

LES METIERS DE LA SIMULATION EN ASTROPHYSIQUE

La simulation numérique subit une double évolution, à laquelle notre discipline doit s'adapter : elle se *professionnalise* et elle se *dissémine* :

- Dissémination : par le biais notamment de codes ou de méthodes numériques mis dans le domaine public, de collaborations avec des numériciens désireux de diversifier les applications astrophysiques de l'outil qu'ils ont développé, ou du recrutement de post-docs, la simulation devient accessible à une large population de chercheurs non spécialisés. Elle est devenue indispensable dans de nombreux domaines, composante essentielle de la théorie mais aussi de l'interprétation des observations, ou de plus en plus dès la définition des instruments.
- Professionnalisation : inversement elle se spécialise très fortement pour répondre — bien que l'on soit encore, faute de moyens, très loin des standards industriels — à des exigences multiples : analyse numérique, architecture logicielle, développement et tests, visualisations, maintenance, portabilité (pour s'adapter à la diversité des architectures matérielles, notamment parallèles), etc. représentent un investissement humain lourd, faisant appel à des compétences multiples. Ces compétences sont devenues des métiers spécifiques, nécessaires mais encore mal reconnus.

Comme dans d'autres domaines scientifiques, la simulation numérique est devenue une composante majeure de nos recherches. Elle y tient toutefois une place particulière, car en astrophysique elle remplace souvent l'expérience de laboratoire ; d'autre part l'astrophysique est une discipline intégratrice, combinant des outils physiques multiples (hydrodynamique, rayonnement, n-corps, physique atomique et moléculaire, physique nucléaire, MHD, physique des plasmas...). La simulation se place au cœur de l'astrophysique lorsqu'en permettant de combiner ces mécanismes physiques élémentaires elle devient, de plus en plus souvent, une véritable modélisation d'objets astrophysiques complexes.

Toutefois cette multiplicité d'outils, appliqués à des conditions physiques très diverses, fait que contrairement à d'autres disciplines il y a peu de codes d'usage standardisé en astrophysique. Dans d'autres domaines scientifiques (chimie, biologie, météo...) l'unité des approches ou des problématiques a permis de développer des codes d'usage général, accessibles à une large communauté de chercheurs ; ces codes ont pu bénéficier de moyens importants, permettant de les fiabiliser, de faciliter leur usage, de les faire évoluer, de partager l'expérience de leur utilisation. Il n'y a en astrophysique que peu d'exemples de codes devenus ainsi un outil quasi-universel : même les recherches portant sur une physique semblable l'appliquent fréquemment dans des conditions astrophysiques suffisamment différentes pour que le développement de codes spécifiques, ou du moins profondément remaniés, s'impose. Et même les codes réputés standard voient rapidement se développer des versions différentes optimisées pour des usages variés.

L'enseignement des techniques de base de la simulation numérique s'est développé : les méthodes numériques sont largement diffusées ; de nombreux codes sont disponibles sur le réseau ; le temps de calcul est abondamment accessible, localement (pour le développement et les tests, les simulations légères) ou dans les grands centres de calcul nationaux. Il faut toutefois noter à leur sujet que ceux-ci ne peuvent suivre que de loin la croissance des moyens disponibles,

non seulement aux Etats-Unis et au Japon, mais dans de nombreux pays européens comparables au notre. La situation actuelle redevient critique et nous fait craindre que le retard devienne irrémédiable. L'INSU doit pouvoir peser, avec les autres partenaires concernés, pour une évaluation des moyens financiers assurant que ces centres nous maintiennent au niveau de la compétition mondiale. Ces budgets devraient être comparés, en proportion de l'intérêt scientifique comme de la taille des communautés concernées, avec ceux mis en œuvre pour les autres grands instruments de la recherche.

La simulation est ainsi devenue accessible à des astrophysiciens non ou peu spécialisés, et rares sont les laboratoires où elle ne se pratique pas. Mais on peut faire un parallèle : une communauté scientifique nationale (voire européenne) ne pourrait se contenter de mener des observations sur des instruments étrangers, sous peine (outre l'intérêt scientifique et technologique propre du développement de ces instruments) de perdre pied dans la maîtrise des techniques d'observation et dans la recherche de résultats novateurs. Elle ne peut pas plus se satisfaire d'une situation où, faute de reconnaître et attribuer les moyens nécessaires aux équipes développant des outils numériques originaux, elle se limiterait à utiliser ceux disponibles publiquement, ou à rejoindre en position minoritaire des développements dont elle ne maîtriserait ni les choix techniques, ni l'exploitation scientifique principale.

Ce parallèle n'est pas anodin. La simulation numérique partage bien des caractéristiques et des difficultés avec les développements instrumentaux. Un code est un instrument de recherche, qui demande en général l'investissement d'années de travail ingrat et souvent mal apprécié avant toute exploitation scientifique. Il demande des spécialisations professionnelles souvent difficiles à trouver, à former et à retenir dans la communauté. Il est souhaitable qu'une fois réalisé et mis au point un code ne reste pas un instrument propriétaire mais puisse être mis au service d'une large communauté ; mais cela demande une démarche de qualité, une professionnalisation du développement, de la documentation et de la maintenance, des interfaces utilisateurs souples et adaptés, ainsi qu'un soutien par les développeurs assurant que le code soit utilisé de manière optimale, et dans les limites strictes où il a été testé et validé. Toutefois, et même si rien ne se fait dans des conditions idéales, des procédures (appels d'offres, contrats...) existent pour assurer, lorsque le développement d'un instrument est décidé, qu'il bénéficie des moyens humains et matériels nécessaires au succès du développement, puis de l'exploitation scientifique. Rien de tel n'existe actuellement en France pour la simulation.

Nos pratiques en termes de recrutement, d'évaluation, de formation, ont pourtant parmi leurs défauts des avantages qui peuvent être des atouts importants : le principal tient sans doute au statut des chercheurs qui, moins soumis qu'ailleurs à la pression productiviste puisqu'ils disposent moins tard d'emplois permanents, peuvent investir les années de travail indispensables au développement d'un code compétitif, même s'ils peuvent craindre des difficultés dans l'évaluation de ce travail. Il reste ainsi possible pour des jeunes chercheurs, particulièrement talentueux et bien préparés, de développer des codes originaux et novateurs.

De même un laboratoire qui souhaite développer des compétences peut avoir une vision à long terme, qui permet de former un étudiant, ou de le faire former dans un laboratoire étranger, en espérant pouvoir le faire recruter un jour si tout se passe bien. Mais ces mêmes conditions sont pour une bonne part responsables d'une dispersion des efforts, puisque tout un chacun peut, même mal préparé, se lancer dans la simulation sans être lié par des soucis de rentabilité immédiate, tandis que nos modes d'attribution de moyens, humains ou matériels, limitent notre capacité à soutenir ou former les équipes capables d'assurer les développements lourds nécessaires.

En effet, même pour un chercheur brillant ou une équipe de recherche qui a développé un code au meilleur niveau de la compétition internationale, son exploitation demande de nouveaux investissements très lourds :

- Développement des outils d'analyse et d'interprétation : on ignore trop que, bien souvent, les visualisations représentent un développement aussi lourd que le code lui-même. Les simulations deviennent de plus en plus complexes, tri-dimensionnelles, contenant une quantité d'informations dont l'exploration, l'interprétation, voire la publication ou la présentation publique, demandent des outils puissants dont la maîtrise représente une spécialité à part entière. Il ne s'agit évidemment pas d'esthétique (encore qu'elle ne soit pas à négliger dans l'effort nécessaire pour bien faire comprendre le résultat), mais avant tout de la façon dont le phénomène physique peut être observé, identifié, analysé et présenté. Les logiciels du commerce comme IDL peuvent souvent faciliter ce travail mais représentent pour certaines équipes un coût important. Pour éviter cette dépense, ou parce que ces logiciels sont mal adaptés à certains besoins spécifiques à la physique étudiée, certaines équipes doivent développer des outils particuliers qui multiplient le travail nécessaire. Il faut noter l'effort significatif des centres nationaux dans ce domaine : L'IDRIS dispose notamment d'une expertise sur AVS, utilisable en accès distant ou en mode client-serveur, et le CINES peut aider à la mise en oeuvre de son puissant serveur de visualisation SGI ONYX2, notamment pour la réalisation de films, et offre également des possibilités d'accueil sur place pour des missions de plusieurs jours.
- Maintenance : Une fois le code développé, testé, validé, maîtrisé dans les possibilités et les limitations de sa version initiale, il doit évoluer continûment : pour améliorer ses performances, pour l'adapter aux nouvelles architectures matérielles, pour ajouter de nouveaux modules, pour l'exploiter dans des régimes différents de ceux envisagés initialement, pour l'interfacer avec des codes apportant une physique additionnelle. Nos codes sont pour l'essentiel des prototypes, en constante évolution. Cela impose une démarche de qualité dès la conception, l'écriture, et la documentation du code. La qualité logicielle est un enjeu important des développements dans le monde industriel. Elle demande une formation spécifique, des moyens humains, des environnements de développement, qui sont rarement disponibles dans le monde de la recherche, et impossibles à mobiliser dans les équipes morcelées dont nous disposons en astrophysique. La qualité logicielle se pratique donc le plus souvent de manière semi-empirique, pénalisant l'usage et les développements ultérieurs.
- Collaborations : un code de bon niveau est un outil puissant, qui peut souvent être utilisé pour traiter plusieurs problèmes : de nombreuses collaborations sont alors possibles et souhaitables, pour démultiplier les usages de cet outil. Mais souvent l'équipe qui a développé le code ne peut accepter ces collaborations, tant qu'elle ne peut être garantie de maîtriser l'usage qui sera fait d'un code souvent encore fragile, et dont l'exploitation dans d'autres conditions demanderait des développements et une validation qu'elle seule pourrait garantir, mais qui demandent un investissement qu'elle ne peut fournir.

La création des programmes nationaux, qui structurent l'astrophysique par grands domaines thématiques, apporte une réponse partielle : les programmes donnent la possibilité d'un pilotage appuyé sur une expertise scientifique, permettant d'identifier les besoins, de regrouper les forces, d'appuyer les équipes porteuses de projets reconnus comme prioritaires, de soutenir auprès des instances (INSU, section, CSA...) leurs demandes de moyens humains ou matériels. Les programmes nationaux ont tous inclus, dans leur prospective, une réflexion sur leurs besoins en simulation numérique. Mais ils ne peuvent pas suffire à organiser les compétences en simulation numérique qui, bien souvent, traversent leurs frontières : outre le fait de structurer une communauté de cosmologues, de physiciens stellaires ou galactiques, etc., nous devons aussi animer une communauté de professionnels de la simulation hydrodynamique, du transfert de rayonnement...

Une piste intéressante et parfois évoquée pourrait être, comme pour les instruments d'observation, celle d'appels d'offres assortis de moyens conséquents : mais la maigreur habituelle

des ressources aujourd'hui disponibles, face à la multiplicité des besoins et à l'étroitesse du marché national (en termes de nombre d'équipes susceptibles de relever un défi donné, avec des chances raisonnables d'arriver à un résultat compétitif) font que cette possibilité, en l'état actuel des choses, ne pourra être utilisée qu'avec parcimonie. Les post-docs sont une autre piste, largement utilisée par les laboratoires étrangers pour pousser les développements numériques, ou pour importer des codes qu'ils ont contribué à développer. L'augmentation actuelle du nombre de contrats post-doctoraux est donc une opportunité nouvelle que nous souhaitons utiliser. L'INSU pourrait attribuer spécifiquement certains de ces contrats à des projets numériques. Toutefois les bons candidats sont très demandés sur le marché international, et cette démarche n'aurait de chances de succès qu'avec des contrats d'une durée minimale de 2 ans et un salaire compétitif.

Le cadre européen, avec les moyens (notamment post-docs de durée raisonnable) qu'il offre est sans doute d'une taille adaptée pour de tels projets, et des exemples de coopération européenne pour des développements numériques existent. Mais en l'absence de structure incitative européenne, ce sont les équipes concernées qui doivent être à l'initiative de ces collaborations.

Une autre direction concerne le renforcement de laboratoires ou d'équipes disposant d'une masse critique, qui présente de nombreux avantages : partage de compétences ou de développements, formation de jeunes chercheurs dans un environnement riche d'expérience dans des domaines divers de la simulation numérique, concentration possible de moyens matériels (calculateurs dédiés, fermes de PC...) et humains : ceux-ci concernent essentiellement des ingénieurs de recherche capables de fournir un soutien réel qui peut concerner avant tout la maintenance des codes, la visualisation, le portage sur des architectures nouvelles, l'assistance à des collaborateurs ou étudiants : on note également quelques cas particuliers où des IR sont déjà en place pour apporter un support très spécifique, lié à une architecture originale comme les GRAPE à Marseille, ou à une activité particulière comme à l'IMCCE. La spécialisation de quelques laboratoires disposant de tels moyens, d'une base installée de codes et d'expertises diversifiées, est incontournable puisque eux seuls peuvent obtenir les moyens nécessaires, et qu'en retour ils peuvent constituer des centres d'excellence en simulation numérique, ouverts autant que possible à des collaborations nationales ou internationales pour l'exploitation astrophysique de ces codes. Ces laboratoires peuvent évidemment jouer un rôle pilote dans les collaborations souhaitables à l'échelle nationale ou européenne. Ils pourraient également mettre en place un réseau national des ingénieurs numériques, afin de partager leurs expériences et leurs compétences. Ces laboratoires sont aussi fréquemment impliqués, de plus en plus lourdement, dans la conception et la fabrication des instruments : la simulation numérique y prend une place de plus en plus centrale et demande un travail intensif de production de modèles utilisés tant pour l'optimisation de l'instrument que pour la préparation de la chaîne de traitement de données. Il s'agit alors de véritables tâches de service qui doivent pouvoir être labellisées par l'INSU et obtenir des recrutements de type CNAP.

L'algorithmique (au niveau fondamental, comme dans la recherche d'algorithmes optimaux pour une architecture donnée) est un domaine scientifique particulièrement important, qui demande des compétences «pointues» en maths appliquées. Ces compétences sont très développées en France, où les mathématiques appliquées reposent sur un acquis historique remarquable. Toutefois les tentatives de collaboration se heurtent le plus souvent à une différence de cultures qui constitue un réel obstacle. On pourrait penser, dans cette situation, à la possibilité de postes interdisciplinaires qui permettraient à des chercheurs de maths appliquées d'être recrutés en astrophysique. Toutefois les différences dans l'appréciation du type de recherches à mener, l'évaluation des chercheurs, etc. sont telles qu'une telle opération est très délicate. La fermeture de l'ASCI, laboratoire interdisciplinaire créé pour tisser des liens entre communautés, illustre ces difficultés mais fait souhaiter d'autres efforts dans ce sens. De même la disparition prévue de la section 13 impliquera une redéfinition des frontières scientifiques, et devrait voir

arriver dans la communauté astrophysique des chercheurs spécialistes de la simulation numérique, en particulier hydrodynamique.

La solution proposée par les grands centres de calcul nationaux s'avère très intéressante. Ces centres tiennent une place importante dans l'organisation de la simulation scientifique : outre la mise à disposition de moyens lourds de calcul, disponibles actuellement dans les meilleures conditions de puissance disponible et d'accessibilité, et le soutien aux utilisateurs, ils jouent également un rôle très précieux dans la formation, par l'organisation de nombreux cours et écoles, et disposent de nombreuses ressources que nous pouvons utiliser. Ces centres savent recruter des jeunes issus de maths appliquées, qui mettent leurs compétences à la disposition de la communauté. Ainsi l'IDRIS a mis en place un IR, docteur en maths appliquées, pour apporter un soutien spécialisé aux « simulateurs » astrophysiciens. L'expérience est à ce stade très positive mais limitée par le temps dont dispose cet ingénieur : elle pourrait mener à suggérer le recrutement par l'INSU d'IR de profil comparable, localisés dans ces centres pour profiter de l'environnement qu'ils fournissent, et entièrement disponibles pour fournir un support mieux réparti que dans les quelques grands laboratoires spécialisés.

Face à ces difficultés la section 14 et l'INSU ont pris l'initiative de créer l'Action Spécifique sur la Simulation Numérique en Astrophysique (ASSNA). Son rôle est double : d'une part, structurer la communauté nationale des spécialistes de la simulation ; d'autre part, créer des conditions facilitant les efforts coopératifs nécessaires pour rassembler les efforts. Les premières rencontres organisées dans ce cadre (journées thématiques en Juin 2001 ; ateliers de travail organisés sur appel d'offres de l'ASSNA dans l'année 2002) ont montré l'étendue des besoins, mais aussi une réelle attente de la part des chercheurs spécialisés en simulation, très prêts à s'investir dans ces efforts. On ne peut espérer de retombées à très court terme, car les équipes existantes disposent chacune d'expérience, de thématiques scientifiques, de traditions, de bases de codes développés au fil des années, qu'il n'est ni possible ni souhaitable de faire converger de manière brutale. Notre principale direction de travail consiste dans la constitution de collaborations puissantes mobilisées autour de projets nouveaux, lancés sur des bases scientifiques et techniques ambitieuses pour développer des codes conçus dès l'origine pour être à la pointe des techniques existantes mais structurés de façon à permettre d'une part la plus grande versatilité (malgré les difficultés évoquées plus haut), d'autre part un progrès continu par ajout de modules divers enrichissant le spectre des applications possibles. Il pourra s'agir soit de développer des codes complets, soit des modules utilisables dans des contextes diversifiés, soit même de constituer une expertise collective sur l'algorithmique, les visualisations, etc. Ces collaborations seront nécessairement délocalisées, impliquant des chercheurs d'origines diverses, parfois internationales, et demanderont donc un soutien adapté (missions, au besoin harmonisation de l'équipement informatique...) qui ne pourra pas uniquement relever des programmes et GdR.

En retour l'ASSNA pourra servir à l'INSU de lieu d'expertise, permettant d'identifier les thématiques et les domaines dans lesquels des progrès sont possibles, et auxquels des supports adaptés pourront être attribués : moyens matériels, mais surtout humains, en jeunes chercheurs comme en ingénieurs disposant des compétences spécialisées nécessaires.