

2022

irfm.ceris.fr/science-fiction

SCIENCE FICTION

AVANCÉES SCIENTIFIQUES DES
RECHERCHES EN FUSION
CONFINEMENT MAGNÉTIQUE

Simulation

Instabilités

Simulation

Atténuer l'échec

L'enjeu des machines

Diagnostics synthétiques

Modélisation des scénarios plasma

En guise de conclusion

EDITORIAL page 3

Sébastien Candel

#1 page 5

SIMULATION D'UN SYSTÈME COMPLEXE

Eric Serre & Philippe Ghendrih

#2 page 9

THÉORIE & SIMULATION

Maxime Lesur & Xavier Garbet

#3 page 16

INSTABILITÉS MACROSCOPIQUES EN PRÉSENCE DE PARTICULES ENERGÉTIQUES

Hinrich Lutjens & Rémi Dumont

#4 page 22

ATTEINDRE L'EXASCALE

Yanick Sarazin & Virginie Grandgirard

#5 page 30

L'ENJEU DES MAILLAGES

Hervé Guillard & Guido Huijsmans

#6 Page 34

CHAÎNE DE MODÈLES POUR L'INTERACTION PLASMA PAROI

Guido Ciraolo & Yannick Marandet

#7 page 41

DIAGNOSTICS SYNTHÉTIQUES

Didier Vézinet & Guihem Dif-Pradalier & Anna Medvedeva

#8 page 47

MODÉLISATION DES SCÉNARIOS PLASMA

Clarisse Bourdelle & Gerardo Giruzzi

#9 page 51

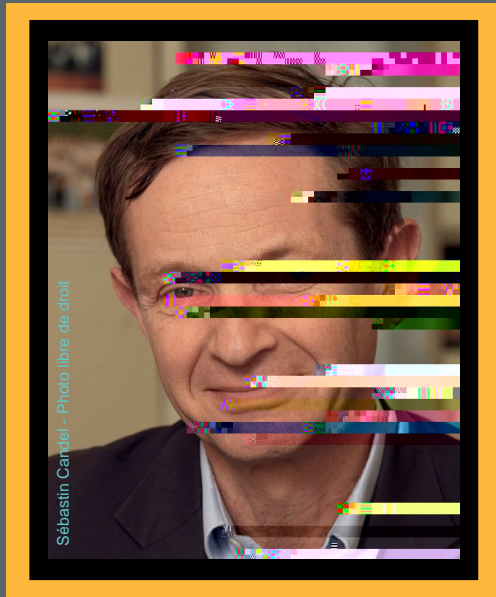
EN GUISE DE CONCLUSION

Eric Serre & Philippe Ghendrih

GLOSSAIRE page 53

EDITION

par Sébastien Candé



La simulation numérique est aujourd'hui partie intégrante des activités de recherche dans tous les domaines scientifiques. Elle est au cœur de grands enjeux sociétaux, elle est aussi un moyen puissant sur le plan technologique et industriel d'amélioration de la compétitivité et de création de richesses. L'évolution récente du calcul haute performance consiste à utiliser un réseau de processeurs (une unité de calcul est appelée **cœur** dans ce type d'architecture) travaillant en parallèle et échangeant des informations nécessaires à l'avancement de la simulation. Les enjeux technologiques pour les supercalculateurs sont à la fois la réduction de leur consommation électrique pour satisfaire aux nouveaux défis environnementaux et l'accroissement de la vitesse et de la bande passante du réseau de communication, car le temps consacré aux communications est perdu pour le calcul, et le nombre de cœurs qui peuvent être mobilisés. C'est le principe du calcul **massivement parallèle** pouvant utiliser plusieurs milliers, voire des centaines de milliers de cœurs. La difficulté pour les scientifiques associée à la recherche de performances optimales est une complexité croissante à la fois dans la programmation et dans le coût en génie logiciel pour s'adapter à chaque nouvelle architec

ture. Sur le plan pratique les gains scientifiques peuvent être considérables. Ainsi, des simulations nécessitant un million d'heures de calcul sur un processeur unique, donc demandant plus d'un siècle pour être réalisés, peuvent être effectués en deux semaines par calcul parallèle sur 10000 processeurs. Ce qui était inaccessible est désormais faisable mais il faut évidemment que le calcul puisse être parallélisé.

L'augmentation de la puissance de calcul disponible se mesure en nombre d'opérations réalisables par le supercalculateur par seconde, ou FLOPS. Au tournant du XXI^{ème} siècle on atteignait presque 5.10^9 FLOPS, à l'heure actuelle c'est presque 5.10^{10} de l'ère du **petascale** (10^{15} FLOPS) on entre dans l'ère de l'**exascale** (10^{18} FLOPS). Cette croissance exponentielle étend les possibilités de simulation à des domaines scientifiques et technologiques très variés notamment les systèmes complexes, la combustion, les plasmas de fusion nucléaire en **tokamak**, les sciences de l'environnement et du climat, le développement de nouveaux vaccins (comme par exemple ceux qui ont été élaborés pour se protéger du Covid 19), etc. mais elle s'accompagne de nouveaux enjeux et défis, comme la fiabilité de la simulation réalisée, la crédibilité accordée à celle-ci, en fait la compréhension de ses résultats et de ses limites par tous les acteurs, public et décideurs, quand il s'agit d'enjeux sociétaux. Pour les physiciens ces nouvelles possibilités sont autant de nouveaux défis. Quel que soit le domaine de recherche, que ce soit dans mon domaine de prédilection, celui de la combustion ou encore dans celui de la simulation des plasmas en lien avec ITER présentées dans ce numéro de Sciences en Fusion, les difficultés sont considérables et les enjeux de recherche sont très semblables.

Dans mon domaine de recherche, la simulation s'intéresse à la structure et à la dynamique des ammes, à l'allumage, à l'extinction, à la turbulence et aux instabilités, aux couplages avec les modes acoustiques dans des configurations fondamentales ou dans des systèmes proches de configurations industrielles réalistes qu'il s'agit

d'optimiser. Il faut traiter de situations dans lesquelles, l'injection peut être réalisée sous forme de gouttelettes, parfois dans des situations transcritiques dans lesquelles la simulation dépasse la valeur critique mais la température est inférieure à la température critique. Ce sont par excellence des systèmes complexes, celle qui vise à comprendre les mécanismes mis en œuvre, comme les instabilités exothermiques où la mesure est difficile et met en jeu à la fois des problèmes de physique multi-échelles comme la turbulence, des cinétiques complexes impliquant des centaines d'espèces et des milliers de réactions, l'ensemble des problèmes mathématiquement raides. Dans ce contexte, comme dans celui de la physique d'ITER, la simulation est devenue un outil incontournable pour concevoir les expériences, les compléter, les interpréter et faire progresser la recherche.

La complexité des problèmes à traiter dans ce nouvel environnement du calcul haute performance nécessite autour de ces codes de simulation la mise en œuvre d'équipes interdisciplinaires rassemblant des mathématiciens, des informaticiens, des physiciens et des mécaniciens numériques. Le temps du code de simulation est souvent un élément constitutif, quel est la capacité prédictive des simulations ? Jusqu'à quel niveau de détail ? On le voit, la simulation est non seulement un outil puissant mis au service de la recherche, c'est aussi un outil renouvelant la démarche scientifique au service de la connaissance.

Sébastien Candel

Professeur des universités émérite,
CentraleSupélec, Université Paris-Saclay.
Membre et ancien président de l'Académie des sciences.

SIMULATION D'UN SYSTÈME COMPLEXE

par Eric Serre & Philippe Ghendrih

La simulation prend une part croissante dans la recherche scientifique notamment pour l'étude des systèmes complexes comme les plasmas confinés magnétiquement pour la fusion contrôlée. Dans ces derniers, la difficulté des mesures, la complexité et le coût des expériences incitent à considérer la simulation comme un complément indispensable de l'expérience, voire un moyen pour accélérer la recherche. La construction du tokamak ITER, défi exceptionnel pour l'humanité, est aussi un enjeu pour la simulation, notamment pour optimiser l'utilisation de ce réacteur expérimental, maîtriser les risques et maximiser la production scientifique. Le rendez-vous avec ITER, un défi pour la simulation des plasmas de tokamak.

#1

La simulation numérique est un

élément ultime, mais où la compréhension et la connaissance s'acquiescent purement empirique. Elles prennent dans tous les niveaux de modélisation de la plus complexe à la plus simple.

Les ambitions de la simulation des tokamaks pour ITER

L'objet de ce numéro est d'explorer les enjeux et les ambitions de la simulation des tokamaks à l'heure d'ITER, donc au moment où les expériences mettront en œuvre des plasmas en régime de combustion pour certaines propriétés du plasma thermonucléaire et où l'enjeu est la maîtrise des plasmas dans un régime qui sera celui des futurs réacteurs. Les expériences nucléaires dans ITER seront également complexes. Par ailleurs, la compétition dans l'histoire de la fusion scientifique renforce le rôle de la simulation. En effet, si le dimensionnement d'ITER a été réalisé sur une base essentiellement empirique à partir d'un ensemble de tokamaks, les expériences nucléaires réalisées avec un dispositif unique, pour chaque partenaire dépendra un nombre d'expériences qui se verront limités. Dans ITER, la gamme d'échelles spatiales et temporelles sera plus grande que dans toutes les expériences actuelles et la simulation devra aborder une physique multi-échelle plus étendue et dans des régimes encore inexplorés.

Préparer et optimiser les expériences dans les régimes encore inexplorés

Un premier rôle des simulations sera donc la préparation et l'optimisation des expériences pour progresser dans la recherche et la performance tout en préservant ce prototype unique des pannes ou de vieillissement prématuré de certains sous-systèmes. Les mesures dans ITER, pour la conception ou pour l'opération seront complexes, difficiles et seront in-

THÉORIE & SIMULATION

par Maxime Lesur & Xavier Garbet

La physique théorique joue un rôle essentiel en amont et en aval de la simulation numérique. Elle intervient à chacune des étapes majeures de développement d'un outil numérique : conceptualisation, programmation, **vérification** et **validation**. Elle guide l'élaboration des expériences numériques et des modèles réduits qui permettent d'exploiter et d'optimiser un code de simulation. Par bien des aspects, théorie, modélisation et mesures sont indissociables. En effet, la théorie est un outil majeur de pédagogie et de diffusion des connaissances de par sa capacité à hiérarchiser et structurer les résultats de simulations complexes.

#2



Pas de simulation sans théorie analytique

Un article sur la théorie peut sembler incongru dans un numéro de Sciences en Fusion consacré aux simulations numériques des plasmas de **tokamak**. A priori et en principe, un résultat de simulation numérique est plus complet et plus précis qu'un résultat de théorie analytique, qui s'appuie sur des hypothèses simplificatrices supplé

processus d'érosion, émission de la paroi. Le système est perturbé initialement puis laissé libre et fermé, ou laissé

ouvert et perturbé continuellement par injection d'énergie. Pour l'étude du confinement magnétique, la question se décline par ailleurs en termes de forçage par le gradient (en imposant par exemple une température donnée au cœur et une autre au bord) ou forçage par le flux (en imposant une source d'énergie mais en laissant libre l'évolution de la température au cœur).

Conditions limites

Il faut ensuite poser le cadre du système à étudier, et s'assurer que le problème est mathématiquement bien posé. Un aspect central est la nature ouverte ou fermée du système. Même si le système est fermé du système considéré. La question

analytique, il est souvent ouvert d'un point de vue numérique du fait d'une perte d'information aux échelles plus fines que le pas du maillage discret. analytique, il est souvent ouvert d'un point de vue numérique du fait d'une perte d'information aux échelles plus fines que le pas du maillage discret.

La question du forçage est liée. En général, la turbulence peut se com-

L'apport de la théorie à la validation

Pour valider un code, il faut comparer les résultats numériques aux observations expérimentales (cf. #4 Atteindre l'exascale et #7 Diagnostics synthétiques). Les modèles réduits permettent de simplifier la comparaison aux observations. Pour les modèles plus complets, les développements récents en intelligence artificielle offrent des perspectives prometteuses. Le nombre de paramètres plasma est en effet élevé, et peut être réduit en utilisant l'invariance dimensionnelle des équations. On peut comprendre cette réduction par analogie : le comportement aérodynamique d'un avion est souvent déduit de celui d'une maquette beaucoup plus petite placée dans une soufflerie, grâce à l'invariance dimensionnelle. Une autre technique très usitée s'appuie sur une réduction de dimensionnalité. Dans un premier temps, la physique petite échelle est étudiée à l'aide de codes gyrocinétiques 5D, ou fluides

3D (voire 2D). Ces simulations ont montré qu'une théorie du transport qui intégrerait toute la physique essentiellement unidimensionnelle en jeu et donnerait un résultat très proche de l'expérience. L'intérêt se situe là où il est limité par le coût de calcul inévitablement prohibitif. Mais même si l'on ne prend pas le temps de calcul en compte, ces simulations ne pourraient pas être un outil de choix pour l'enseignement, la formation, et la vulgarisation. Cela s'apparente à fournir, en guise de cours de géographie, une carte de France de la taille de la France [4]. Ce sont les modèles à haute dimension, au prix d'une description moins détaillée de nombreux processus couplés, qui, en isolant un ou quelques processus parmi les nombreux processus couplés, permettent de construire une image mentale compréhensible. La théorie dans un champ électrique donné. Cette approche multi-fidélité, riche d'enseignements, est détaillée dans l'article #7 Diagnostics synthétiques (voir aussi Encart E).

Enseignement, formation et vulgarisation

On peut faire une expérience de pensée où l'on imagine un code de

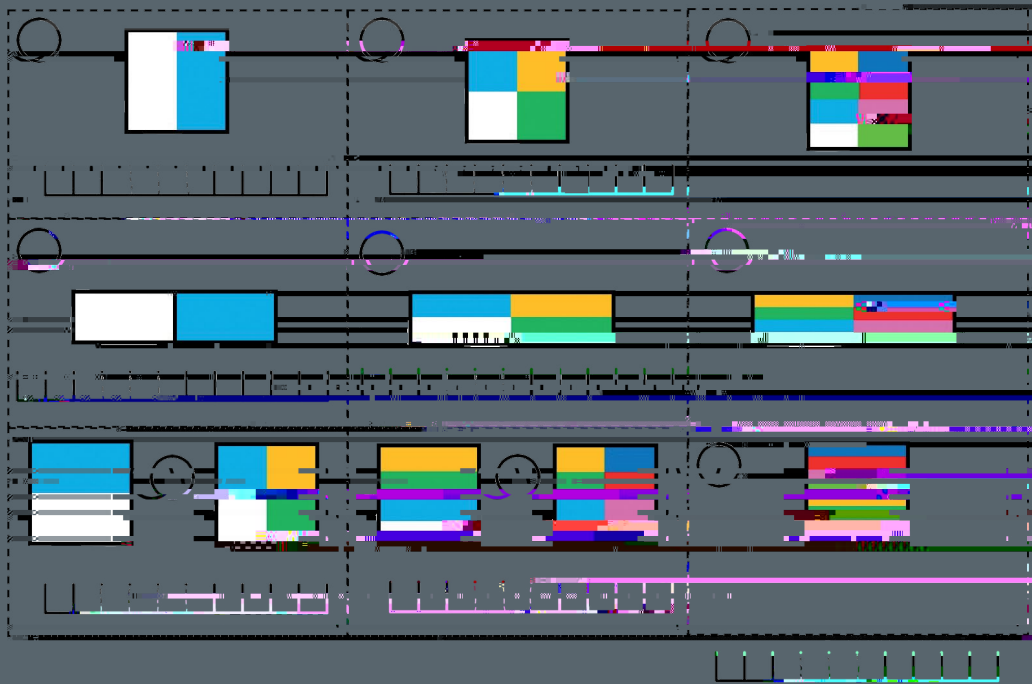
Chaos & simulations

La sensibilité aux conditions initiales, propriété fondamentale du chaos, pose en apparence un problème redoutable aux simulations. En effet le chaos est générique dans les systèmes non-linéaires étudiés par les simulations. La propriété fondamentale d'un système chaotique, la sensibilité aux conditions initiales, implique alors qu'une simulation d'un système complexe à partir d'une condition initiale donnée ne peut pas être exacte.

La simulation d'un système chaotique ne peut pas être exacte

Ce point est illustré par la transformation du boulanger qui consiste à étirer la pâte de taille finie d'un facteur 2 puis la plier. Mathématiquement, cela revient à multiplier par 2 la position selon x et diviser par 2 la hauteur selon y . Le pliage, étape non-linéaire de la transformation, est illustré par la figure. Nous nous concentrons sur la direction x et l'application informatique, donc à un ensemble discret de positions. Pour bénéficier au mieux de la précision numérique nous considérons que x est entier et pour un processeur de 64 bits un nombre compris entre 0 et $N = 18\,446\,744\,073\,709\,551\,615\,408$ (<https://www.math93.com/index.php/112-actualites-mathematiques/304-le-probleme-de-l-echiquier-de-sissa>) en binaire une suite de 64 zéros pour 0 et une suite de 64 un pour N . La transformation du boulanger du point de vue informatique consiste à décaler la série de bits d'un rang vers la gauche ce qui pose un double problème : que faire du bit devenu le bit numéro 65 (à gauche) ? et comment remplir le bit créé à droite ? Pour le bit de gauche, la transformation du boulanger donne la marche à suivre, si le bit est égal à zéro on n'a rien à faire, s'il est égal à un on procède au repliement, donc on soustrait qui revient à mettre à zéro le bit numéro 65. L'application de la transformation du boulanger donne une procédure simple, dans tous les cas on tronque le bit 65 pour se ramener à 64 bits. La réponse pour le remplissage du premier bit dépend du réglage choisi pour l'ordinateur, cela peut être systématiquement zéro, systématiquement un, voire zéro ou un selon un tirage proche d'un processus aléatoire. Le plus sage est d'opter pour ce dernier choix dans le paramétrage du calculateur. No.fn un o -0.05mune pro6

Chaos et simulations (suite)



Transformation du boulanger de haut en bas : 1a étape initiale et position initiale x en écriture binaire avec 64 bits, 1b première étape étirement de la pâte, décalage de l'écriture de x d'un bit vers la gauche, 1c deuxième étape pliage de la pâte, on tronque le bit de gauche et modifie les couleurs

RÉFÉRENCES

[1] <http://www.scholarpedia.org/article/Shadowing>

[2] <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003069515-7/lectures-hamiltonian-systems-jurgen-moser>

INSTABILITÉS MACROSCOPIQUES EN PRÉSENCE DE PARTICULES RAPIDES

par Hinrich Lutjens & Rémi Dumont

L'augmentation de la puissance de calcul des supercalculateurs, résultat direct de l'évolution de l'architecture interne des ordinateurs, a deux conséquences pour les programmes de simulation numérique. Comme illustré ici dans le cas de l'étude des instabilités macroscopiques de la Magnéto-Hydro-Dynamique (MHD), la première conséquence est d'étendre le domaine d'application et la précision des modèles utilisés. Cela conduit à une compréhension plus fine de la physique et à des résultats comparables aux expériences, mais aussi d'aborder de nouveaux sujets de recherche potentiellement importants pour la performance des expériences dans ITER. L'envers de la médaille est la nécessité d'adapter le code en fonction des caractéristiques des nouvelles architectures. Cela va d'une adaptation nécessaire du code, travail qui peut demander plusieurs mois, jusqu'à une refonte complète incluant une modification des schémas numériques. Il s'agit alors d'années d'efforts. La synergie entre capacités de calcul, modèles physiques et algorithmes se traduit ainsi par des avancées dans notre compréhension de la physique des instabilités dans les plasmas au prix d'un travail acharné des équipes pour maintenir, adapter et régénérer en permanence l'outil de simulation.

#3

Les instabilités macroscopiques jouent un rôle crucial dans les expériences de fusion par confinement magnétique. En premier lieu, elles déterminent la stabilité du plasma (voir Sciences en Fusion n°2 - Stabilité) et leur présence est généralement associée à des effets négatifs : au mieux une dégradation des performances du plasma, au pire la fin prématurée de la décharge via le déclenchement d'une disruption.

Modération ou dégradation du confinement par les instabilités macroscopiques

L'un des exemples d'instabilités les plus connus, identifié très tôt dans le cadre des recherches en matière de physique des tokamaks, est le

kink interne [1]. Sa manifestation expérimentale est le phénomène de « dents de scie » qui se traduit par des relaxations périodiques de la température et de la densité au cœur de la décharge (voir Figure 1). La conséquence de ces relaxations est de limiter la valeur maximale atteinte par la pression et donc les performances du plasma. Dans certains cas, les kinks internes peuvent aussi déclencher non linéairement d'autres instabilités plus néfastes, tels que les modes de déchirement magnétique. Toutefois, dans les machines équipées d'un mur interne constitué d'éléments métalliques, comme les futures centrales fusion, la situation est plus complexe. En effet, dans ces conditions, les plasmas contiennent des impuretés, parmi lesquelles des éléments lourds provenant de la paroi (par exemple du tungstène) et, dans le cas d'une centrale fusion, de l'hélium refroidi issu des réactions nucléaires deutérium-tritium (les particules alpha de fusion). Maîtriser le taux d'impureté est primordial car en s'accumulant au centre de la décharge, elles dégradent les performances du plasma par rayonnement d'une fraction de la puissance. En redistribuant les particules à chaque relaxation, les dents-de-scie ont alors un effet favorable puisqu'elles limitent l'accumulation des impuretés au cœur de la décharge.

Inclure les effets cinétiques pour comprendre les relaxations internes du plasma

La dynamique des dents de scie est caractérisée par un comportement cyclique. Chaque cycle comprend une phase de rampe, pendant laquelle la température augmente progressivement, suivie d'une phase de saturation et une relaxation très rapide. Au cours de chacune de ces relaxations, on mesure expérimentalement la signature magnétique correspondant au kink interne (voir Figure 1), dont la conséquence principale est la modification de la topologie du champ magnétique et l'évacuation de la pression du cœur du plasma : le kink interne engendre en effet le plasma un pincement des lignes de champ magnétique. Il se forme alors une nappe de courant, dans le voisinage de laquelle les lignes de champ magnétique vont se briser et se reconnecter sur une échelle de temps intermédiaire entre un temps de propagation parallèle au champ magnétique, appelé temps d'Alfvén, et un

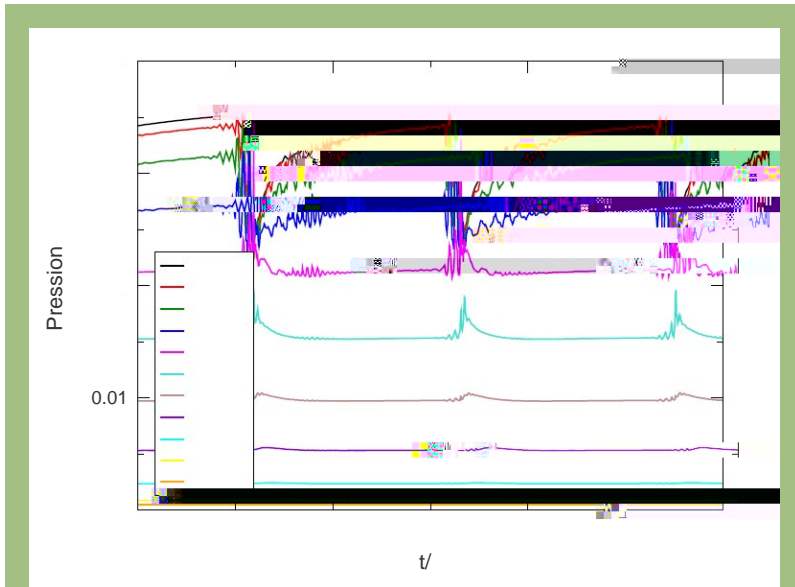


Fig. 2 : Cycle de dents de scie obtenu avec le code XTOR. La pression est représentée en fonction du temps normalisé à divers rayons plasma ($x=0$ représente le centre de la décharge, $x=1$ représente le bord). Les effets diamagnétiques inclus dans cette simulation permettent de reproduire le comportement typique des cycles de dents de scie observés dans l'expérience [7].

di er la dynamique des modes description. Ainsi, les décharges lents d'intérêt, les modes d'Alfvén réalisées dans les machines de fusion de cisaillement, en particulier le sion en prévision de l'opération kink interne, et les ondes sonores. de futurs réacteurs (dont ITER) Grâce à cet algorithme, les pré étant caractérisées par une forme mières simulations produites avec non circulaire, XTOR a inclus cette XTOR ont permis de reproduire la possibilité via son couplage à un dynamique non-linéaire du kink. code qui permet de calculer un Malheureusement, les temps ca-équilibre magnétique réaliste [5], ractéristiques obtenus par le code étendant également le domaine ne correspondaient pas aux ob des pressions plasma accessibles servations expérimentales. Ainsi, Par ailleurs, il est apparu indispen- le temps de **reconnexion ma-** gnétique pendant la phase non que le transport de l'énergie dans linéaire du kink interne, était dix le tokamak est intrinsèquement fois trop long. En outre, les simu- anisotrope (dans les conditions lations étaient limitées à la phase typiques d'une décharge sur un de relaxation d'une dent de scie tokamak actuel, la di usivité ther car les besoins du code en termes que dans la direction parallèle de ressources numériques pour re aux lignes de champ magnétique produire un cycle complet étaient est de l'ordre de ~ 10 la di usivité alors hors de portée.

Adapter le code aux impératifs de la simulation et à l'évolution des supercalculateurs

A la n des années 1990, les progrès des machines de calcul ont permis de prendre en compte davantage d'éléments physiques dans la

ment et simulés. Il demeurait donc toujours impropre de quali er le phénomène simulé avec XTOR de dents de scie.

Pendant les années 2000-2010, XTOR a été étendu en incluant quelques e ets bi- uides, en particulier les e ets induits par l'exis- tence d'un gradient de pression dans un champ magnétique appe lés e ets diamagnétiques ioniques et électroniques. Ces e ets phy siques supplémentaires étaient di ciles à traiter avec le schéma semi-implicite de XTOR [4], conçu pour la MHD résistive. L'évolution de la puissance de calcul des calculateurs a permis une évolu- tion importante de l'algorithme du code, passant d'un schéma semi-implicite à un schéma complètement **implicite** et itératif [6]. Cet algorithme rendait également plus abordable, d'un point de vue des développements numériques, toute généralisation du modèle avec des e ets dépassant la MHD.

La dynamique des relaxations internes enfin retrouvée par les simulations avec XTOR

Avec l'inclusion des e ets dia- magnétiques aussi bien ionique qu'électroniques, le code a per- mis pour la première fois de re- produire des cycles de dents-de scie tels que ceux observés dans les expériences, i.e. une relaxa- tion beaucoup plus rapide que la phase de rampe. Les premiers ont un e et stabilisant sur le kink, ce qui retarde son déclenchement et allonge la phase de rampe. Les seconds accélèrent la dynamique du crash, entre autres le proces- sus de **reconnexion magnétique**. Ces simulations de cycles de dent de scie qualitativement réalistes constituaient une première mondiale [7] (gure 2). Les évolutions du code XTOR ont notamment permis d'étudier des phénomènes devenus cruciaux à mesure que

l'opération sur les machines à murs
métalliques se généralisait. Par

La vérification des simulations, une nouvelle façon de faire un PoPe

La **vérification** est un enjeu primordial

Vérifier que l'on résout bien les équations que l'on a retenues, s'assurer de la précision avec laquelle cette résolution est effectuée sont des étapes indispensables compte tenu des moyens alloués aux simulations de haute performance. La vérification des codes de simulation numérique est ainsi devenue un enjeu primordial mais aussi un problème qui est moins bien posé qu'il n'en a l'air. Alors que les limites d'un modèle, c'est à dire les erreurs de modélisation, sont tout à fait intégrées par les physiciens, les limites d'un code de simulation, et donc les erreurs numériques, sont souvent sous estimées car mal mesurées. Avec le développement de la simulation, la complexité croissante des méthodes mathématiques et informatiques, les codes sont de plus en plus souvent un assemblage de différentes contributions qui demandent aujourd'hui une réponse plus « formelle » et globale. Malheureusement, l'expérience montre que l'on commet beaucoup plus d'erreurs lors de la vérification que lors de l'écriture du code (Cette remarque vaut hélas pour tous les efforts de vérification.) Une « preuve » de vérification est souvent donnée en utilisant la méthode dite de solutions manufacturées (Method of Manufactured Solution ou MMS) qui introduit un opérateur souvent complexe dans le solveur afin de faire converger la simulation vers une solution cible. Cette méthode élégante pose plusieurs problèmes. La MMS demande une modification spécifique du code, et la vérification n'est donc pas celle de la version de production. La deuxième difficulté tient au choix a priori de la solution cible et au fait qu'elle sera bien représentative ou non de l'ensemble des conditions d'utilisation du code en phase de production. Ce problème est réel car chaque modification du code oblige à reprendre également la vérification par MMS.

La méthode Pope de vérification systématique des simulations

La méthode PoPe pour « Projection on Proper elements » vise à vérifier le code de façon systématique, notamment en vérifiant chaque simulation pendant la phase de production. C'est une méthode inspirée du Big Data. Elle demande seulement des sauvegardes spécifiques des quantités calculées par le code afin de reconstruire les solutions et les équations effectivement résolues par le code. Lors de cette étape de reconstruction, le code est décomposé en parties élémentaires, plus facilement vérifiables notamment avec des solutions analytiques, en faisant appel à des schémas d'ordre plus élevé que ceux du code. Cette reconstruction de haute qualité numérique, qui n'a pas besoin d'être faite à chaque pas de la simulation, permet de comparer un pas d'intégration de haute qualité, donc de référence, à celui réalisé par le code pour un surcout de calcul de l'ordre du pourcent. Pour l'essentiel, la vérification est faite dans le code de reconstruction qui est indépendant. Le code vérifié n'est que marginalement modifié, seulement pour mettre en place les sauvegardes nécessaires à la procédure de vérification.

Définir un critère de qualité pour chaque simulation

La vérification de chaque simulation produite ouvre la voie à la définition d'un critère estimant le degré de qualité numérique réalisé. La méthode PoPe offre d'autres possibilités d'analyse de la simulation, par exemple en identifiant les parties qui pèsent le plus fortement dans l'erreur. Elle permet aussi d'analyser l'équilibre et le rôle des différents termes du modèle, participant ainsi à l'interprétation physique de ce dernier. C'est donc un outil de vérification qui peut également guider l'amélioration des codes, déterminer les limites intrinsèques de la simulation et qui donne des éléments pour quantifier la hiérarchie des phénomènes physiques mis en œuvre aux différents temps de la simulation. La méthode PoPe a été

Une prédiction fiable du
transport dans les plasmas
de fusion

A performance élevée en termes de
puissance fusion, le dimensionne-
ment des tokamaks

L'auto-organisation
du transport turbulent
détermine la performance
énergétique de la fusion

Le gain ou facteur de qualité qui
détermine la performance éner-
gétique du réacteur croît non-li-

Le piquage du profil de densité est souhaitable, bien que la source de matière provienne essentiellement de la périphérie (injection de glaçons rapides et interactions plasma-parois). Dans ce cadre, la prise en compte des sources et du transport des particules neutres en interaction avec le plasma s'avère nécessaire. Le couplage de codes dédiés au transport du plasma d'une part et à celui des neutres d'autre part, déjà en cours actuellement, recèle des difficultés numériques intrinsèques.

Les verrous du passage à l'exascale

Du fait du nombre élevé de points de grille et donc d'opérations à réaliser, les codes gyrocinétiques ont inévitablement recours au calcul haute performance (HPC). Le facteur d'échelle ainsi que l'enrichissement nécessaire de la physique conduisent en outre à une

Un dernier point concerne la géométrie magnétique de la configuration torique, que ce soit pour les tokamaks ou les stellarators. Les machines expérimentales offrent peu de souplesse pour explorer une large gamme de paramètres, faisant de la simulation numérique l'outil privilégié. D'autant que les lois d'échelles de ϵ_E montrent qu'il semble dépendre fortement de ces caractéristiques sans que les mécanismes physiques sous-jacents soient entièrement compris. Passer d'un tore à section circulaire à des géométries moins symétriques demande une adaptation des codes et des schémas, souvent au détriment de la scalabi-

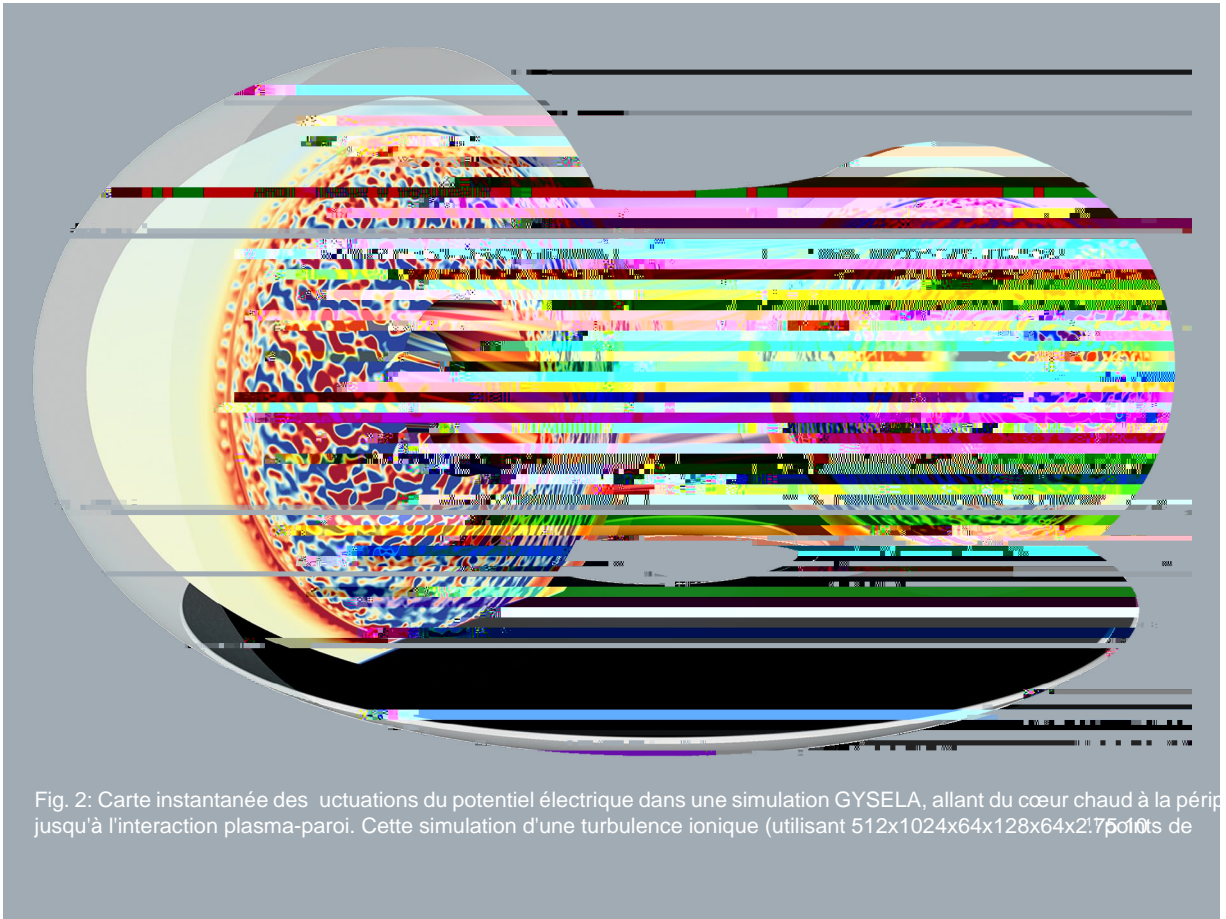


Fig. 2: Carte instantanée des fluctuations du potentiel électrique dans une simulation GYSELA, allant du cœur chaud à la périphérie jusqu'à l'interaction plasma-paroi. Cette simulation d'une turbulence ionique (utilisant 512x1024x64x128x64x2176 points de

RÉFÉRENCES

- 1 V. Grandgirard et al., « A 5D gyrokinetic full-f global semi-Lagrangian code for flux-driven ion turbulence simulations », Computer Physics Communications, 207, 35 (2016)
- 2 G. Dif-Pradalier et al., « Transport barrier onset and edge turbulence shortfall in fusion plasmas », Communication Physics (2022) <http://doi.org/10.1038/s42005-022-01004-z>

Choisir l'information conservée lors d'une simulation

Le problème des sorties d'un calcul numérique est un vieux serpent de mer qui devient critique avec le passage des supercalculateurs du **petascale** (10^{15} opérations par seconde) à l'**exascale** (10^{18} opérations par seconde). Dans une simulation d'un système complexe comme le **tokamak** ITER, ce n'est pas seulement un état final, mais tout le processus d'évolution qui intéresse les physiciens. Le choix des données à conserver pour analyse après la simulation est alors le résultat d'un subtil compromis. En effet, chaque octet transféré sur disque nécessite du temps et de l'espace de stockage. Or le débit des disques est plusieurs ordres de grandeurs plus lent que la mémoire du processeur et ce fossé va en s'élargissant : chaque octet sauvegardé réduit la performance numérique de la simulation. Cette contrainte se répercute aussi lors du transfert ou de l'analyse des résultats en post-traitement.

Aujourd'hui seuls quelques champs physiques sont sélectionnés pour être conservés et ils sont écrits à une fréquence nettement plus faible que celle à laquelle ils sont mis à jour dans le calcul. Par exemple dans le code Gysela sur plusieurs dizaines de **pétaoctets** (10^{15} octets) de données générées au cours de la simulation, quelques **téraoctets** (10^{12} octets) sont sauvegardés. Seule une petite fraction de la dynamique de la **turbulence plasma** est ainsi accessible en raison des choix drastiques qui s'imposent déjà.

Avec la nécessité de réduire encore ce ratio du fait de l'évolution du matériel, la stratégie de sauvegarde devient un enjeu crucial pour nos simulations et les choix décidés a priori comme actuellement peuvent être préjudiciables à nos recherches. Un objectif est donc de mettre en œuvre de nouvelles techniques d'analyse de données à la volée pour pallier ce risque. On cherche à analyser les données à mesure qu'elles sont produites, avant leur écriture sur disque, pour les filtrer et ne sélectionner que les plus pertinentes, augmentant ainsi la quantité d'information utile pour un volume fixe de données conservées.

Dans Gysela, la fonction de distribution des particules dans l'espace des phases 5D qui contient toute l'information n'est jamais écrite pour des raisons de coût en performance et en espace. À la place, des valeurs dérivées, plus compactes en 3D, sont calculées pour être conservées. Ces choix décidés a priori peuvent masquer une part importante de la physique. De nouvelles techniques d'analyse issues du monde du traitement de données (HPDA) non-spécifiques au code, telles que l'encodage de modèles réduits dans des réseaux de neurones, l'analyse en composantes principales ou d'autres outils issus du monde de l'intelligence artificielle sont maintenant disponibles. Des mises en œuvre sur des données de simulation existent, mais le passage par des fichiers pour l'interconnexion serait inenvisageable d'un point de vue performance sur les machines exascale. De nouveaux outils tels que Deisa [1] sont donc développés pour permettre une connexion directe par le réseau entre les nœuds de calcul parallèle dédiés à la simulation et un autre ensemble de nœuds de calcul parallèle utilisé pour l'analyse avant les étapes de sauvegarde. Les techniques d'apprentissage machine (réseaux de neurones, PoPe [2], etc.), peuvent ainsi être utilisées pour détecter automatiquement des événements rares intéressants pour les physiciens, voire la conduite de la simulation. L'analyse au vol de la simulation permet ainsi de guider et d'optimiser la sauvegarde notamment en la focalisant selon ce que les physiciens jugent le plus important.

L'augmentation de la complexité logicielle liée à l'utilisation de ces nouvelles techniques fait qu'elles ne sont accessibles qu'au travers de collaborations avec les experts des entrées-sorties et de l'analyse en ligne. L'utilisation de bibliothèques comme PDI [3,4] (développée à la Maison de la Simulation) qui permet d'identifier les données manipulées par le code pour déléguer leur traitement avant la sauvegarde devient aujourd'hui un prérequis à l'exploitation de la puissance de calcul disponible.

La résolution numérique des équations de la physique nécessite la **discrétisation** du problème mathématique, c'est à dire le passage d'un espace continu sur lequel sont définies les fonctions inconnues vers un espace discret caractérisé par un ensemble fini de points sur lesquels les valeurs de la solution sont recherchées au moyen d'un algorithme. Cet ensemble de points est appelé maillage. Sa définition et sa construction doivent être optimales afin de garantir les bonnes propriétés mathématiques et numérique qui assureront précision et efficacité : là est l'enjeu de la construction des

Finalités et verrous numériques pour ITER

La modélisation des écoulements de plasma dans les tokamaks commence souvent par une collection de données ponctuelles qui caractérisent l'expérience de fusion. Ces données sont souvent incomplètes et ne représentent pas directement les variables pertinentes pour la modélisation. Néanmoins, à partir de mesures incomplètes et indirectes, il est possible de reconstruire plus en détail la topologie magnétique et le profil des variables hydrodynamiques. Cette reconstruction est basée sur un modèle d'équilibre des forces magnétiques et hydrodynamiques calculé par des codes dédiés. Cet équilibre magnétique peut être instable, et l'enjeu prin-

gnésés, cette caractéristique des maillages triangulaires peut s'avérer préjudiciable aux performances des méthodes numériques. Par contre, dans ce contexte, il est très

ciées à des stratégies numériques d'ordre élevées pouvant compenser l'inconvénient du non alignement : Galerkin discontinue, éléments nis de continuité C^1 ... Dans le second cas, les maillages sont plutôt constitués de quadrangles courbes et les problèmes abordés sont ceux pour lesquels l'interaction précise avec les composantes de la chambre à vide ne joue pas un rôle crucial, comme par exemple dans l'étude de la dynamique à court terme des instabilités MHD. La combinaison de ces deux approches, c'est-à-dire l'utilisation de maillages hybrides triangles/quadrangles, est une voie de recherche très prometteuse. Elle permettra de tirer parti des avantages de chaque approche là où l'efficacité est optimale. La principale difficulté sera la gestion des raccordements

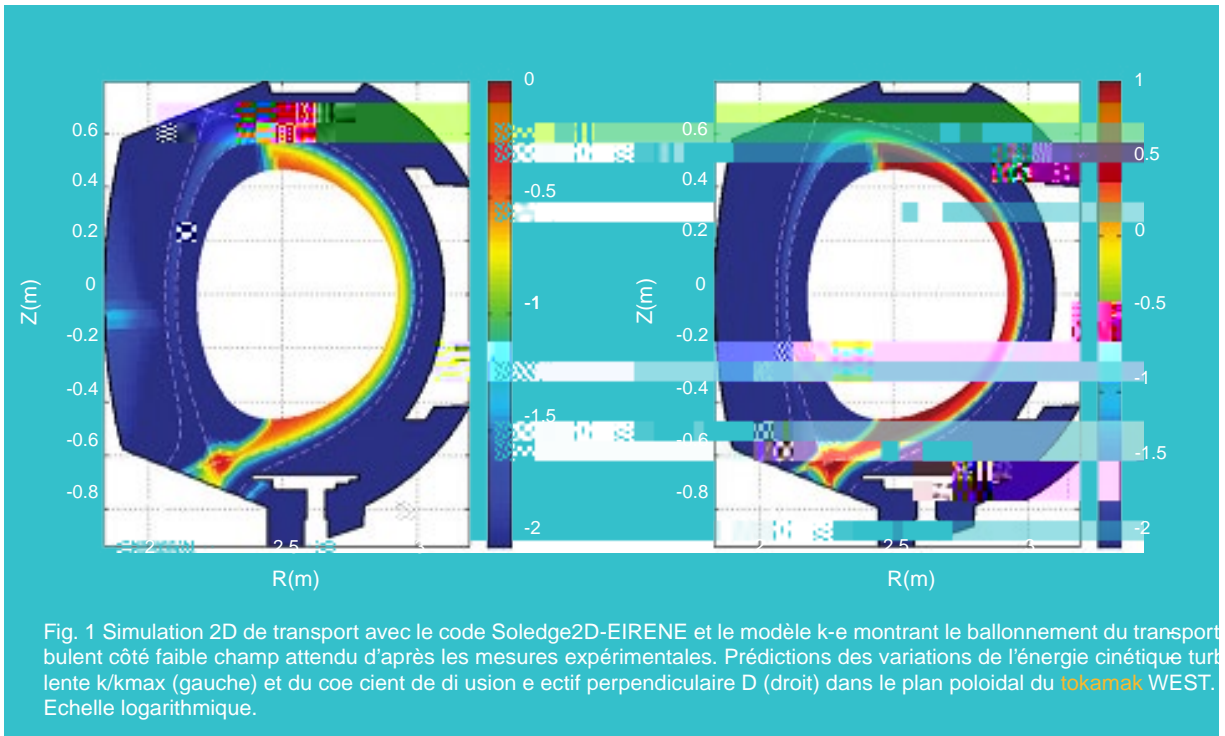
entre les différents blocs de maillages, suivant que ces blocs sont conformes ou non-conformes, superposés par endroit ou pas du tout superposés. Des stratégies de raccordement existent déjà dans des contextes simplifiés. Il faudra

RÉFÉRENCES

- [1] M Hoelzl, GTA Huijsmans, SJP Pamela, M Becoulet, E Nardon, FJ Artola, B Nkonga, et al., The JO non-linear extended MHD code and applications to large-scale instabilities and their control in magnetic confined fusion plasmas, Nuclear Fusion, 61, 065001 (2021)
- [2] O. Czarny and G. Huysmans, Bézier surfaces and finite elements for MHD simulations, JCP, 227, 423 (2008)
- [3] SJP Pamela, GTA Huijsmans, M Hoelzl and the JOREK Team, Generalized Formulation of G-continuity Bézier Elements Applied to non-linear MHD simulations (2022).
- [4] H Guillard, J Lakhilili, A Loseille, A Loyer, B Nkonga, A Ratnani, A Elarif, Tokamesh: A software mesh generation in Tokamaks, Rapport Inria 9230 (2018)

#6

CHAÎNE DE MODÈLES
POUR L'INTÉRACTION
PLASMA PAROI



gion de bord du plasma [4].

Le choix du modèle pour une étude donnée dépend en général d'un compromis entre le niveau de délité de la physique requis pour une étude donnée et le coût en terme de calcul – qui peut être totalement prohibitif, même pour calculer l'état du plasma à un instant donné.

La con guration magnétique et la paroi

La prise en compte de l'interaction avec la paroi conduit à introduire de nouveaux acteurs dans les modèles : en premier lieu, la paroi elle-même qui impose une frontière au plasma, bien entendu. Cette frontière n'est en général pas alignée sur la géométrie magnétique de la machine (les surfaces de flux). Ce non-alignement pose un problème important à cause de la très forte anisotropie liée au fort champ magnétique, qui implique une forte diffusion numérique radiale sur un maillage non aligné avec les surfaces magnétiques (cf article #5 L'enjeu des maillages). Une première façon de traiter ce

problème, mise en œuvre dans des situations où la con guration magnétique évolue dans le temps, est d'utiliser une approche de conditions limites immergées (pénalisation) sur un maillage aligné, où la paroi est décrite par un masque, le maillage s'étendant sur un domaine plus grand que le plasma. Ceci pose des problèmes de précision dans le calcul des flux à la paroi, car ceux-ci doivent être interpolés/extrapolés sur des points ne faisant pas partie du maillage. Une façon plus robuste de traiter ce problème est d'utiliser un maillage non structuré, localement désaligné par rapport à la géométrie magnétique au voisinage de la paroi et une méthode de haute précision afin de limiter les effets de la diffusion numérique (cf article #4 et encart D). Ce type d'approche a fait ses preuves dans de nombreuses applications industrielles, automobile, aéronautique et son adaptation aux problèmes considérés ici, extrêmement anisotropes, serait un progrès majeur. Les résultats obtenus jusqu'ici en géométrie 2D sont très prometteurs, et permettent en particulier de traiter

Le plasma en interaction avec la paroi

Les échanges d'énergie et de quantité de mouvement avec la paroi, dont la densité est 10 ordres de grandeur supérieure à celle du plasma nécessitent une description spécifique, à l'aide d'outils numériques adaptés. Par exemple, des coefficients de réflexion peuvent être calculés par ailleurs à l'aide de codes dédiés décrivant les collisions binaires des ions dans la paroi. Cependant, ces modèles de collisions binaires perdent leur validité aux faibles énergies correspondant aux conditions rencontrées dans ITER, où des simulations de dynamique moléculaire s'appuyant sur des potentiels d'interaction pertinents doivent être réalisées. Les ions rétro-diffusés par la paroi le sont essentiellement

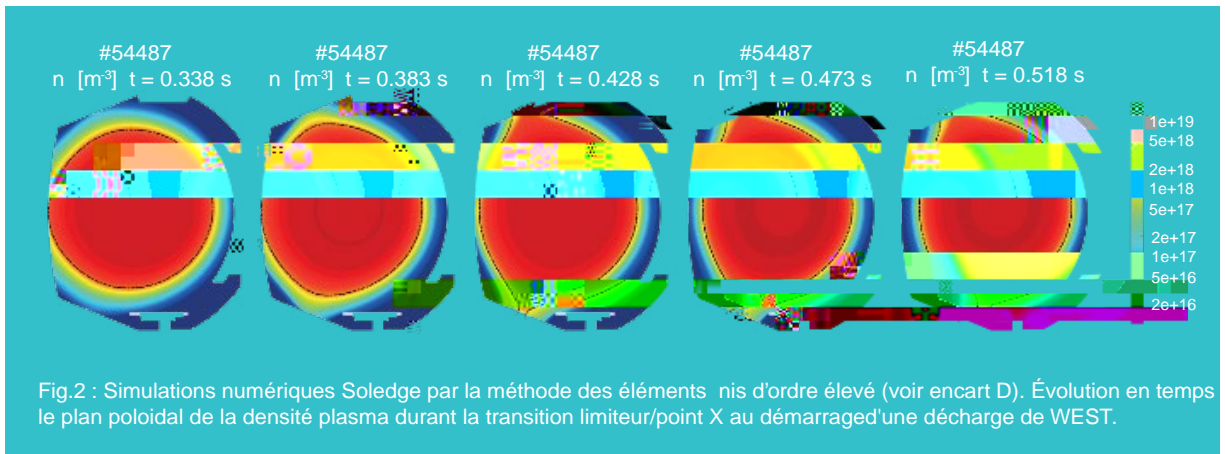


Fig.2 : Simulations numériques Soledge par la méthode des éléments finis d'ordre élevé (voir encart D). Évolution en temps le plan poloidal de la densité plasma durant la transition limiteur/point X au démarrage d'une décharge de WEST.

sous forme d'atomes, et les ions en compte de multiples espèces port de ce gaz neutre jusqu'aux (isotopes d'hydrogène) implan- chargées, ainsi que la physique pompes. Ce type d'hybridation tés sont piégés dans des défauts de la paroi (souvent à travers des de modèles et de méthodes nu- du réseau cristallin. Ils peuvent se bases de données précalculées), mériques a des conséquences im- recombiner en molécules et être ainsi que celle de la physique du portantes du point de vue de la relâchés dans le plasma, en parti-gaz neutre et du rayonnement, qui convergence du code, qui s'appuie culier si la température du mur est sont insensibles au champ magné ici sur une intégration en temps. su sante. Ces phénomènes sont tique. Ces aspects multi-physiques Un couplage non-linéaire à travers décrits par des codes spéci ques sont au cœur des dé s numériques les échanges de particules, quan- qui peuvent être couplés aux mo autour de cette physique, et re tité de mouvement et d'énergie dèles de plasma a n de décrire quièrent des stratégies spéci ques entre le plasma et le gaz neutre (à la réaction du mur lors de la dé au niveau de la conception des ou- travers les processus de physique charge, par exemple pendant des tils pour les simulations. atomique) peut introduire une transitoires. Les atomes et molé cules résultant de cette interaction entre les ions du plasma et du mur forment un gaz neutre qui est capable d'échanger des particules, de la quantité de mouvement et de l'énergie avec le plasma. De même, les ions du plasma peuvent éroder la paroi par transfert de quantité de mouvement, et conduire ainsi à des sources d'impuretés qui vont progressivement s'ioniser en péné trant dans des régions de plus en plus chaudes du plasma. Ces espèces non totalement ionisées, gaz neutres et impuretés, vont pouvoir convertir l'énergie des électrons en rayonnement. Transmettre ainsi l'énergie du plasma à des espèces non chargées permet de l'étaler sur une surface plus importante et de réduire le piquage des ux de puissance. Certaines impuretés sont d'ailleurs injectées volontai- rement dans ce but. Du point de vue de la simulation, ceci se traduit donc par l'obligation de prendre

Une hiérarchie de modèles pour la physique du gaz neutre

Les atomes et molécules sont des espèces neutres et leur dynamique n'est donc pas contrainte de manière directe par la configuration magnétique. Tout comme pour le plasma, leur physique peut être modélisée par une hiérarchie de modèles allant du cinétique 6D aux modèles analytiques. Ce niveau de description n'est pas forcément homogène avec celui utilisé pour le plasma. Par exemple, dans le code Soledge3X-EIRENE, une description 2D du transport du plasma est couplée à une description cinétique 6D Monte Carlo pour le gaz neutre, qui permet de résoudre un problème multi-espèces 6D sur une grille 3D, dans une géométrie arbitraire [2]. Cette description fine des neutres permet par exemple de capturer avec une bonne précision le trans-

port de ce gaz neutre jusqu'aux (isotopes d'hydrogène) implan- chargées, ainsi que la physique pompes. Ce type d'hybridation tés sont piégés dans des défauts de la paroi (souvent à travers des de modèles et de méthodes nu- du réseau cristallin. Ils peuvent se bases de données précalculées), mériques a des conséquences im- recombiner en molécules et être ainsi que celle de la physique du portantes du point de vue de la relâchés dans le plasma, en parti-gaz neutre et du rayonnement, qui convergence du code, qui s'appuie culier si la température du mur est sont insensibles au champ magné ici sur une intégration en temps. su sante. Ces phénomènes sont tique. Ces aspects multi-physiques Un couplage non-linéaire à travers décrits par des codes spéci ques sont au cœur des dé s numériques les échanges de particules, quan- qui peuvent être couplés aux mo autour de cette physique, et re tité de mouvement et d'énergie dèles de plasma a n de décrire quièrent des stratégies spéci ques entre le plasma et le gaz neutre (à la réaction du mur lors de la dé au niveau de la conception des ou- travers les processus de physique charge, par exemple pendant des tils pour les simulations. atomique) peut introduire une forte raideur dans les équations, un phénomène bien connu dans les écoulements réactifs (combustion, ...). L'hétérogénéité de modèles se prête mal à une résolution implicite, et le caractère explicite du couplage peut donc fortement contraindre le pas de temps. Ce type de couplage pose de plus le problème de l'introduction d'un bruit statistique lié au fait que le solveur Monte Carlo ne fournit pas une estimation de la solution dont l'écart à la solution exacte est très supérieur à la précision numérique dans les cas d'application pratique : le code ne converge plus vers une solution stationnaire à cause du forçage par le bruit et il devient nécessaire de définir plus précisément ce que l'on appelle la solution stationnaire du code. Décrire le gaz neutre comme un fluide, c'est à dire un milieu continu, permet d'éviter ces difficultés, en intégrant la résolution dans le solveur plasma, au prix d'approxi

mations qui peuvent fortement affecter les solutions. Une approche intermédiaire, dite « hybride », s'appuie sur le fait que cette hypothèse de continuité du milieu est plus ou moins valide dans le domaine de simulation. Dans les machines de taille plus grande, il peut exister des régions de validité dans le divertor qui justifient une approche fluide, à la paroi et réionisés dans le domaine (c'est à dire la proportion d'ions recyclés pleinement une approche cinétique de simulation). Ce dernier reste nécessaire dans le reste de la machine. Ce type d'approches hybrides a été développé dans plusieurs domaines d'application, allongement substantiel du temps de la rentrée atmosphérique de particules spatiaux, le transport de rayonnement, et fait actuellement

l'objet de recherches actives dans la communauté avec des premiers résultats prometteurs.

Les challenges spécifiques à ITER

Le traitement de la question de l'évacuation de l'énergie et du contrôle des particules sur une machine de la taille d'ITER pose des problèmes spécifiques, liés plus ou moins subtilement à la taille de la machine (on raisonne ici à champ magnétique constant), qui augmente mécaniquement le nombre de points de maillage nécessaires, les échelles des phénomènes physiques à résoudre restant identiques à celles des machines actuelles. Il est utile de rappeler que cette augmentation de la taille a pour but d'augmenter le **temps de confinement de l'énergie**. De manière plus générale, les échelles de temps associées aux décharges augmentent avec la taille et cette augmentation se retrouve naturellement au niveau des simulations, qui soit reposent sur une relaxation en temps vers une solution stationnaire (ou du moins avec des champs moyens stationnaires) soit cherchent à décrire des phases de décharges. De fait, le problème est particulièrement sévère pour le temps de relaxation

Ce dernier peut être réduit en augmentant le pas de temps (schéma numériques, schéma de couplage) ou en réduisant le temps CPU nécessaire à calculer un pas de temps (optimisation et parallélisation). Une autre façon de formuler ce problème est de dire que la convergence du coefficient R vers 1 traduit une forte augmentation du couplage non linéaire entre le plasma et le gaz neutre, qui ralentit la convergence du système. Diverses approches peuvent être mises en œuvre pour accélérer cette convergence, comme des méthodes multi-grilles s'appuyant sur des grilles de résolutions plus grossières pour approcher plus rapidement la solution stationnaire

gl7PU 4c Tw8necail sta'tre mise7x 0 m -s paraux neut5s mn). Une aai [[TJ 0.04Tx 0 1r. Tge

La confrontation simulations-expériences est aujourd'hui au cœur de la validation indispensable des codes de simulation. Le plasma magnétisé au sein d'un tokamak est pourtant un milieu extrême qui ne se prête pas à une mesure aisée et directe des grandeurs d'intérêts pour ces

hypothèses qu'on cherche à tester devient centrale. Les diagnostics synthétiques, conçus comme lieu privilégié de cette comparaison, doivent être pensés à n que cette comparaison soit la plus pertinente possible.

A la question « sur quels observables physiques doit-on raisonner pour avoir une comparaison discriminante ? » s'ensuivent immédiatement d'autres questions :

- Quel lien ces observables entretiennent-elles avec la réalité expérimentale ? Par quelles étapes doit-on passer (via la mesure et via le calcul) pour les générer ?
- Les observables sont-elles robustes vis-à-vis des étapes de la mesure ? Leur obtention suppose-t-elle l'introduction d'hypothèses fortes ?
- Simulés, ces observables sont-elles fortement sensibles à l'implémentation du modèle physique ou du modèle de la fonction d'instrument ?

Prenons par exemple le cas de la mesure, indirecte, de la température des électrons. Sur WEST comme sur beaucoup de toka-

maks, celle-ci provient d'une mesure de la puissance, dans différentes bandes de fréquence, du rayonnement cyclotronique électronique (ECE). Cette puissance est reliée à la température des électrons, mais sous certaines conditions seulement [1].

Celles-ci incluent que le plasma soit d'une densité suffisante pour se comporter comme un corps noir dans les bandes de fréquence en question, ce qui est faux au bord du plasma par exemple.

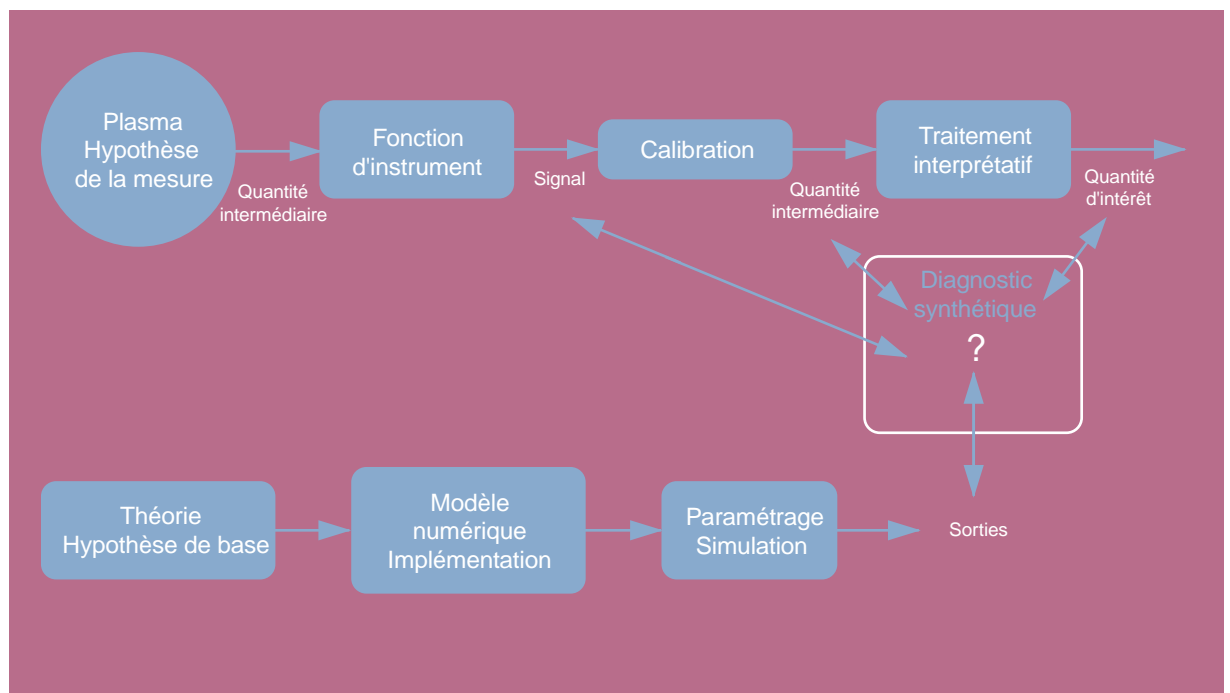
Ces contraintes réduisent l'espace des paramètres dans lequel la comparaison théorie-expérience est faisable, et, bien conçu, le diagnostic synthétique doit alerter sur le dépassement de ses conditions de validité.

Une autre source d'incertitude réside dans la fonction d'instrument par laquelle transite le signal au sein du diagnostic. Elle peut être caractérisée empiriquement par une calibration. Mais celle-ci ne reproduit pas nécessairement les

conditions de mesure sur plasma (vibrations, niveaux de puissance, température ambiante, etc) et des

extrapolations peuvent être nécessaires sur le comportement de certains composants, qui, de surcroît, peuvent vieillir. Estimer la fonction d'instrument en conditions réelles n'est donc pas immédiat.

Cette seconde limite pose la question de la T₀ et du T₁



promis entre robustesse, degré de précision, complexité et pertinence physique et ainsi établir une hiérarchie des observables accessibles à la mesure. C'est ce questionnement sur le niveau auquel doit se faire la comparaison qui est illustré sur la [Figure 1](#).

Prenons pour autre exemple celui du diagnostic synthétique de ré ectométrie qui peut aider à identifier les écoulements turbulents dans le plasma du tokamak. La ré ectométrie à micro-ondes dans un tokamak est une technique de type radar, basée sur la dépendance de l'indice de réfraction du plasma vis-à-vis de la densité électronique. Agissant comme une sonde, une onde se propage dans un plasma inhomogène jusqu'à une couche du plasma où elle se réfléchit comme on peut le voir sur la [Figure 2](#).

Comme la position de la coupure dépend de la fréquence des ondes, la densité du plasma peut être mesurée à différentes sur

LA MODÉLISATION DES SCÉNARIOS PLASMA

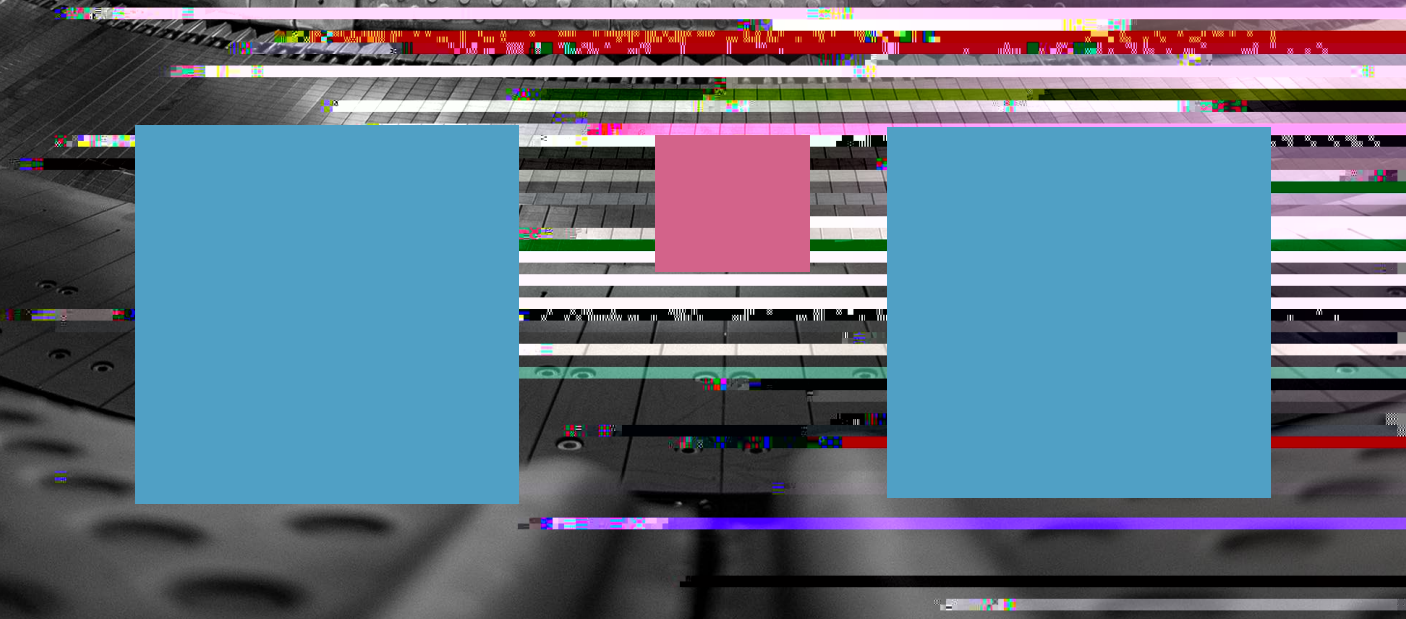
par Clarisse Bourdelle & Gerardo Giruzzi

La simulation des différents phénomènes physiques qui interviennent dans les plasmas de fusion, malgré les formidables progrès accomplis dans les dernières années, n'est pas suffisante pour prédire le comportement du plasma dans les machines à confinement magnétique, comme les tokamaks. Pour cela, il est nécessaire de simuler la décharge plasma complète, dans toute sa complexité, autrement dit le scénario plasma. A ce jour, ceci ne peut pas se faire en utilisant, pour chaque phénomène, le modèle le plus avancé et donc coûteux en temps de calcul. Un effort important a donc été engagé pour développer des modèles réalistes mais suffisamment simples pour être intégrés dans une simulation globale. C'est le défi de la modélisation intégrée des scénarios plasma, un élément important dans les recherches actuelles et qui sera essentiel pour les futures centrales à fusion, et déjà pour ITER.

#8

Modélisation globale d'une décharge plasma

Le plasma d'un tokamak est un système complexe sous plusieurs points de vue. D'une part, à cause de la complexité intrinsèque des phénomènes physiques qui déterminent son évolution : dynamique couplée des électrons, des ions et des ondes que le plasma même génère, dans un espace des phases multidimensionnel, interaction avec les systèmes de chauffage, avec les champs magnétiques de contrôle, avec les parois qui l'entourent, rayonnement dans plusieurs gammes de longueur d'onde, instabilités magnétohydrodynamiques



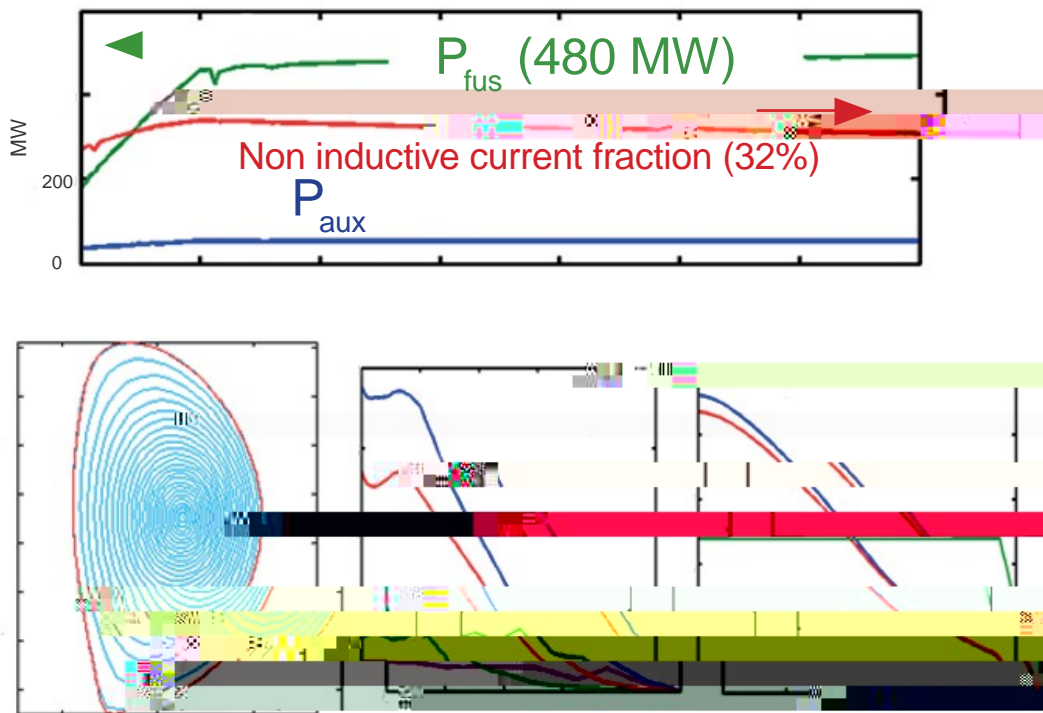


Fig.3 : exemple de simulation prédictive d'un scénario de référence d'ITER par le code CRONOS. En haut: quantités dépendantes du temps. En bas: équilibre magnétique (gauche) et profils radiaux de quantités dépendantes de l'espace: puissances de chauffage (milieu), densité et températures (droite).

voire jours de calculs sur un grand nombre de processeurs. Ensuite, on utilise cette base de données de simulation pour faire apprendre à un algorithme d'intelligence artificielle la dépendance des caractéristiques de la turbulence par rapport aux paramètres physiques d'entrée. L'apprentissage permet de réduire à insérer dans les codes de modélisation intégrée, avec un gain énorme en vitesse de calcul. C'est ce qui a été fait pour les modules de transport turbulent qui étaient parmi les plus lents des boucles de simulation intégrée [2].

- Une validation automatisée à grande échelle avec mise en place de méthodes statistiques permet de comparer des données expérimentales 0D (énergie, consommation de ux magnétique), 1D (profils de températures, densités, rotation) ou 2D (rayonnement, me

- L'intégration de plusieurs modules (jusqu'à quelques dizaines) de nature, vitesse, complexité, performances numériques différentes et souvent écrits en des langages informatiques différents. Celle-ci est une tâche d'une grande difficulté, chaque module étant développé et testé pour fonctionner

RÉFÉRENCES

- [1] J.F. Artaud et al., Nucl. Fusion, 50, 043001 (2010)
- [2] K.L. van de Plassche et al., Physics of Plasmas, 27, 022310 (2020)
- [3] F. Imbeaux et al., Nucl. Fusion 55, 123006 (2015)

EN GUISE DE CONCLUSION

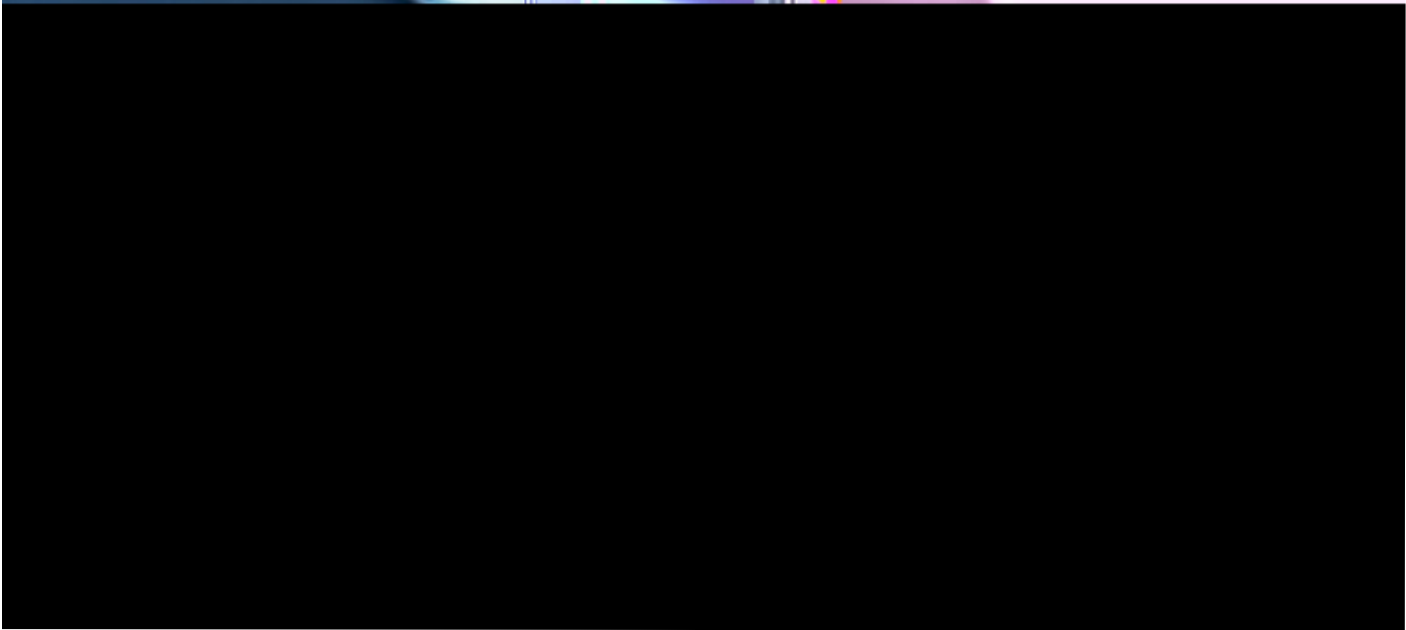
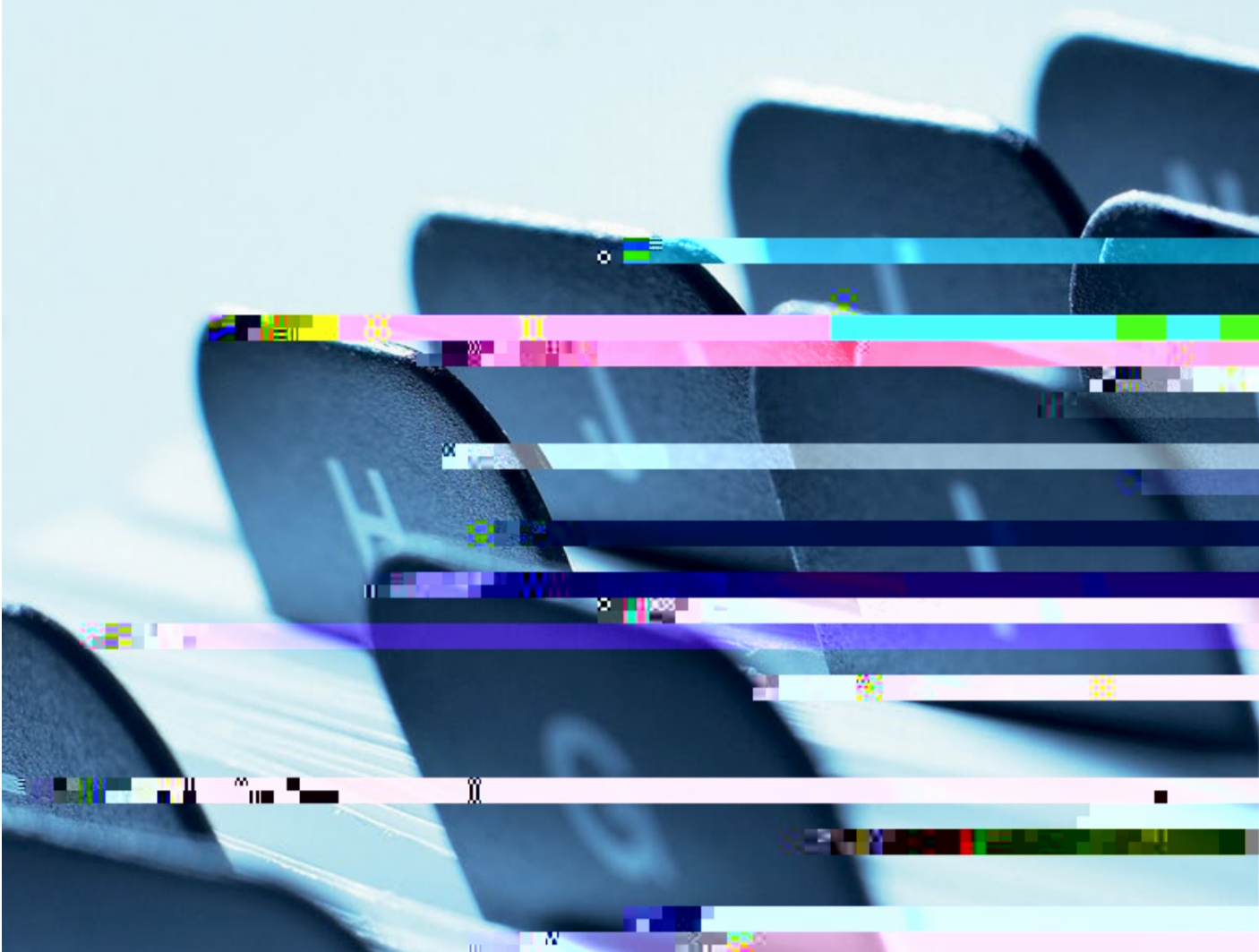
par Eric Serre & Philippe Ghendrih

C^{onclusion}

#9

GLOSSAIR

Benchmarks



GLOSSAIR





Guido Ciralo
CEA, IRFM
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE FRANCE



Image de couverture

phases position/vitesse et sections dans un plan radial.

Crédit :

Alejo J. Garcia
INSTITUT JEAN LAMOUR
UNIVERSITÉ DE LORRAINE
NANCY - FRANCE

Maillage ITER en surimpression
(Crédit : ITER.org)



RETROUVEZ
VERSION AUGMENTÉE
SUR

irfm.cea.fr/sur

Éditeur : Institut de Recherches sur les Hautes Pressions, Université Paris-Saclay
CEA-Cadarache, bâtiment 705 - 13108 Saint-Paul-lès-Lanzac

Directeur de la publication : Philippe Choler

Coordinateur scientifique : Philippe Choler

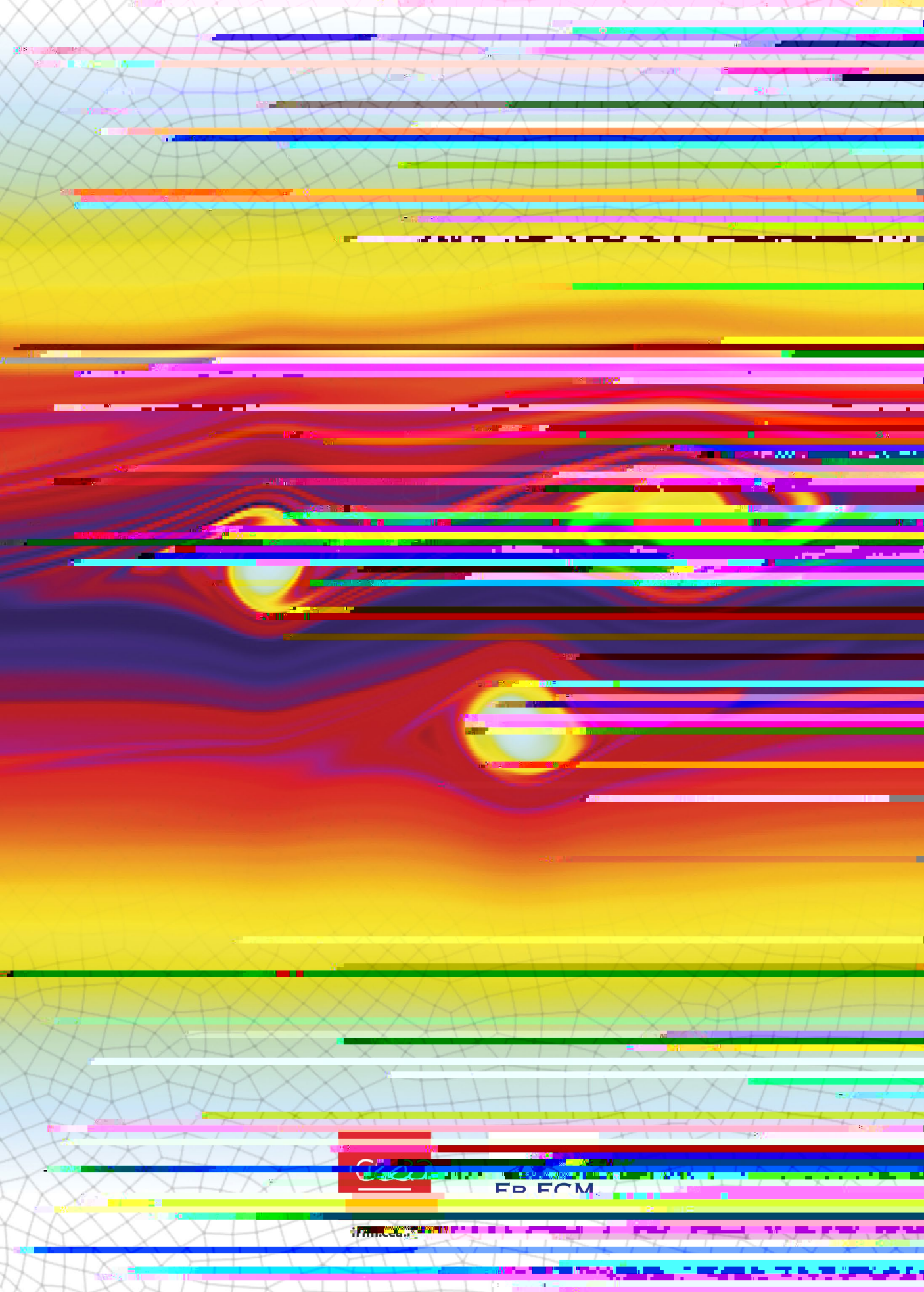
Comité scientifique : Jean-Claude Baudou, Michel Bessicq, Michel Bessicq, Michel Bessicq, Xavier Garbet, Gerardo Giruzzi, André Grosman, Frédéric Imbert

Diffusion : Veronique Poirot - Abn

Réalisation : Christophe Proust

ISSN 1776-3671

Impression : Cui Doign, Preyères et



Ed ECM

ifm.com