

## Stimuler le rêve Simuler le réel

### Le calcul haute performance à l'Irfu

**U**n aveugle demande à son guide : *Qu'est ce que le blanc ? Décris-moi quelque chose de blanc.*  
 Le guide : *Le cygne qui glisse sur le lac. Il est parfaitement blanc, avec un long col arrondi.*  
 L'aveugle : *Un col arrondi ? Comment donc ?*  
 Le guide imite avec son bras la forme du cou de cygne.  
 L'aveugle, effleurant le bras qu'on lui tend : *J'imagine le cygne, je perçois sa blancheur.*

Scintillations est le cou du cygne, le vecteur qui permet de proposer une image de ce que nous faisons, de ce que nous sommes. Même si l'aveugle-lecteur ne reçoit pas toute l'information, même si nous ne donnons pas les détails de nos recherches, il doit comprendre l'enjeu de nos sciences, notre dynamisme et notre fascination à révéler les mystères des lois fondamentales de l'Univers.

On me parlait du chant du cygne-Scintillations. Il a suffi d'une réunion avec les membres du comité éditorial pour que les doutes s'estompent, leurs idées scintillent déjà des histoires que nous allons vous conter.

Premier pas avec ce numéro 76 centré sur le calcul haute performance à l'Irfu. L'augmentation de la puissance de calcul a plusieurs impacts dans les secteurs de la recherche : plus vite, plus complet, plus fiable. Plus vite : elle nous permet de térafflopper, que dis-je de pétafflopper, d'aller tellement vite que le temps de la partie numérique ne compte plus. Plus complet : chaque avancée dans la puissance de calcul permet de raffiner nos descriptions jusqu'à atteindre les seules limites de notre imaginaire. Plus fiable : faire un calcul complet accroît la fiabilité des résultats, on peut alors se mettre à prédire.

Cette nouvelle puissance laisse envisager le calcul exact de la *chose pensée*. On en arrive à perdre la notion du réel et à oublier que la *chose pensée* n'est pas la *chose vue*, le bras du guide n'est pas le col du cygne. Pour les simulations de physique, cette différence entre les deux est primordiale car elle est la mesure de notre ignorance, elle est la place laissée pour les découvertes.

L'avancée du numérique permet de s'approcher d'un réel mais comment rendre compte de la beauté, de la poésie, de l'humour caché dans le regard des hommes, aveugles soient-ils ? Scintillations sera là, comme le guide de l'aveugle, pour tendre son bras polymorphe qui vous fera percevoir la variété des couleurs de l'Irfu.

Jean-Luc Sida

#### EN DIRECT de COAST

Des équations du Sap aux images du Lilas



#### Face à face

Romain Teyssier et Bruno Thooris

pages 6-7.

## Sommaire

### DOSSIER

- ▶ Un réseau pour QCD par Rémi Baron p. 2
- ▶ Les efforts d'Atlas par Zhihong Sun p. 3
- ▶ Tuer le temps mort par Shebli Anvar p. 4
- ▶ Expérience simulée, Découvertes contrôlées par Bruno Mansoulié p. 5
- ▶ Prenons le temps de la fusion par Cédric Simenel p. 8
- ▶ L'Irfu sort sa Grif par Jean-Pierre Meyer p. 9
- ▶ Activation fiable par Guy Cordero p. 10
- ▶ L'exacte dose par Sophie Cavata p. 12

### ACTUALITÉS



# Un réseau pour QCD

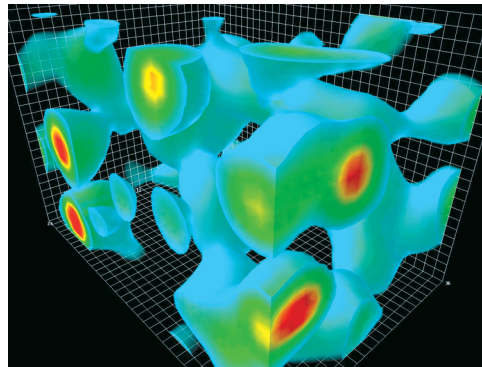
Par Rémi Baron



**Le noyau porte pratiquement toute la masse de l'atome. Il est constitué de nucléons, protons et neutrons, liés par l'interaction forte créée par les particules cachées au sein des nucléons, les quarks et les gluons. On connaît la théorie qui décrit et prédit cette dynamique: c'est la chromodynamique quantique, QCD pour *Quantum Chromo-Dynamics*, dont les fondateurs ont été récompensés par le prix Nobel de physique en 2004. Les progrès dans la formulation de QCD sur réseau, associés à l'augmentation de la puissance des ordinateurs, permettent enfin d'envisager la compréhension de la structure du nucléon.**

Pour la chromodynamique quantique tous les hadrons sont composés de quarks, les particules élémentaires de la théorie, et des messagers de la force, les gluons. Cette théorie ne compte que sept paramètres : une masse pour chacun des 6 types (ou saveurs) de quarks et une constante de couplage qui règle l'intensité de l'interaction forte.

La théorie présente deux régimes bien différents, un régime perturbatif et un régime non-perturbatif. Dans le régime perturbatif, la constante de couplage est faible, les quarks sont quasi-libres. On peut approximer le calcul exact par un développement limité en puissance de cette constante. Ce régime correspond aux premiers instants de notre Univers. Il est atteint dans les expériences à très haute énergie. A contrario, dans le régime non-perturbatif qui correspond à l'essentiel des situations rencontrées en physique nucléaire, les quarks



Hétérogénéité du champ de gluons dans le vide<sup>1</sup> de QCD, à un moment donné.

© Derek Leinweber, CSSM, University of Adelaide.

La puissance des ordinateurs et leur capacité de stockage étant limitées, la longueur d'une arête du réseau est typiquement de l'ordre de la taille d'un noyau, de 2 à 5 fm (1 fm=10<sup>-15</sup> m) pour une maille de moins de 0,1 fm. Pour accélérer la convergence des calculs, on limite le nombre de saveurs de quarks à 2 ou 3 et leurs masses sont plus lourdes que les masses mesurées. Même avec ces limitations, la simulation pour un seul

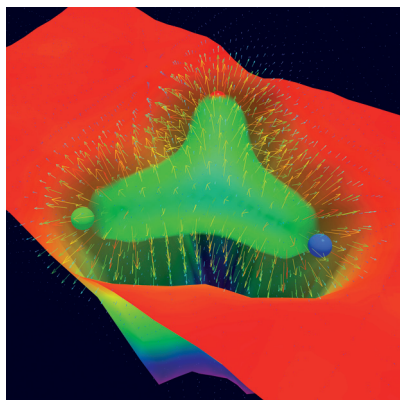
jeu de paramètres peut durer des mois sur un ordinateur térafloppique, pourtant 1000 fois plus puissant qu'un ordinateur personnel. On doit utiliser plusieurs jeux de paramètres pour, d'une part, estimer l'erreur due à la discrétisation et, d'autre part, extrapoler les résultats à la masse physique des quarks. Les résultats peuvent ensuite être confrontés avec l'expérience.

Nous avons récemment obtenu la masse du proton avec l'une des meilleures précisions au monde, 964±30 MeV. Un premier pas pour aller plus loin : le calcul de la répartition des quarks dans le nucléon. Pour cela, il faut des moyens de calcul encore plus importants. Comme tous les théoriciens de QCD, nous croisons discrètement les doigts pour que la loi de Moore continue d'être vérifiée et qu'enfin nous puissions comprendre la physique des hadrons sur la base de la chromodynamique quantique, la théorie qui régit le monde des quarks et des gluons.

Rémi Baron est un jeune physicien en thèse avec Pierre Guichon à l'Irfu/SPHN. Il travaille sur la structure du proton à l'aide de la QCD sur réseau (collaboration européenne ETMC).

(1) Le vide de QCD est l'état de plus basse énergie. Dans le cas de QCD, ce vide comprend les fluctuations de gluons de grande longueur d'onde qui abaissent cette énergie par rapport au vide «trivial».

Site à débattre : <http://www.physics.adelaide.edu.au/theory/staff/leinweber/VisualQCD/QCDvacuum/>



Les trois billes correspondent aux quarks d'un nucléon. Les gluons sont concentrés dans la zone verte, le tube de flux. Les flèches représentent le gradient de champ gluonique.

sont confinés par de multiples échanges de gluons et un développement limité n'a pas de sens. La seule approche systématique est de formuler la théorie en discrétisant l'espace et le temps sur une grille finie, le réseau. Ce passage du continu au discret permet la résolution numérique de la théorie sur ordinateur. Le très grand nombre de degrés de liberté impose l'utilisation de méthodes basées sur les probabilités. Vous venez d'entrer dans la chromodynamique quantique sur réseau, *Lattice QCD* (LQCD).

**Génération du vide de QCD : environ 10 millions d'heures CPU**  
**Calcul de la masse d'un hadron dans cet environnement : environ 500 000 heures CPU**  
**Stockage = 50 Teraoctets**  
**Existence d'une collaboration européenne de théoriciens de QCD (ETMC) utilisant des machines généralistes, par exemple la Blue-Gene P récemment installée à Orsay, et des machines spécialement conçues pour ces calculs comme les APENEXT que la France a financées en partie. La contribution de la France en quantité de calcul représente quelques pourcents des calculs LQCD de la collaboration.**



# Les efforts d'Atlas

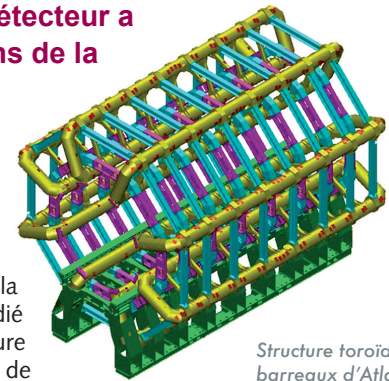
Par Zhihong Sun

Gros plan sur le maillage utilisé pour les calculs de la mécanique d'Atlas.

**Le mythologique Atlas se matérialise en un gigantesque multi-détecteur pour le LHC. Mythologique ou pas, une question demeure : quels sont les efforts du géant pour porter sa charge ? « Cela se calcule ! » vous diront les ingénieurs de l'Irfu à propos du détecteur du Cern. Cette simulation de la mécanique du détecteur a été indispensable pour le concevoir et pour maîtriser les déformations de la structure avec une grande précision.**

Le spectromètre à muons de l'expérience Atlas utilise un champ magnétique sans fer magnétisé pour courber les trajectoires des particules. Les physiciens et ingénieurs de l'Irfu ont imaginé une structure creuse, un grand toroïde à air afin de moins perturber les muons. Chaque trajectoire doit être mesurée avec une précision de 50 microns dans le cœur de cette gigantesque infrastructure occupant un volume de 20 mètres de diamètre sur 25 mètres de longueur. La structure mécanique d'Atlas, véritable colonne vertébrale du détecteur à muons, doit être modélisée en détail car elle conditionne de façon cruciale la position des objets qui y sont rattachés. Cette structure supporte en particulier des aimants supraconducteurs refroidis à 4,5 K, et c'est en opposition avec le froid des aimants que cette structure est nommée « structure chaude ».

Il n'est pas envisageable de se lancer dans la construction de cette cathédrale ultramoderne sans avoir développé des simulations élaborées du comportement mécanique de la structure. Nous avons ainsi étudié plusieurs versions de la structure chaude en utilisant les codes de calcul par éléments finis Castem et Ansys<sup>1</sup>. Dix années de travail ont permis d'aboutir à la version finalement adoptée pour la structure chaude, où la déformation totale calculée numériquement est inférieure à 28 mm. Le déplacement additionnel dû à la mise en fonctionnement des aimants serait de 2 mm.



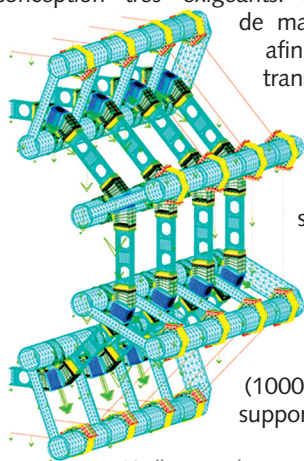
Structure toroïdale en barreaux d'Atlas et les huit aimants supraconducteurs (en vert).

La structure chaude est soumise à des impératifs de conception très exigeants. Tout d'abord, la quantité de matière doit être minimisée afin d'offrir la plus grande transparence possible pour les particules. D'autre part, la déformation globale de cette structure ne doit pas excéder 30 mm sous l'effet des champs magnétiques intenses (induisant un effort radial équivalent à 1200 tonnes), du poids propre de la structure (1000 tonnes) et des masses supportées (400 tonnes).

Que serait la simulation sans l'épreuve de l'expérience ? Lors du positionnement du toroïde, deux roues composées de 128 capteurs optiques disposés sur différentes zones du toroïde ont permis de suivre les déformations de la structure. Le bon accord entre nos calculs et les mesures, voir tableau, ont validé de façon définitive tous les choix que nous avons faits à travers les nombreux chemins qui partent de l'idée du physicien jusqu'à la réalisation pratique de l'expérience.

Zhihong Sun est ingénieur chercheur au Service d'ingénierie des systèmes de l'Irfu. Elle fut l'architecte mécanique de la structure chaude d'Atlas. Elle est aujourd'hui responsable de nouveaux projets pour la physique nucléaire et l'astrophysique.

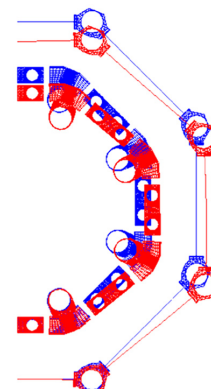
(1) Castem et Ansys sont des codes de calcul pour l'analyse de structures par la méthode des éléments finis. Castem a été développé par le Département mécanique et technologie (DMT) du CEA.



Maillage en éléments finis de la structure chaude d'Atlas.

	Déplacements calculés	Déplacements mesurés
Déplacement vertical global sans les détecteurs	16 mm	17 mm
Déplacement vertical global avec les détecteurs	26 mm	28 mm

Déformation de la structure chaude sous l'action du poids d'Atlas.



2 heures de CPU sur PC (Processeur Intel Pentium 4, CPU 1,5 GHz, RAM 2 Go) pour un calcul linéaire. Le temps d'un calcul non linéaire le plus détaillé est autour de 72 heures.



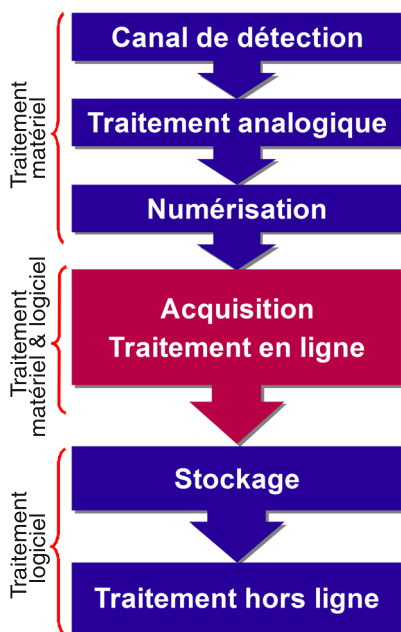
# Tuer le temps mort

Par Shebli Anvar



La carte d'électronique front-end d'Alice (photo Cern).

**Quelle mauvaise surprise si votre ABS, piloté par l'ordinateur high-tech de votre voiture, mettait quelques secondes pour synchroniser votre freinage d'urgence. De plus en plus, les ordinateurs prennent des décisions en temps réel. L'informatique « temps réel » constitue à elle seule un domaine des sciences de l'ingénieur, à la pointe de l'électronique et de l'informatique. Les spécialistes de l'Irfu adaptent ce savoir-faire aux besoins de la physique des infinis.**



Vue synoptique des prises de données dans une expérience de physique. Excepté le traitement hors ligne, toutes ces étapes peuvent aujourd'hui être traitées en temps réel.

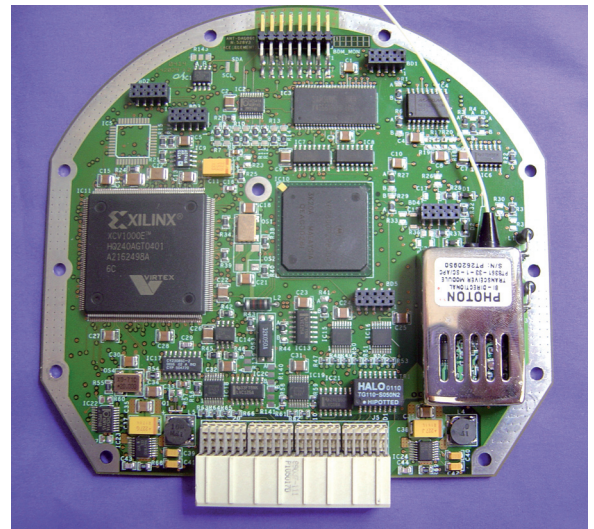
Les expériences de physique reposent sur une chaîne de mesure qui suit toujours la même séquence. Le phénomène physique est tout d'abord traduit en signal électrique à l'aide d'un capteur. Le signal subit alors un traitement électronique analogique avant d'être numérisé, c'est-à-dire transformé en nombres. Les données peuvent subir un traitement en vol pour calculer certaines grandeurs ou appliquer des filtres. Les données validées sont stockées. Afin de maximiser le temps effectif de mesure, il est nécessaire que ces étapes soient effectuées en temps réel. Dès que l'on veut faire des tris dans les données brutes, on atteint un niveau élevé de complexité dans les algorithmes. Malgré cela, il faut assurer la synchronisation entre l'exécution du logiciel et le procédé physique

tout en utilisant un minimum de ressources. À tout moment, il faut aussi s'assurer de la bonne gestion des ressources du système : mémoire, temps d'exécution, contrôle des capteurs et actionneurs, synchronisations, dissipation thermique... Pour satisfaire ces exigences, le défi consiste à introduire le maximum d'intelligence dans les programmes de traitement de données tout en respectant les contraintes temporelles du processus physique qui est à l'œuvre. Cette « intelligence » aboutit à son tour à du logiciel complexe dont le développement et la maintenance posent en eux-mêmes des problèmes d'ingénierie. C'est toute la difficulté du génie logiciel que de prendre en charge cette complexité.

Cette difficulté se gère en structurant les algorithmes en couches et en modules. On décompose le problème en sous-problèmes plus simples, organisés en modules, qui communiquent simplement entre eux. On peut aussi utiliser une architecture en couches, des couches hautes utilisant les services de couches basses. L'ensemble est traité par une multitude de processeurs fonctionnant en parallèle et interconnectés par un réseau.

Le savoir-faire en électronique de l'Irfu et les moyens

informatiques actuels permettent de développer de telles acquisitions avec prétraitement des données. L'une d'elle se trouve à 2500 mètres sous la mer, non loin du port de Toulon, sur l'expérience Antares. L'ensemble du logiciel, acquisition et déclenchement, est une application distribuée<sup>1</sup> sur un réseau de quelques 300 processeurs embarqués<sup>2</sup> et une trentaine de stations de travail à terre. Chaque processeur, de type PowerPC, ne consomme pas plus de 1 watt. Le flux de données produites en environnement embarqué est de 6 Gb/s en fonctionnement nominal et peut supporter jusqu'à 15 Gb/s (1 gigabit, correspond à un milliard de bits).



Carte d'acquisition embarquée d'Antares sur laquelle tourne un logiciel d'acquisition et de slow-control.

Cette acquisition peut traiter 250 000 événements par seconde, un nombre impressionnant au vu de la rareté des événements recherchés dans cette expérience (voir *Scintillations* N° 33) ; il est vrai que l'on n'aimerait pas rater l'un des rares neutrinos ayant traversé la Terre qui s'arrêtera dans le détecteur.

Shebli Anvar est ingénieur-chercheur à l'Irfu/Sédi/Lilas. Il dirige le Laboratoire d'ingénierie logicielle pour les applications scientifiques et assure le développement de systèmes d'acquisition et traitement en temps réel pour les trois physiques de l'Irfu.

(1) Un système est dit distribué lorsqu'il est composé de modules pouvant s'exécuter en parallèle.

(2) Un système est dit embarqué lorsqu'il est intimement lié à un procédé physique et qu'il présente des contraintes fortes en termes d'encombrement, de consommation ou d'autres ressources.





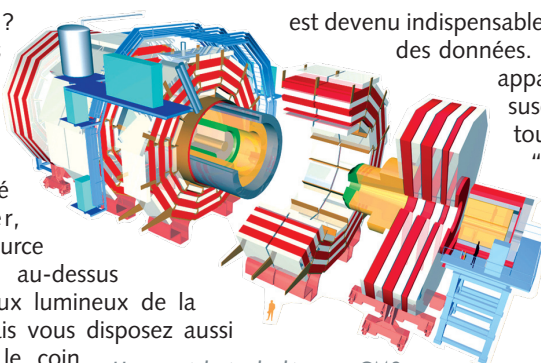
# Expérience simulée Découvertes contrôlées

Par Bruno Mansoulié

Détecteur Alice (photo Cern).

**Les simulations qui accompagnent les expérimentations de physique jouent un rôle essentiel dans l'élaboration des détecteurs et la préparation de l'analyse des données. Bien que très précises, le hasard n'en est pas absent car la physique quantique qui impose ses lois dans le monde des particules est intrinsèquement probabiliste. Ces simulations produisent des données virtuelles très proches de ce que prédisent les théories, ce qui permet de les mettre à l'épreuve des faits.**

**D**e quoi est-il question ? Supposons que vous souhaitiez aménager votre salle à manger : vous désirez que l'éclairage au centre de la table ait une intensité donnée. Pour commencer, vous pensez à une seule source de lumière, une suspension au-dessus de la table. Connaissant le flux lumineux de la lampe, le calcul est facile. Mais vous disposez aussi d'un lampadaire placé dans le coin de la pièce, dont la lumière atteint la table, diffusée par le plafond et les murs. Les choses se corsent. Après avoir noirci de nombreuses pages, vous réalisez que le plafond et les murs ne sont ni réfléchissants comme des miroirs, ni de parfaits diffuseurs. Toutes les intégrales sont à refaire ! La solution numérique s'impose. Vous écrivez un programme qui génère les rayons lumineux, suit leur trajet et calcule son devenir en fonction des obstacles rencontrés. Il ne reste plus qu'à compter le nombre de rayons qui arrivent sur la table.



Une vue éclatée du détecteur CMS (Compact Muon Solénoïd). L'échelle est donnée par le petit bonhomme orange ! (© Cern)

est devenu indispensable pour la préparation et l'analyse des données. Les années quatre-vingt ont vu apparaître des logiciels spécialisés susceptibles d'être employés par toutes les expériences, comme les "générateurs d'événements".

Avec le temps, théoriciens et expérimentateurs ont incorporé dans ces programmes la totalité de la physique des particules connue et la plupart des possibilités théoriques.

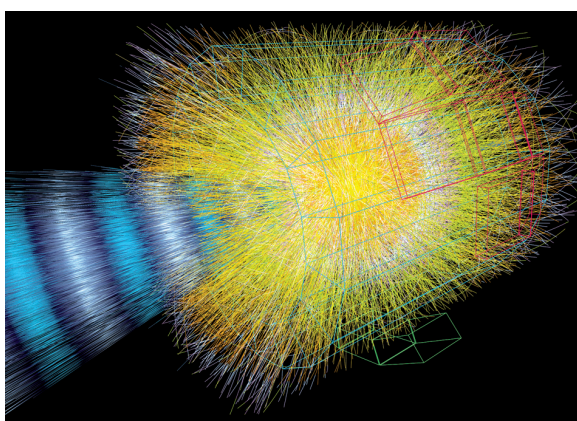
Un autre programme succède à ces générateurs et simule le comportement des particules

dans le détecteur. La description et les particularités de l'expérience sont écrites par les utilisateurs ce qui représente un effort très important, de l'ordre du million de lignes de code pour une grosse expérience.

Avec de tels outils, il est possible de générer des événements simulés dans le format des vraies données et de les passer dans la chaîne de reconstruction des événements réels. Le physicien est ainsi capable d'évaluer précisément la performance de l'appareillage et des algorithmes d'analyse.

On peut alors jouer au chat et à la souris. Une équipe se charge de générer un lot d'événements simulés qui contient des signaux de « nouvelle physique ». Ce lot est transmis aux équipes chargées de l'analyse sans leur dévoiler la nature des signaux cachés. Il arrive que la souris nargue le chat et que les physiciens découvrent un signal... là où il n'y en a pas ! On corrige alors les erreurs que cette procédure a mis en lumière. Ces travaux permettent de s'assurer de la capacité du détecteur et de l'analyse à explorer les limites de nos connaissances, à être prêt à découvrir le nouveau monde de la physique du LHC.

Bruno Mansoulié, physicien des particules à l'Irfu/SPP, est à la tête du groupe du SPP participant à Atlas, l'une des deux expériences généralistes auprès du LHC.



Une collision plomb-plomb simulée dans le détecteur Alice. Il faut 20 minutes de CPU pour calculer 1 événement. (© Cern)

Les rayons lumineux sont générés au hasard afin d'apporter une réponse numérique quel que soit le problème posé. Le hasard intervient aussi dans les probabilités de diffusion sur les différents obstacles et pour tenir compte de la nature quantique des particules.

Dès les années soixante-dix, avec la complexification des expériences, le programme de simulation Monte Carlo

20 minutes CPU et 10 MO de stockage par événement ce qui conduit à 200 millions d'heures de calcul et 5 pétaoctets ( $10^{15}$  Octets) de stockage pour les manipulations LHC. Calculs réalisés sur la grille LCG, voir article de J.P Meyer dans ce numéro.



# COAST, des équations du S

Etonnant de voir comment la complémentarité crée de la beauté. COAST en astrophysique et d'ingénieurs en informatique. Elle s'est développée sur des calculs. COAST transforme le savoir en image.

Simulation du milieu interstellaire avec Heracles

## COAST vu du SAP

(1) Opacité : capacité des matériaux à s'opposer au passage de la lumière et, plus généralement, des ondes électromagnétiques.

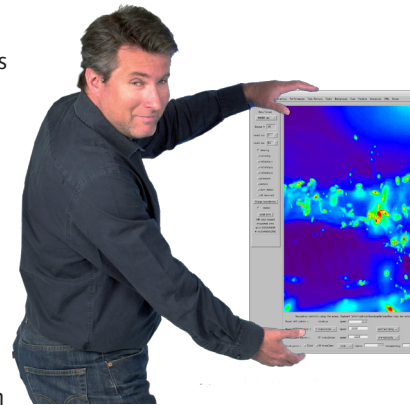
Le programme COAST (COmputational ASTro-physics) a été lancé en 2005 à l'Irfu dans un contexte favorable au calcul scientifique. L'objectif est de modéliser des phénomènes astrophysiques complexes, afin de confirmer les théories actuelles sur la physique des astres et de préparer les futures observations astronomiques. Après l'instrumentation et l'observation, la simulation est la troisième voie de recherche en astrophysique à l'Irfu.

L'accès aux machines de dernière génération permet de réaliser des simulations inimaginables sur les calculateurs précédents, des calculs sur MareNostrum à Barcelone au challenge Ramses au CCRT, et bientôt sur le BlueGene/P de l'Idris. COAST qui a utilisé un million d'heures de CPU par an sur les centres nationaux de calculs parallèles, est à la pointe des développements en calcul haute performance.

La simulation numérique existait au SAP bien avant 2005. La création d'une équipe mixte d'astrophysiciens du SAP et d'ingénieurs du Sedi/Lilas a permis de rationaliser et d'homogénéiser le pré et post-traitement des codes existants en développant des outils spécifiques comme la base de données Odalisc d'opacités<sup>1</sup> pour la

modélisation des plasmas laser et astrophysiques ou le logiciel SDvision de visualisation multi-dimensionnelle.

La création d'un pôle de simulation numérique a aussi permis de mettre en commun des compétences en astrophysique, en analyse numérique, en calculs parallèles et en informatique. L'équipe dépasse maintenant les 25 membres, permanents ou temporaires, avec une proportion de 2/3 SAP et 1/3 Sédi/Lilas.

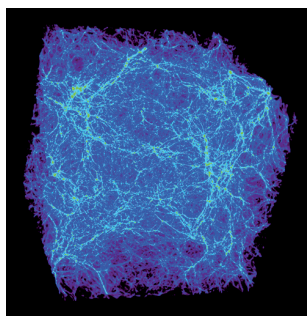


Romain Teyssier, PI du projet, responsable du programme de simulation numérique au SAP.

Les principales études d'astrophysique qui ont bénéficié du programme COAST sont présentées dans la galerie ci-dessous : cosmologie, physique stellaire, disques protoplanétaires, milieu interstellaire.

## Cosmologie

Le code Ramses permet l'étude des structures de l'Univers à grande échelle ainsi que la formation des galaxies. Il s'agit d'un code tri-dimensionnel d'hydrodynamique pour de la matière soumise à la gravitation. Nous avons effectué la plus grande simulation jamais réalisée de la formation des structures de l'Univers, dans le cadre du Projet Horizon, soutenu par l'Agence nationale pour la recherche. Cette simulation s'est appuyée sur le nouveau supercalculateur Bull du

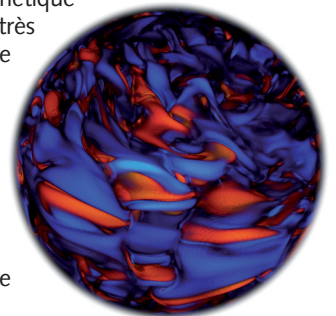


Visualisation avec SDvision de la densité du gaz baryonique obtenue avec la simulation cosmologique Horizon ayant utilisée 2048 processeurs du supercalculateur MareNostrum de Barcelone.

Centre de calcul recherche et technologie (CCRT). Les premières images permettent une exploration virtuelle de l'Univers avec une précision jamais atteinte. Il a fallu deux mois de calcul sur 6144 processeurs pour générer cet univers de 70 milliards de particules en interaction. Ces travaux vont permettre d'établir l'équation d'état de la matière noire et de mieux comprendre le moment où l'Univers a commencé à se structurer.

## Physique stellaire

Les étoiles sont des grosses sphères de gaz chaud. Elles sont turbulentes avec de nombreux phénomènes de convection, tournent sur elles-mêmes et baignent dans un champ magnétique auto-induit. Il est très difficile de les décrire en prenant en compte tous ces phénomènes physiques et leurs interactions non-linéaires, sur toutes les échelles spatio-temporelles rencontrées dans la vie d'une étoile.



Le code ASH (Anelastic Spherical Harmonic) calcule l'évolution des fluides stellaires dans des coquilles en géométrie sphérique.

ASH a déjà utilisé plus de 2000 processeurs simultanément pour calculer la turbulence et le magnétisme solaire. Le projet européen Stars2, accepté en décembre 2007, est axé sur la modélisation 3D de la dynamique dans le Soleil.

Visualisation avec SDvision de la composante azimutale du champ magnétique dans la zone de convection stellaire obtenue avec le code de simulation ASH (positive en rouge, négative en bleu).

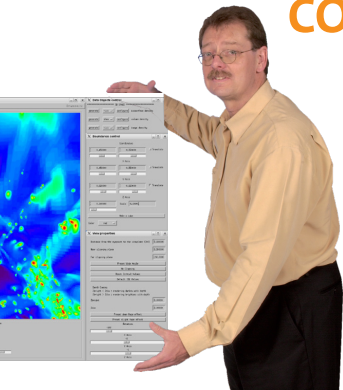


# S'Ap aux images du Lilas

Par Romain Teyssier et Bruno Thooris

SAp, Computational ASTrophysics, est la collaboration de théoriciens appuyée par la nécessité d'outils adaptés à la visualisation des objets numériques et nous rapproche de la réalité de l'Univers.

## COAST vu du Sédi



Bruno Thooris, responsable des développements informatiques de COAST au Sedi/Lilas.

ils sont liés à l'évolution actuelle de la technologie et donc très attractifs pour les ingénieurs et les étudiants. Le passage des codes d'astrophysique sur les nouvelles machines parallèles a demandé et demandera à chaque fois un effort d'adaptation et d'optimisation; la génération

Les problèmes de simulations massivement parallèles issus des besoins du laboratoire théorie et modélisation du SAp offrent aux ingénieurs du Laboratoire d'ingénierie logicielle pour les applications scientifiques (Lilas) du Sédi un vaste champ d'activités en informatique : visualisation, bases de données, implantation, parallélisation et optimisation de codes, développement d'outils informatiques. Ces sujets entrent directement dans les missions du Lilas,

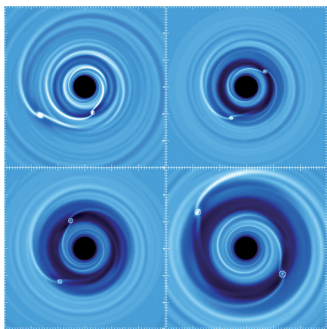
de volumes de données toujours plus énormes apporte aussi des problèmes nouveaux pour la visualisation. Développé pour le 3D, le code SDvision est devenu l'outil d'analyse commun au projet, avec des techniques de visualisation de pointe et la possibilité de créer des films dès la sortie des résultats numériques.

La complémentarité des ingénieurs du Lilas permet d'apporter une compétence informatique dans les projets français ou européens liés au programme COAST : c'est le cas du développement de la base de données Odalisc dans le cadre du projet Sinerghy, et des réalisations informatiques pour les projets Horizon, Magnet et Stars2. Ces collaborations avec des laboratoires extérieurs sont pour l'Irfu une possibilité de partager et de diffuser nos réalisations. Les codes du SAp sont aussi pour le Lilas une source de sujets de R&D comme par exemple le portage sur des processeurs GPU (processeurs graphiques des PC) ou Cells (processeurs de la Playstation3) qui nous oblige à être très attentifs à l'évolution des techniques de calculs.

## Disques protoplanétaires

La récente découverte de nombreux systèmes planétaires autour d'étoiles proches a mis en évidence des propriétés surprenantes : une grande proportion des planètes découvertes semble s'être considérablement rapprochée de leur étoile centrale après leur formation. Ce rapprochement, appelé migration planétaire, a façonné des systèmes planétaires très originaux.

Comprendre la variété des systèmes planétaires implique de bien comprendre les phénomènes de migration, qui correspondent à un effet de marée entre une protoplanète et le disque protoplanétaire à partir duquel elle se forme. Pour ce faire, deux codes ont été développés au SAp : Fargo (code 2D) et Jupiter (code 3D). Ce sont des codes hydrodynamiques, qui décrivent, sur une grille, l'évolution du gaz constituant la nébuleuse protoplanétaire. Ils incluent les effets gravitationnels de l'étoile centrale et d'un nombre arbitraire de planètes immergées.



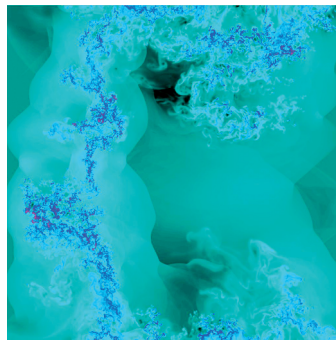
Evolution conjointe de deux protoplanètes géantes (respectivement d'une masse de Jupiter et d'une masse de Saturne) immergées dans un disque protoplanétaire (simulation réalisée avec FARGO).

## Milieu interstellaire

Le milieu interstellaire est la matière qui, dans une galaxie, existe entre les étoiles et leur environnement proche. La densité de ce gaz est extrêmement ténue, de 10 à 100 particules par décimètre cube.

L'étude, au SAp, de ce milieu utilise le code Heracles, un code tridimensionnel qui traite l'hydrodynamique et les transferts d'énergie dans le milieu via les ondes électromagnétiques (transfert radiatif). Ce code est

aussi utilisé pour interpréter des expériences de chocs radiatifs effectuées par lasers ainsi que pour la modélisation des effets radiatifs dans les jets moléculaires d'étoiles jeunes.



Carte de densité d'une simulation 2D du milieu interstellaire, visualisation réalisée avec SDvision

Pour en savoir plus : <http://irfu.cea.fr/Projets/COAST>



# Prenons le temps de la fusion

Par Cédric Simenel



*Vue d'artiste de la fusion par IGMac*

**La fusion de deux noyaux est un processus bien connu mais mal compris. Pour l'interpréter, il faut comprendre la physique nucléaire depuis la structure des noyaux jusqu'à leur évolution lors d'une collision. Dans une des théories quantiques les plus modernes, appelée dynamique microscopique, le système est décrit comme un ensemble de nucléons en interaction, évoluant avec le temps.**

**D**eux noyaux atomiques fusionnent lorsqu'ils sont suffisamment proches pour former un nouveau noyau, composé de l'ensemble des nucléons du système. Comment évolue ce processus avec la masse totale des noyaux, avec la composition des noyaux cible et projectile ? La forme des noyaux influence-t-elle la probabilité de fusion ? Ce phénomène conserve bien des secrets et, pour le comprendre, il faut démêler la multitude d'aspects susceptibles de l'influencer.

A la fin des années 70, les théoriciens développent des programmes informatiques de dynamique microscopique permettant de suivre l'évolution de chaque nucléon au cours de la collision. La tâche est ardue car le noyau obéit aux lois de la mécanique quantique. L'état d'un nucléon n'est pas décrit par une position et une vitesse comme en mécanique classique, mais par une fonction d'onde donnant la probabilité de trouver le nucléon en tel ou tel point de l'espace comme représentée sur la figure 1.

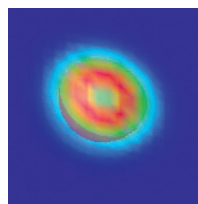
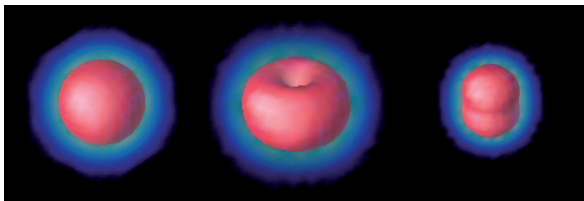


Figure 1 : Calcul microscopique des fonctions de probabilité de présence de nucléons. La quatrième figure montre une coupe, mettant en évidence un déficit au centre du noyau.

Nous sommes ainsi face à un problème à N corps quantique, trop complexe pour être résolu exactement. L'approximation usuelle est de considérer que les nucléons ne subissent qu'en moyenne l'interaction des autres nucléons plutôt que de traiter l'interaction de chaque paire de nucléons. Cela conduit à la théorie Hartree-Fock dépendante du temps, proposée par Dirac en 1930, mais ce n'est qu'en 1997 que les premiers calculs en 3 dimensions ont été réalisés par Paul Bonche du SPHT.

Une équipe du SPHn étudie la fusion de noyaux lourds et fournit, par exemple, un appui théorique à des expériences au Grand accélérateur national d'ions lourds (GANIL). La collaboration s'est intéressée au système le plus lourd qu'il soit possible de réaliser sur Terre, obtenu

en projetant deux noyaux d'uranium l'un contre l'autre. On sait que le système formé n'est pas lié par l'interaction forte, mais combien de temps survit-il ? La puissance des ordinateurs du Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) du CEA nous permet d'en faire une estimation. La fusion des deux uraniums ne dépasse pas  $3.10^{-21}$  s et nous observons un phénomène surprenant lorsque le système se sépare ; l'apparition d'un troisième fragment, voir figure 2.

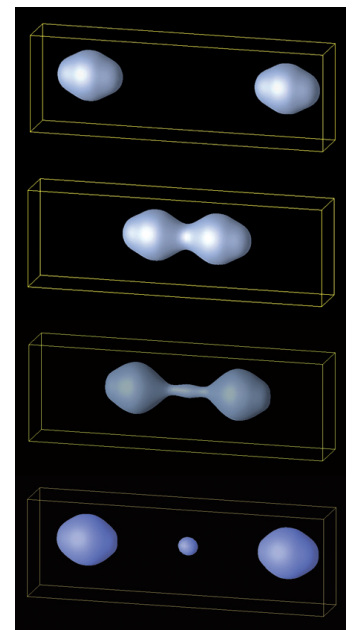


Figure 2 : calcul montrant l'évolution de deux  $^{238}\text{U}$  en collision. De gauche à droite, les noyaux se rapprochent, commencent à s'interpénétrer, puis se séparent en laissant un troisième fragment entre eux.

Le problème a un intérêt au delà de la physique nucléaire car le système est suffisamment chargé pour créer des paires électron-positron à partir du vide ... si la fusion des deux noyaux lourds dure suffisamment longtemps. Ces excitations du vide de l'électrodynamique quantique sont prédites par la théorie. Aux expériences de confirmer ou d'infirmer ces prédictions.

Cédric Simenel, physicien de l'Irfu/SPHn, travaille sur la modélisation de réactions nucléaires à basse énergie, notamment dans le cadre du projet Spiral2.

**10h de CPU sur «mercure» au CCRT**  
Il s'agit d'un cluster composé de 8 nœuds de calcul vectoriels équipés de 8 processeurs SX-8R. Les processeurs vectoriels SX-8R sont cadencés à 2 GHz et délivrent 35.2 GFlops.





# L'Irfu sort sa Grif

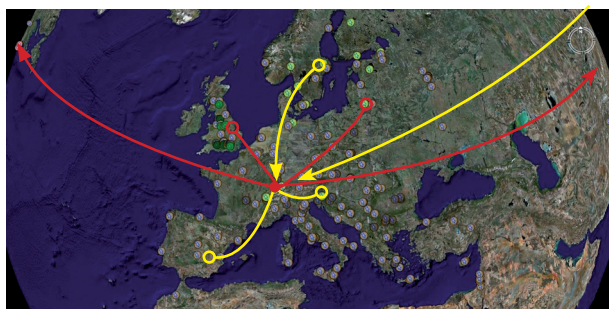
Par Jean-Pierre Meyer

Salle de stockage au Cern (© Cern)

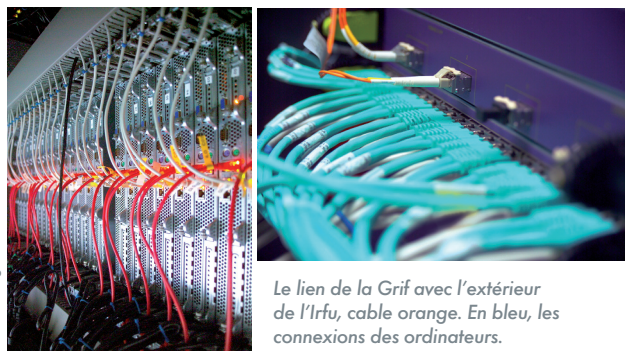
L'idée a germé au début du siècle d'un outil de calcul regroupant tous les ordinateurs du monde. Elle voit aujourd'hui le jour sous le nom de « grille ». Des ressources de calcul fortement hétérogènes sont agrégées en un super ordinateur virtuel de taille planétaire. Ce concept, rendu possible par la rapide montée en puissance des réseaux de télécommunication, offre aux utilisateurs un accès aux importantes ressources de calcul et de stockage nécessaires pour les expériences à venir.

Dès le début de l'aventure, l'Irfu s'est intéressé à ce nouvel outil en participant aux différents projets européens prototypes (DataGrid, Egee<sup>(1)</sup>). En mai 2008, l'Irfu s'apprête à s'engager dans la troisième phase d'Egee qui mettra en place la première architecture pérenne de grille européenne.

cœurs (50% pour l'ISC-PIF) et plus de 500 téraoctets de stockage. Une collaboration étroite entre le réseau de télécommunication français Renater<sup>(5)</sup>, l'IN2P3 et la DSI au CEA nous permettra dès mi-2008 de mettre en place un réseau privé reliant les 6 sites à 10 Gbits/s, étape indispensable pour une mutualisation efficace des nos ressources.



La grille en action, le Cern distribuant des tâches aux centres nationaux et à quelques centres régionaux. En rouge, les flux sortants du Cern à un moment donné, en jaune, les flux entrants.



© CEA, Imag/Irfu, Alain Porcher & Jean-Luc Sida

Le lien de la Grif avec l'extérieur de l'Irfu, câble orange. En bleu, les connexions des ordinateurs.

Les nouveaux ordinateurs de la Grif connectés en réseaux.

Depuis quelques années, la physique des particules joue un rôle moteur dans le développement des grilles de calcul. La grille créée pour le LHC, nommée LCG, « LHC Computing Grid » se prépare à exploiter les dizaines de pétaoctets<sup>2</sup> de données produites par les quatre expériences à partir de 2008. Elle est organisée à l'échelle de la planète en centres régionaux et nationaux, le tout chapeauté par le centre de calcul du Cern. Le Cern assure le stockage et la distribution des données brutes, alors que onze centres nationaux gèrent le traitement et la distribution des données reconstruites. Enfin, l'analyse et la simulation des données sont confiées à 64 centres régionaux. L'Irfu a contribué fortement à la grille de calcul en participant au financement du centre national de Lyon, indispensable à la reconstruction des données et en s'engageant, pour l'analyse et les simulations, dans le projet régional Grif (voir aussi Scintillations n°73).

Le site Grif à l'Irfu, équipé aujourd'hui de 350 cœurs et 100 Téra-octets de stockage devra doubler ses ressources chaque année afin de suivre l'évolution des besoins des expériences Atlas, CMS et Alice dans lesquelles nous sommes engagés. Après nos prouesses techniques dans la réalisation des expériences, nous nous devons d'être présents au rendez-vous de l'analyse des données, et cela ne se fera pas sans Grif.

Jean-Pierre Meyer est physicien des particules à l'Irfu/SPP sur le projet Atlas. Il est responsable scientifique de l'ensemble du projet GRIF et chargé de la mission « calcul » à l'IRFU.

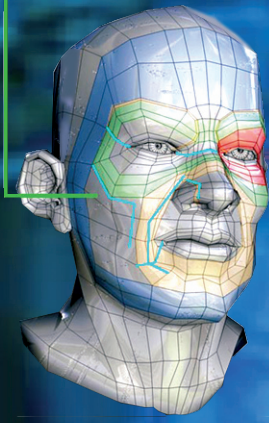
## ACTUALITÉS

### Création du Centre national « Jacques Louis Lions » de calcul haute performance

Le CEA et le CNRS créent le Centre national « Jacques Louis Lions » de calcul de haute performance issu du rapprochement entre les deux centres de calcul intensif de l'Essonne : le CCRT du CEA, et l'Institut du Développement et des Ressources en Informatique Scientifique - Idris du CNRS. Une « maison de la simulation et de la modélisation » va aussi voir le jour sur le Plateau de Saclay pour l'accueil et la formation des scientifiques.

- (1) Egee : Enabling Grids for E-Science
- (2) Pétaoctets : un million de giga octets  
Teraoctets : un millier de giga octets
- (3) APC (AstroParticule et Cosmologie), IPNO (Institut de Physique Nucléaire d'Orsay), Irfu, Lal (Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire), LLR (Laboratoire Leprince-Ringuet), LPNHE (Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Energies)
- (4) ISC-PIF : Institut des Systèmes Complexes d'Ile de France.
- (5) Renater : Réseau National de Télécommunications pour la Technologie, l'Enseignement et la Recherche





Tout n'étant pas mesurable, la précision des simulations conditionnent la sécurité des individus. Que ce soit pour calculer la bonne dose d'irradiation d'une tumeur, tous les résultats prédictifs

Piscine de réacteur (© CEA) et maillage d'une tête.

## Activation fiable par Guy Cordero

(1) MCNPX : Monte Carlo N-Particle eXtended, code (probabiliste) permettant de simuler l'interaction des particules avec les matériaux. Code développé au Laboratoire National de Los Alamos aux États-Unis (LANL). Il existe d'autres programmes équivalents comme P-Hits développé au Japon.

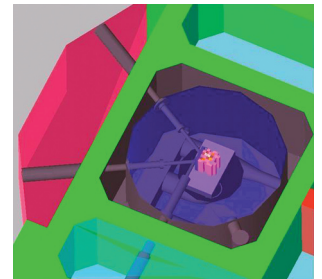
(2) Cinder : Code d'évolution des matériaux et de décroissance des radionucléides (LANL).

**A**u Senac, les ingénieurs mènent des études préliminaires au démantèlement des réacteurs expérimentaux du CEA afin de gérer au mieux les différentes parties des réacteurs en fin de vie. Ils aident aussi à la conception de nouvelles installations mettant en œuvre des accélérateurs de particules. Pour cela, ils utilisent différents codes de calculs utilisés dans les expériences de physique comme MCNPX<sup>1</sup>, pour calculer l'interaction des particules dans la matière, et Cinder<sup>2</sup>, pour l'activation des matériaux après les décroissances radioactives. Hors de question d'utiliser les programmes avec une confiance aveugle. Chaque section efficace, dont l'importance est jugée critique vis-à-vis du résultat attendu, est étudiée dans le plus grand détail d'un point de vue expérimental et bibliographique. Les scénarios sont aussi discutés pour définir une situation majorante afin de s'assurer une marge de sécurité, tout en restant réaliste pour définir la juste filière d'évacuation des déchets.

Pour les travaux de démantèlement, les études du Senac permettent de caractériser les matériaux soumis à l'activation, de prévoir les différents types de conditionnement nécessaires à l'évacuation des déchets et de définir les épaisseurs de béton à démolir en vue de l'assainissement final. Vous aurez aussi affaire à eux

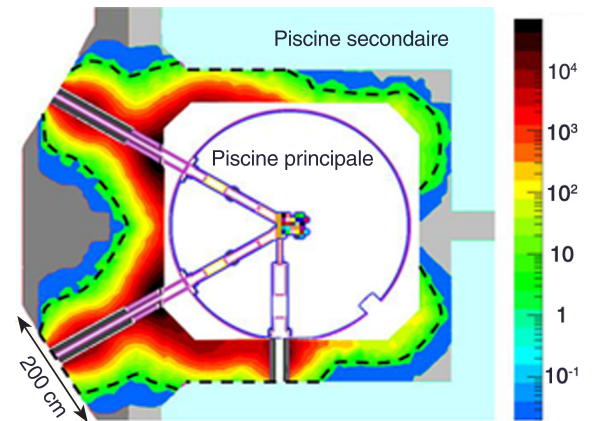
pour calculer les protections radiologiques nécessaires pour votre future machine ou vos salles expérimentales.

Modélisation en trois dimensions du réacteur Siloe. On raffine les détails de la structure au fur et à mesure que l'on s'approche du cœur.



On peut voir sur la figure ci-dessous l'évolution de l'activité

massique dans les structures en béton du bloc réacteur de Siloe et la limite (ligne en pointillés) au-delà de laquelle les bétons devront être traités comme déchets radioactifs. Le reste sera démolé et géré comme des déchets conventionnels.



Calcul de l'activation des bétons, en becquerels par gramme, à proximité du cœur. Il permet de définir le degré d'activité des différentes zones et d'organiser le démantèlement du réacteur.

## ACTUALITÉS



Frédéric Marie (à droite) et Ayméric van Lauwe (à gauche), l'auteur des calculs illustrant cet article, discutent l'activation de Siloe.

Frédéric Marie, 41 ans, physicien nucléaire de formation, vient prendre la direction du Senac en remplacement de Guy Cordero qui part à la retraite. Frédéric fait ainsi son retour à l'Irfu après trois années passées comme chargé de la mission « énergie nucléaire » à la Direction générale de la recherche et de l'innovation du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Selon Frédéric, « le Senac est un excellent moyen de valoriser les techniques et le savoir acquis par les physiciens de l'Irfu. C'est une des belles vitrines de l'Institut. » Il sera particulièrement vigilant « au maintien des connaissances et des outils. ». Il compte pour cela sur les relations étroites entretenues avec l'ensemble des chercheurs de l'Irfu. Nous sommes contents de te revoir parmi nous et te souhaitons beaucoup de réussite dans cette nouvelle fonction.



Guy Cordero dirige le Senac depuis 2006 (voir Scintillations N°74) après avoir participé à l'assainissement radioactif et aux démantèlements de plusieurs installations nucléaires.

Quelques jours de CPU pour le calcul ci-dessus.  
Cluster de 10 nœuds bi-processeur dual core.  
Moyens propres de l'Irfu, communs au Senac et au SPHN



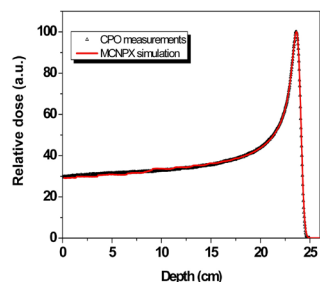
Les simulations numériques prennent une importance cruciale quand elles permettent de prévoir le démantèlement d'installations nucléaires ou pour les calculs de dose. Les moyens de calculs de l'Irfu sont mis en œuvre pour avoir des résultats précis et fiables.

## L'exacte dose par Sophie Kerhoas Cavata

La protonthérapie permet d'irradier avec précision, au moyen d'un faisceau de protons, des tumeurs situées à proximité d'organes sensibles. La modélisation de la distribution de dose, primordiale pour délivrer le traitement, fait appel aux modèles et aux savoirs utilisés à l'Irfu.

Aujourd'hui, la radiothérapie est incontournable en oncologie. Elle entre dans le tiers des traitements. Pourquoi se lancer dans l'utilisation de protons qui réclament un accélérateur plutôt que les habituelles sources gamma ? Photons et protons ont un effet identique sur les cellules, le proton a cependant des caractéristiques balistiques intéressantes car il dépose peu d'énergie le long de sa trajectoire pour s'arrêter en un point où il délivre la majorité de son énergie.

On appelle ce point le pic de Bragg. En choisissant et en modulant correctement l'énergie des protons incidents, on peut ainsi irradier la tumeur tout en protégeant les organes situés à l'arrière et sur les bords. On parle alors de radiothérapie conformationnelle. L'irradiation par une source gamma offre difficilement un tel pilotage, figure de droite.

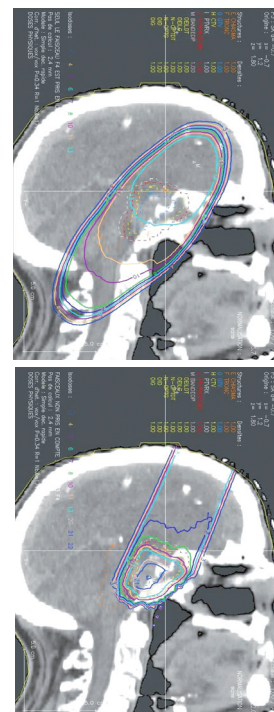


Distribution de la perte d'énergie d'un proton le long de son parcours.

Bien que cela paraisse assez simple sur le principe, la mise en œuvre est sophistiquée car il faut obtenir une distribution de dose homogène, non pas en un seul point mais dans tout le volume tumoral. Au CPO<sup>1</sup>, la modulation du pic de Bragg s'obtient en intercalant dans le faisceau un compensateur et un collimateur, pièces conçues sur mesure pour le patient, qui permettent d'ajuster la profondeur d'irradiation et de protéger les tissus situés latéralement.

Ces nouvelles techniques de hadronthérapie nécessitent l'emploi d'un accélérateur. Au CPO, il s'agit d'un ancien accélérateur linéaire qui servait à la recherche en physique

Les différents niveaux d'activité au voisinage de la tumeur, pour des irradiation avec des photons (en haut) et avec des protons (en bas). La protonthérapie permet d'obtenir des doses bien plus localisées.



nucléaire, Alice. Actuellement, le centre est en rénovation avec l'installation d'un nouveau cyclotron et d'une nouvelle salle de traitement pour 2010. L'ensemble de la ligne de faisceau de 7 mètres et ses nombreux éléments (compensateurs, collimateurs, ...) a été modélisé dans un code Monte Carlo de transport des particules. Notre simulation a atteint ses objectifs en permettant le calcul, avec une précision du millimètre, de la distribution de la dose déposée dans une cuve à eau. Ce modèle demande cependant trop de temps de calcul pour être utilisé en clinique. Néanmoins, pour des patients ayant des implants ou des volumes de tumeurs nécessitant un collimateur de forme complexe, les effets de diffusion des protons ne sont pas suffisamment bien reproduits par les algorithmes utilisés en clinique et la méthode Monte Carlo apportera les précisions nécessaires afin d'optimiser les faisceaux pour traiter ces cas complexes.



En 2005, Sophie Cavata met de côté la recherche sur le nucléon pour travailler en physique appliquée pour les Sciences de la Vie. Elle a réussi à concrétiser deux projets: ART, projet d'instrumentation pour la biologie, et MCPO, le projet présenté ici, mené en collaboration avec Alexey Stankovskiy, postdoc à l'Irfu.

(1) Centre de protonthérapie d'Orsay

- 10 min CPU pour obtenir une distribution de dose en profondeur  
- 10 h pour obtenir la carte de dose avec 5% d'erreur.

Nous avons installé le code sur un nœud de la grille à l'Irfu.

Qu'il s'agisse d'activation de matériaux ou de délivrer une dose en un point très précis, nos partenaires ont besoin du savoir-faire des physiciens qui possèdent les outils, les connaissances et le recul adaptés pour faire des prédictions fiables. Ces prédictions ne pourraient pas atteindre le niveau de sophistication actuelle sans l'utilisation massive des calculs haute performance.



## Scintillations

## Le Grand Récit de l'Univers

Une belle exposition à découvrir à la Cité des Sciences : la généalogie de la matière qui nous constitue. Elle s'adresse à tout type de public. Les commissaires de l'exposition, Etienne Klein, Marc Lachieze-Rey et Roland Lehoucq vous invitent à poursuivre une enquête, présentée sur le premier niveau de l'exposition. Elle démarre sur Terre et transporte le visiteur jusqu'au cœur des étoiles, dans les galaxies lointaines et aux confins de l'Univers. Le second niveau permet de se familiariser avec les lois physiques, souvent étranges pour notre intuition commune, qui ont permis de comprendre et de décrire l'évolution et la structuration de l'Univers.

Roland Lehoucq

« Il est impossible de se déplacer plus vite que la lumière  
... et ce serait idiot car on perdrait son chapeau. »

Woody Allen

Emprunté à l'exposition GRU



Le positronium est un état lié entre un électron et son antiparticule, le positon. La production de nuages d'atomes de positronium dans le vide est une condition nécessaire pour réaliser de nouveaux types d'expériences en physique fondamentale sur la gravité et l'antimatière, mais offre aussi un intérêt certain comme sonde des matériaux poreux à l'échelle nanométrique. Une collaboration originale regroupant entre autres des physiciens de l'Irfu et de l'Iramis du CEA-Saclay a réussi à produire ce positronium à un taux record dans des conditions stables et contrôlées. Il s'agit d'une étape importante pour le programme visant à tester la gravitation de l'antimatière.

Contact : Laszlo Liskay, Irfu/SACM.

## Va-et-vient

Ce va-et-vient couvre une période s'étendant de septembre 2007 à mars 2008.

### Tu vas ...

Plusieurs de nos collaborateurs vont continuer leur course en dehors de l'Irfu.

Christian Cavata de Dapnia/Dir va suivre les affaires entre le CEA et le Cern depuis DSM/Dir. Pierre-François Giraud a été détaché du SPP pour travailler au Cern pendant un an. David Mouyon va rejoindre la DEN après de nombreuses années sur les projets du SACM. Florent Staley « is watching you » ; il va voir le CEA de l'extérieur avec le regard du Ministère (DGRI/MESR). Enfin, Pascal Gros part du SIS pour rejoindre le Cesta.

Vous êtes nombreux à être partis à la retraite : Jean-Jacques Bigot, notre talentueux photographe, et Alain Bouillac du SIS, deux célèbres Philippe du Sédi, Philippe Duval et Philippe Mangeot ainsi que Jean-Louis Ritou du même service, Lucien Kulbicki du SACM, Patrick Le Du du SPP, Philippe Goret et Michel Cassé (j'espère que

nous aurons encore l'occasion de collaborer sur les projets scientifiques, oniriques, magiques dont tu as le secret) du SAp.

### ... et tu viens

La création du SIEV (Service d'ingénierie Ifmif / Eveda) a entraîné de nombreuses mutations internes à l'Irfu. Pierre-Yves Beauvais, Jacques Marroncle et Phu Anh Phi Nghiem viennent grossir les rangs de ce jeune service que nous vous avons présenté dans Scintillations N° 73. Trois autres mutations internes, deux du SIS vers le SACM, celles de Pascal Lévêque et Yannick Sauce et l'une dans le sens inverse, celle de Jean-François Denis.

Bienvenue à Fabrice Bouty qui a été recruté au Sedi/LIS comme informaticien pour la nouvelle machine interactive Dap-Int, à Jean Luc Sida, qui va consacrer (un des plus beaux mots de la langue française, tellement plus joli que « dédier ») une partie de son temps à ce journal et à Frédéric Marie qui, comme vous avez pu le voir en page 10, rejoint le Senac.

## CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

Irfu Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers

**Directeur de la publication** : Jean Zinn-Justin

**Directeur scientifique** : Vanina Ruhlmann-Kleider

**Rédacteur en chef** : Jean-Luc Sida

**Comité éditorial** : Shebli Anvar, Maryline Besson, Rémi Chipaux, Olivier Cloué, Philippe Convert, Philippe Daniel-Thomas, Antoine Drouart, Christian Gouiffès, Florence Hubert-Delisle, David Huillier, Christine Marteau, Claude Reupraud, Vanina Ruhlmann-Kleider, Yves Sacquin, Angèle Séné, Pierre Vadrine, Didier Vilanova

**Secrétariat** : Maryline Besson

**Photographies** : Alain Porcher

**Mise en page** : Christine Marteau

**Contact** : Jean Luc Sida, 01 69 08 91 65 / 06 72 18 02 05  
jean.luc.sida@cea.fr

<http://irfu.cea.fr>

Dépôt légal juin 2008