaud sur la plaque tubulaire du

générateur de vapeur (coupe dans le champ de vitesses à gauche de la figure E) et la température instantanée dans la boîte à eau (à droite).

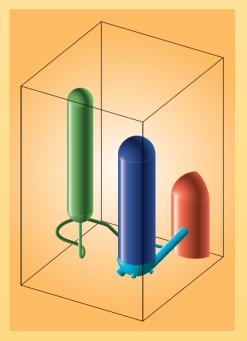


Figure A.
Domaine de
calcul global
incluant une
partie de la cuve
réacteur (rouge),
la conduite de
sortie (branche
chaude en bleu
clair), le
générateur
de vapeur
(bleu foncé)
et le pressuriseur
(vert).

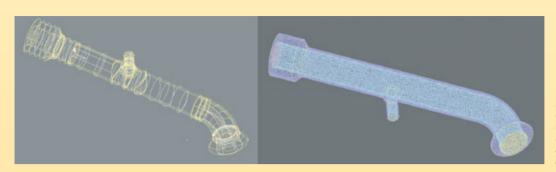


Figure B. Modèle CAO de la branche chaude en sortie de la cuve réacteur (à gauche) et son maillage non structuré (à droite).



Figures C et D.

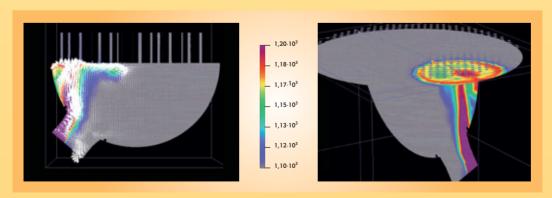


Figure E.

## Les moyens informatiques de la simulation

Effectuer des simulations numériques plus précises impose de mettre en œuvre des modèles physiques et numériques eux-mêmes plus précis portant sur des descriptions plus fines des objets simulés (encadré A, *Qu'est-ce qu'une simulation numérique?*). Tout ceci nécessite des progrès dans le domaine des logiciels de simulation mais aussi une augmentation importante de la capacité des équipements informatiques sur lesquels ces logiciels sont utilisés.

#### Processeurs scalaires et vectoriels

Au cœur de l'ordinateur, le processeur est l'unité de base qui, déroulant un programme, effectue les calculs. Il en existe deux grands types, les processeurs scalaires et les processeurs vectoriels. Les premiers exécutent des opérations portant sur des nombres élémentaires (scalaires), par exemple l'addition de deux nombres. Les seconds exécutent des opérations portant sur des ensembles de nombres (vecteurs), par exemple additionner deux à deux les nombres composant deux ensembles de 500 éléments. À ce titre, ils sont particulièrement adaptés à la simulation numérique : lors de l'exécution d'une opération de ce type, un processeur vectoriel peut fonctionner à une vitesse proche de sa performance maximale (crête). La même opération avec un processeur scalaire exige de nombreuses opérations indépendantes (opérations par composante des vecteurs) qui s'exécutent à une vitesse bien inférieure à sa vitesse crête. L'avantage principal des processeurs scalaires est leur prix : il s'agit de microprocesseurs généralistes dont les coûts de conception et de fabrication peuvent être amortis sur de larges marchés.

#### Forces et contraintes du parallélisme

Les processeurs récents permettent de hautes performances, d'une part en utilisant une fréquence de fonctionnement plus élevée, d'autre part en cherchant à exécuter en même temps

Installée en décembre 2001 au CEA (centre DAM-lle de France) et conçue par Compaq (devenue depuis HP), la machine Tera a pour élément de base un mini-ordinateur à 4 processeurs Alpha à 1 GHz partageant une mémoire de 4 Go et fournissant une puissance totale de 8 Gflops. Ces éléments de base sont interconnectés par un réseau rapide conçu par la société Quadrics. Une opération de synchronisation sur l'ensemble eds 2 560 processeurs s'effectue en moins de 25 microsecondes. Le système de fichiers global offre un espace de stockage de 50 téraoctets pour les entrées-sorties avec une bande passante agrégée de 7,5 Go/s.

plusieurs opérations : c'est un premier niveau de parallélisme. L'accélération de la fréquence est limitée par l'évolution de la technologie micro-électronique, tandis que les dépendances entre instructions à exécuter par le processeur limitent le parallélisme possible. La mise en œuvre simultanée de plusieurs processeurs constitue un second niveau de parallélisme, qui permet d'obtenir des performances accrues à condition de disposer de programmes capables d'en tirer parti. Alors que le parallélisme au niveau des processeurs est automatique, celui entre processeurs dans un ordinateur parallèle est à la charge du programmeur, qui doit découper son programme en morceaux indépendants et prévoir entre eux les communications nécessaires. On procède souvent par un découpage du domaine sur lequel porte le calcul, chaque processeur étant chargé de simuler le comportement d'un domaine, et par l'établissement de communications régulières entre processeurs afin de garantir la cohérence d'ensemble du calcul. Pour obtenir un programme parallèle efficace, il faut s'assurer de l'équilibrage de charge entre processeurs et chercher à limiter le coût des communications.

#### Les différentes architectures

Les équipements informatiques ont différentes fonctions. À partir de son ordinateur de travail sur lequel il prépare ses calculs et en analyse les résultats, l'utilisateur accède à des moyens de calcul, de stockage, et de visualisation partagés, mais beaucoup plus puissants que les siens propres. L'ensemble de ces équipements sont reliés par des réseaux informatiques permettant de faire circuler les informations entre eux avec des débits compatibles avec le volume de données produites, pouvant atteindre 1 **téraoctet** (1 To =  $10^{12}$  octets) de données pour une seule simulation.

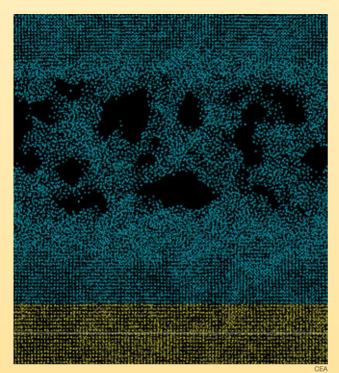
Les grands équipements de calcul sont généralement appelés

**supercalculateurs**. Ils atteignent aujourd'hui des puissances qui se chiffrent en **téraflops** (1 Tflops = 10<sup>12</sup> opérations de calcul par seconde).

Il existe aujourd'hui trois grands types de supercalculateurs: les supercalculateurs vectoriels, les grappes de mini-ordinateurs à mémoire partagée et les grappes de PC (l'ordinateur que chacun possède chez soi). Le choix entre ces architectures dépend largement des applications et de l'utilisation visées. Les supercalculateurs vectoriels disposent de processeurs très performants mais dont il est difficile d'augmenter la puissance en ajoutant des processeurs. Les grappes de PC sont peu coûteuses mais mal adaptées à des environnements où de nombreux utilisateurs font beaucoup de calculs très gourmands en puissance machine, en mémoire et en entrées-sorties.

Ce sont ces considérations qui ont en particulier conduit la Direction des applications militaires (DAM) du CEA à choisir pour son programme simulation (voir *Le programme Simulation : la garantie des armes sans essais nucléaires*) les architectures de type grappe de mini-ordinateurs à mémoire partagée, encore appelées *clusters* de SMP (Symmetric Multi-Processor). Un tel système utilise comme brique de base un mini-ordinateur com-

## numérique hautes performances



Les calculateurs parallèles sont adaptés aux méthodes numériques basées sur des maillages (encadré A, Qu'est-ce qu'une simulation numérique ?) mais aussi au traitement de calculs ab initio comme cette simulation par dynamique moléculaire de l'endommagement par choc de deux plaques de cuivre à 1 km/s (voir La simulation des matériaux). Le système considéré est constitué de 100 000 atomes de cuivre représentant un parallélépipède de section carrée (0,02 µm de côté) à densité normale. Les atomes interagissent suivant un potentiel EAM (embedded atom potential) pendant 4,6 picosecondes. Le calcul, effectué sur 18 processeurs du supercalculateur Tera de Bruyères-le-Châtel à l'aide du logiciel Stamp développé au CEA, a représenté une dizaine de minutes de temps "utilisateur" (calcul réalisé par B. Magne). Des tests impliquant jusqu'à 64 millions d'atomes ont été réalisés, mobilisant 256 processeurs pendant une centaine d'heures.

portant plusieurs microprocesseurs qui partagent une mémoire commune (figure). Ces mini-ordinateurs étant largement diffusés dans des domaines variés allant de la banque au serveur web en passant par les bureaux d'études, ils offrent un excellent rapport performance/prix. Ces "briques" de base (encore appelées nœuds) sont reliées entre elles par un réseau d'interconnexion hautes performances : la puissance cumulée de plusieurs centaines de ces "briques" peut atteindre plusieurs téraflops. On parle alors d'ordinateur massivement parallèle.

Cette puissance peut être disponible pour une seule application parallèle utilisant toutes les ressources du supercalculateur mais aussi pour de multiples applications indépendantes, parallèles ou non, utilisant chacune une partie des ressources.

Si la caractéristique mise en avant pour décrire un supercalculateur est en général sa puissance de calcul, il ne faut pas négliger l'aspect entrées-sorties. Ces machines capables d'effectuer des simulations de grande taille doivent disposer de systèmes de disques avec des capacités et des performances adaptées. Dans les clusters de SMP, chaque mini-ordinateur dispose d'un espace disque local. Il n'est néanmoins pas judicieux d'utiliser celui-ci pour les fichiers utilisateurs, ce qui obligerait l'utilisateur à explicitement déplacer ses données entre les différentes phases de ses calculs. Pour cette raison, il est important de disposer d'un espace disque accessible par l'ensemble des mini-ordinateurs du supercalculateur. Cet espace est en général constitué de batteries de disques reliées à des nœuds dont la fonction principale est de les gérer. Comme pour le calcul, c'est le parallélisme pour les entrées-sorties qui permet d'offrir des performances élevées. Il faut, pour ce faire, disposer de systèmes de fichiers globaux parallèles permettant un accès rapide et sans contraintes à l'espace disque partagé.

Offrant des puissances de calcul considérables, les *clusters* de SMP posent néanmoins plusieurs défis. Parmi les plus importants, outre la programmation de logiciels de simulation capables de tirer parti du grand nombre de processeurs, il faut mettre au point des systèmes d'exploitation et les logiciels associés compatibles avec de telles configurations et tolérants visà-vis des pannes.

# François Robin Direction des applications militaires CEA centre DAM-Ile de France

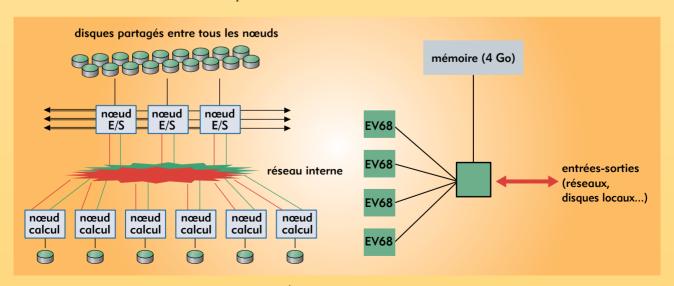


Figure. Architecture d'une machine du type "cluster de SMP". À gauche, l'architecture générale (E/S = entrée/sortie), à droite celle d'un nœud avec quatre processeurs Alpha EV68 cadencés à 1 GHz.

#### Modélisation et simulation des écoulements turbulents

La turbulence, ou l'agitation de l'écoulement dit turbulent, se développe dans la plupart des écoulements qui conditionnent notre environnement immédiat (rivières, océan, atmosphère). Elle se révèle être aussi un, sinon le, paramètre dimensionnant dans un bon nombre d'écoulements industriels (liés à la production ou la conversion d'énergie, à l'aérodynamique...). Il n'est donc pas étonnant que soient entrepris des efforts visant sa prédiction – fût-elle encore imprécise – surtout lorsqu'elle se trouve combinée à des phénomènes qui la compliquent : stratification, combustion, présence de plusieurs phases... C'est que, paradoxalement, même s'il est possible d'anticiper la nature turbulente d'un écoulement et même, d'un point de vue théorique, de dégager certaines caractéristiques communes et apparemment universelles aux écoulements turbulents(1), leur prédiction dans

des cas précis reste délicate. Celle-ci doit en effet prendre en compte l'importante gamme d'échelles spatiales et temporelles<sup>(2)</sup> impliquées dans tout écoulement de ce type.

Les chercheurs ne sont pourtant pas démunis, aujourd'hui, pour aborder ce problème. En premier lieu, les équations qui régissent l'évolution spatio-temporelle des écoulements turbulents (équations de Navier-Stokes  $^{(3)}$ ) sont connues. Leur résolution complète, dans des cas très favorables, a conduit à des descriptions prédictives. Mais l'emploi systématique de cette méthode de résolution se heurte à deux difficultés rédhibitoires : d'une part, il nécessiterait la connaissance complète et simultanée de toutes les variables attachées à l'écoulement et des forçages s'exerçant sur lui $^{(4)}$  et, d'autre part, il mobiliserait des moyens de calculs irréalistes pour encore des décennies.

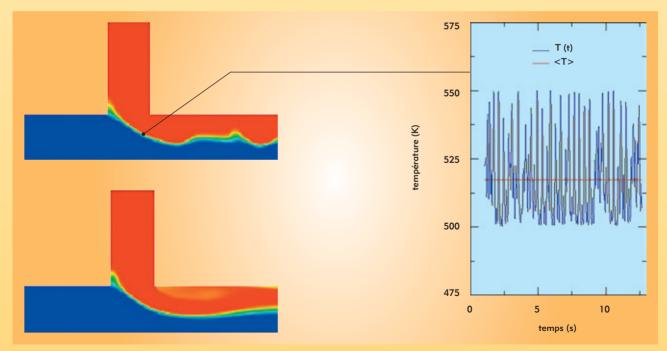


Figure. Champ de température instantané (haut) et moyenné (bas) dans une situation de mélange. La courbe donne l'historique de la température en un point : valeur instantanée fluctuante en bleu et moyenne en rouge (d'après la thèse d'Alexandre Chatelain [DEN/DTP/SMTH/LDTA]).

## (suite)

Il faut donc se résoudre, en s'appuyant sur le caractère fluctuant dû à l'agitation turbulente, à définir et utiliser des moyennes. Une des approches les plus répandues consiste à aborder le problème sous un angle statistique. Les moyennes d'ensemble de vitesse, de pression, de température... dont la distribution caractérise l'écoulement turbulent sont définies comme les variables principales de l'écoulement qu'on cherche à qualifier par rapport à ces moyennes. Ceci conduit à une décomposition du mouvement (dite de Reynolds) en champs moyen et fluctuant, ce dernier mesurant l'écart instantané et local entre chaque grandeur réelle et sa moyenne (figure). Ces fluctuations représentent la turbulence et couvrent une partie importante du spectre de Kolmogorov<sup>(1)</sup>.

Cette opération réduit considérablement le nombre de degrés de liberté du problème et le rend « manipulable » informatiquement. Elle comporte aussi de nombreuses difficultés : il faut tout d'abord constater que, précisément en raison des non-linéarités des équations du mouvement, toute moyenne fait surgir des termes nouveaux et inconnus qu'il faut estimer. En fermant la porte à la description complète et déterministe du phénomène, on ouvre celle de la modélisation, c'est-à-dire à la représentation des effets de la turbulence sur les variables moyennes.

Beaucoup de progrès ont été accomplis depuis les premiers modèles (Prandtl, 1925). Les modélisations n'ont cessé d'évoluer vers plus de complexité, se basant sur le fait généralement vérifié que toute nouvelle extension permet de conserver les propriétés antérieurement acquises. Il faut aussi constater que, même

(1) On peut faire référence à la répartition spectrale de l'énergie cinétique turbulente, connue comme le "spectre de Kolmogorov", qui illustre de manière très simple la hiérarchie des échelles, des grandes échelles porteuses d'énergie aux échelles de plus en plus petites et de moins en moins énergétiques.

(2) Cette étendue est le résultat des non-linéarités des équations du mouvement qui donne naissance à une gamme étendue d'échelles spatiales et temporelles. Cette gamme est une fonction croissante du nombre de Reynolds, Re, mesurant le rapport entre force d'inertie et force visqueuse. (3) L'hypothèse selon laquelle la résolution complète des équations de Navier-Stokes permet la simulation de la turbulence est généralement admise, tout du moins dans la gamme des écoulements sans choc.

(4) Il s'agit d'un problème régi par des conditions initiales et aux limites.

si de nombreux développements remettent en avant la nécessité de traiter les écoulements en respectant leur caractère *instationnaire*, les modélisations les plus populaires ont été développées dans le cadre des écoulements *stationnaires*, pour lesquels on n'accède donc qu'à une représentation de la moyenne temporelle de l'écoulement : dans le modèle mathématique final, les effets de la turbulence proviennent ainsi intégralement de la modélisation.

Il est également remarquable que, malgré de nombreux travaux, aucune modélisation n'est aujourd'hui capable de rendre compte de l'intégralité des phénomènes qui influencent la turbulence ou sont influencés par elle (transition, instationnarité, stratification, compression, etc.). Ce qui semble pour l'instant empêcher les modélisations statistiques de nourrir une ambition d'universalité.

Malgré ces limitations, la plupart des modélisations statistiques courantes sont maintenant disponibles dans les codes commerciaux et les outils des industriels. Il n'est pas possible de prétendre qu'elles permettent des calculs prédictifs dans toute situation. Leur précision est variable, offrant des résultats utiles pour l'ingénieur dans des situations maîtrisées et favorables (prédiction de la trainée avec une précision de 5 % à 10 % d'erreur [parfois mieux] sur certains profils), mais parfois faux dans des situations qui se révèlent, après coup, en dehors du champ de validité du modèle. Tout emploi maîtrisé d'une modélisation repose donc sur une qualification particulière au type d'écoulement à traiter. Des modélisations alternatives, répondant au besoin d'une plus grande précision sur des gammes d'échelles spatiales et temporelles plus étendues et donc basées sur un opérateur de "moyenne" d'une nature différente, sont actuellement en développement et représentent des voies nouvelles.

Le paysage des modélisations de la turbulence est aujourd'hui très complexe et l'unification des points de vue et des divers concepts de modélisation est une gageure. La tentation de l'universalité des modélisations reste donc hors de propos. Leur mise en œuvre réelle relève la plupart du temps de compromis généralement guidés par le savoir-faire de l'ingénieur.

#### Frédéric Ducros

Direction de l'énergie nucléaire CEA centre de Grenoble