**DOSSIER**

## RETOMBÉES DE LA SCIENCE

- ✔ La science et la société p. 2
- ✔ Regard sur un brevet p. 4
- ✔ Icos, Icos... p. 5
- ✔ L'impossible dans les meilleures conditions p. 6
- ✔ Impact des grands équipements de recherche p. 8
- ✔ Maîtriser et prévoir p. 10
- ✔ La non-prolif' portée aux v p. 11
- ✔ De la physique au cerveau p. 12





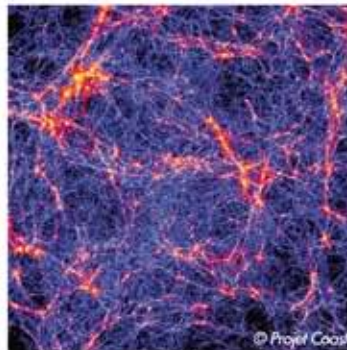
« La mission première de la recherche fondamentale demeure d'élargir les connaissances. »

Les retombées de la science. Vaste sujet d'actualité au cœur de nombreux débats relatifs à la position et aux relations de la science et de la société. C'est aujourd'hui une attente de la société exprimée à l'ensemble des chercheurs, ingénieurs, techniciens impliqués dans la recherche fondamentale à laquelle nous devons de répondre. La conférence sur le changement climatique qui a eu lieu au mois de décembre à Copenhague est un exemple caractéristique de la relation forte qui existe depuis une vingtaine d'années entre la société et la science.

Par conséquent, je me réjouis de constater que le journal *Scintillations* consacre une édition complète aux retombées de la science ce qui permettra d'informer un large public sur les réussites de l'Irfu dans ce domaine mais également de sensibiliser l'ensemble des acteurs de la recherche fondamentale à cet enjeu majeur.

La mission première de la recherche fondamentale demeure d'élargir les connaissances d'un domaine scientifique. Pour autant, doit-elle être totalement déconnectée d'une quelconque finalité applicative utile à d'autres communautés scientifiques voire à la société ? Sempiternelle question dont les diverses réponses ne peuvent se ramener à une vision manichéenne du monde de la recherche, où d'un

En effet, l'une des plus grandes spécificités de la science est que, contrairement à la balistique, ses retombées sont le plus souvent imprévisibles mais parfois absolument révolutionnaires : Newton, avec sa pomme, ne pouvait imaginer qu'un jour, grâce à ses équations, tant de systèmes de communication et d'observation utiles à l'humanité graviteraient autour de la Terre. Plus proche de nous, Tim Berners-Lee souhaitait uniquement mettre au point un système de partage de données entre scientifiques du monde entier travaillant sur des expériences au Cern, lorsqu'il inventa le protocole http. Il ne pouvait imaginer que vingt ans plus tard, plus d'un million de serveurs se créeraient par jour dans le monde et que le web aurait totalement bouleversé notre façon d'échanger de l'information, mais également nos relations sociales, nos industries, nos modèles de société.



Nos connaissances associées aux capacités des ordinateurs de nouvelle génération permettent de calculer la formation des grandes structures aux premiers âges de l'Univers.

L'innovation technologique, ce lien entre la recherche fondamentale et la recherche appliquée, est sans aucun doute l'une des spécificités du CEA et plus particulièrement de l'Irfu, reconnue nationalement et internationalement.

Les besoins des scientifiques de l'Irfu, motivés par la compréhension des lois fondamentales de l'Univers, nécessitent pour garantir des avancées majeures en physique nucléaire, physique des particules et astrophysique, de créer, conceptualiser, construire, mettre en service des dispositifs expérimentaux dont les spécifications et les performances repoussent les limites des technologies existantes.

« L'innovation technologique, ce lien entre la recherche fondamentale et la recherche appliquée est l'une des spécificités du CEA. »

Je me réjouis de constater que tout au long de son histoire, et encore aujourd'hui, l'Irfu a participé à tant de grandes aventures technologiques associées à des expériences scientifiques auprès de grandes infrastructures de recherche sur terre et dans l'espace, se distinguant tout particulièrement dans les domaines de l'informatique, l'électronique, la détection, le cryomagnétisme... La liste n'est évidemment pas exhaustive.



Le projet Spiral 2 et le Ganil, principalement consacrés aux études des noyaux, accueillent des recherches pluridisciplinaires : biologie, physique atomique, étude des matériaux...

de la matière et de la vie, il existe un lien, qui permet aux idées et aux hommes d'irriguer une thématique scientifique par une autre, voire de passer du monde des connaissances au monde économique. Ce lien, c'est l'innovation, et tout particulièrement l'innovation technologique qui est l'un des piliers de l'économie de la connaissance.



# la société

Par Catherine Césarsky, Haut-Commissaire à l'énergie atomique

Cependant, si par définition, c'est ce que l'on attend d'équipes en charge d'expériences scientifiques nécessitant une haute technologie, le couplage transversal basé sur le partage et l'échange réciproque de connaissances, scientifiques et technologiques, avec d'autres communautés demeure une spécificité de l'Irfu, que peu de laboratoires en France pratiquent et maîtrisent à ce point.

En tant que Haut-Commissaire à l'énergie atomique et ancien membre de cet Institut, je me réjouis de constater que la qualité, la diversité et la richesse des exemples fournis dans ce numéro de *Scintillations* sont autant d'exemples de ces réussites dont l'Irfu peut être fier.

On ne compte plus les allers-retours dans le domaine des aimants entre la fusion contrôlée et les accélérateurs de particules, dans le domaine de la détection de rayons infrarouges entre les caméras embarquées sur les satellites et les caméras à vision nocturne, dans le démantèlement des installations nucléaires en-

tre les infrastructures de recherche dédiées à l'énergie nucléaire et celles dédiées à la physique nucléaire.

Je me félicite également de constater que régulièrement de nouveaux sujets transversaux voient le jour. Je suivrai avec beaucoup d'intérêt les avancées qui pourront être faites dans le domaine du contrôle et de la non-prolifération nucléaire, dont, comme un symbole, la pierre angulaire est le neutrino, la seule particule qui soit réellement au carrefour de la physique nucléaire, de la physique des particules et de l'astrophysique.

L'information reste un domaine où, de mon point de vue, des efforts particuliers doivent être encore développés par toutes les personnes (chercheurs, ingénieurs, techniciens) impliquées dans la recherche scientifique. Le débat national sur les nanotechnologies, le développement des OGM et bien d'autres sujets nous démontrent quotidiennement que les relations de confiance, d'estime, voire d'admiration entre la société et la science sont aujourd'hui fondamentalement différentes de celles des siècles précédents.

*« La compréhension des lois fondamentales de l'Univers nécessite de créer, conceptualiser, construire, mettre en service des dispositifs dont les performances repoussent les limites des technologies existantes. »*

L'acceptabilité sociale est un enjeu majeur auquel l'ensemble des scientifiques, quelle que soit leur discipline, doit faire face. L'éducation, l'information, la communication sont bien évidemment les réponses les plus adaptées et je me félicite de voir que ce numéro de *Scintillations* et les actions menées régulièrement par les membres de l'Irfu participent à cet effort de partager avec le plus grand nombre les rêves, les résultats et les retombées de nos recherches.

Catherine Césarsky



L'observatoire de Hanle en Inde, la plus haute station de mesure du CO<sub>2</sub> équipée par le LSCE et l'Irfu

## La science, un enjeu majeur de société

Dans nos sociétés de plus en plus technologiques, plus de 80% des citoyens du Monde<sup>1</sup> affirment que la science contribue à l'amélioration de leur quotidien. La science et ses retombées jouent ainsi un rôle majeur dans la société. Paradoxalement, elle représente en même temps l'inconnu pour 69% des personnes interrogées.

(1) Sondage sur la perception de la Science et des carrières scientifiques commandité par l'Unesco et l'Oréal en 2009, 10 000 personnes interrogées dans dix pays du monde entier (Afrique du Sud, Allemagne, Chine, Emirats Arabes Unis, Espagne, Etats-Unis, France, Italie, Mexique et Royaume-Uni).



Utilisation du savoir-faire dans le domaine des cavités supraconductrices pour le projet Soleil.

Le savoir-faire acquis dans la réalisation des aimants des détecteurs du Cern, comme ici celui de CMS, permet d'imaginer ceux de l'imagerie médicale (Neurospin, Iseult...).



# Regard sur un brevet

Par **Éric Delagnes**

**La science avance en innovant. Ces innovations doivent être protégées quand elles peuvent conduire à des applications. Eric Delagnes nous raconte comment ses développements en électronique pour le LHC l'ont conduit à déposer des brevets.**

*Enveloppe Soleau : Ce procédé peu coûteux (15 €) permet de dater de façon certaine l'état de connaissances. Il consiste à déposer à l'Institut national de la propriété intellectuelle des documents dans deux enveloppes. Les enveloppes sont datées et perforées. L'une est conservée par l'INPI, l'autre est remise au déposant. Néanmoins, l'enveloppe ne constitue pas un titre de protection industrielle et il n'en découle aucune protection directe.*

**M**es premiers pas dans le monde de la propriété intellectuelle (PI) ont emprunté un chemin tortueux. L'aventure commence en 1997. Je viens de finaliser, avec Dominique Breton du Laboratoire de l'accélérateur linéaire d'Orsay (LAL), une puce électronique pour le calorimètre à argon liquide d'Atlas. Nous entrons en contact avec la société Metrix, célèbre pour ses multimètres, qui envisage d'intégrer une puce similaire dans sa future gamme d'oscilloscopes portables, mais avec des performances trente fois supérieures ! Le défi semble insurmontable. Après quelques « réunions de travail » dans le TGV nous menant au Cern, nous imaginons une nouvelle architecture susceptible de répondre au besoin. Deux ans plus tard, l'Irfu et le LAL signent un contrat, assez mal ficelé sur le plan de la PI, avec Metrix. Préalablement à cette signature, mon Chef de service nous conseille de déposer à l'Institut de la propriété intel-



brevet français. Cette rédaction prendra plus d'un an et, à partir d'une note de brevetabilité de six pages, aboutira à une proposition de brevet de 70 pages, devenue difficilement compréhensible par les inventeurs eux-mêmes. Un an plus tard, l'INPI nous envoie un premier rapport, plutôt favorable, mais remettant en cause les premières revendications du brevet qui étaient devenues très larges, donc fragiles, sous l'impulsion du cabinet de PI. La réponse à ce rapport, consistant à justifier notre activité inventive, prendra quatre mois et sera la phase la plus laborieuse de l'aventure. Elle servira cependant de base au dépôt de brevet international que nous ferons à la même époque. Les brevets français et mondiaux seront finalement délivrés en 2004 et licenciés. Ils seront un élément important dans la négociation avec

Chauvin-Arnoux qui aboutira à une cession de licence en 2007, après l'entrée en scène particulièrement efficace de la DSM/valo et de la Direction juridique du CEA.

Depuis lors, j'ai déposé trois nouveaux brevets en électronique. Avec l'expérience, la rédaction s'est révélée de plus en plus rapide mais également de plus en plus solide. A titre d'exemple, le troisième brevet a été déposé en seulement une semaine et son examen par l'INPI n'a remis en cause aucune des revendications. Néanmoins, à ce jour, seul le tout premier brevet est licencié. Il s'avère en effet très difficile de valoriser un brevet portant sur un bloc fonctionnel électronique autrement qu'en proposant un système complet, répondant déjà totalement au besoin de l'industriel et intégrant ce bloc, ce qui demande des développements spécifiques qui sont difficilement compatibles avec la dimension de nos équipes.

Depuis 2004, le CEA prévoit, pour les inventeurs, une prime de rédaction de brevet (allant de 200 à 400 €), une prime d'invention, accordée après délivrance du brevet (350 à 1400 €) et enfin une prime d'exploitation en cas de valorisation. Le montant de cette dernière peut aller jusqu'à 50% des revenus d'exploitation après déduction des frais de propriété intellectuelle (pourcentage dégressif à partir de 50 k€). De mon côté, au-delà de la satisfaction de voir une technologie développée dans le laboratoire intégrée dans un appareil « grand public », les premières retombées concrètes devraient arriver en 2010.

## Quand et comment déposer un brevet ?

### Quelles sont les dispositions à prendre ?

Si vous avez développé un concept technologique innovant ou même un programme informatique, vous pouvez faire breveter votre invention. Pourquoi s'en priver : le CEA récompense les efforts d'innovation (NIG 519).

Votre invention doit n'avoir fait l'objet d'aucune divulgation, encore moins d'une publication. L'application Bali, accessible depuis votre espace Sigma, facilitera les premières étapes du dépôt de brevet en toute sécurité. La demande préliminaire sera transmise par cette application à l'ingénieur-brevet de votre secteur et à votre responsable hiérarchique. L'ingénieur-brevet (Dominique Lestelle pour la physique et Laurence Rajzman pour la Chimie) vous assiste tout au long de la procédure, de la phase de réflexion à la phase technique d'élaboration du brevet en passant par l'indispensable recherche d'antériorité.

Une fois le projet défini, l'ingénieur-brevet suit les opérations et gère les divers aspects de la procédure de dépôt auprès des instances officielles (INPI...). La demande de brevet, si elle est validée, est publiée après expiration d'un délai de 18 mois. La délivrance du brevet a lieu ultérieurement sur examen. L'inventeur reste sollicité tout au long de cette procédure, pour apporter le cas échéant les observations, compléments d'information ou modifications indispensables.

Angèle Séné (Ingénieur documentaliste, Irfu/Dir)

lectuelle (INPI) une enveloppe Soleau malgré nos habitudes de diffusion libre des connaissances. Le développement technique aboutit à un produit répondant aux spécifications.

Fin 2000, l'entreprise Chauvin-Arnoux qui a racheté Metrix nous demande de participer à la rédaction d'un brevet, déposé en son nom. La société gérant la PI du CNRS nous interrompt : le brevet ne portant que sur des connaissances antérieures par l'enveloppe Soleau, il doit être déposé aux seuls noms du CEA et du CNRS. Après accord de la DSM, nous entamons alors, en collaboration avec un cabinet privé spécialisé en PI, la rédaction d'un

Éric Delagnes, ingénieur-chercheur en micro-électronique à l'Irfu/Sédi, développe des circuits intégrés pour les détecteurs de particules.



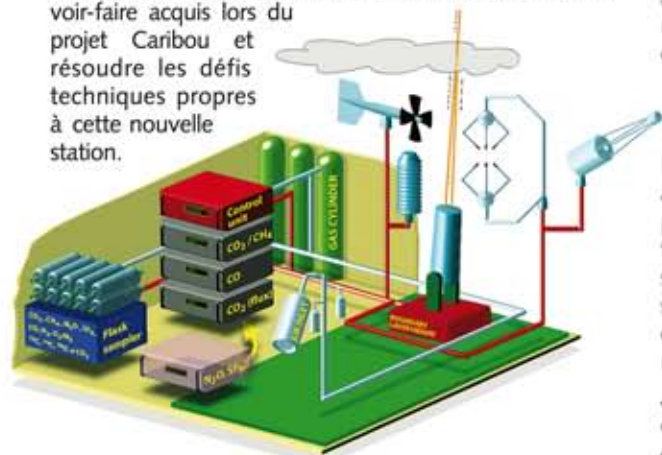
# Icos, Icos...

Par Olivier Corpace et Léonard Rivier

Après le succès de la collaboration Caribou entre le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) et l'Irfu, portant sur la mesure des gaz à effet de serre sur toute la planète, le savoir-faire du Service d'ingénierie des systèmes (SIS) est utilisé dans le cadre du projet européen Icos. Un premier démonstrateur devra être opérationnel en 2011.

**A**oût 2007, Groenland. L'équipe mixte du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) et de l'Irfu quitte le site d'Ivittuut. Elle vient d'y installer la dernière station Caribou, une station de mesure de précision de  $\text{CO}_2$ . Mars 2008, le projet Icos (*Integrated Carbon Observation System*) rentre dans sa phase préparatoire. Ce projet de mesure des gaz à effet de serre en Europe et dans les régions adjacentes est retenu sur la feuille de route stratégique Esfri (*European Strategy Forum on Research Infrastructures*). Les mesures, de haute précision, seront faites dans l'atmosphère, l'océan et au niveau des écosystèmes terrestres par un réseau de stations standardisées. Dans cette première phase, le LSCE a la responsabilité de la réalisation d'un démonstrateur de station atmosphérique.

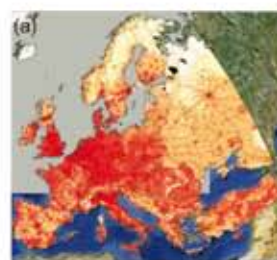
Tout comme sur Caribou, LSCE et Irfu travaillent en étroite collaboration. Le LSCE, en tant que responsable scientifique, s'appuie sur les compétences techniques de l'Irfu/SIS pour la réalisation de la station prototype : intégration mécanique et électrotechnique, contrôle-commande, supervision, réseau... Pour le SIS, l'enjeu est double : valoriser le savoir-faire acquis lors du projet Caribou et résoudre les défis techniques propres à cette nouvelle station.



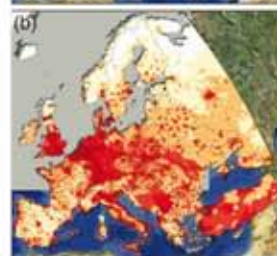
La station atmosphérique Icos doit fournir des mesures en continu de  $\text{CO}_2$  (quantité et flux),  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ , des données météo et de hauteur de couche limite ainsi que des mesures intermittentes de  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{O}_2/\text{N}_2$ ,  $^{18}\text{O}$  et des isotopes du carbone dans le  $\text{CO}_2$ .

Sur Caribou, les difficultés venaient de la précision de la mesure, ce qui se traduisait par des régulations fines de température et de pression sur l'air prélevé. Sur Icos, il s'agit d'intégrer plusieurs instruments tout en étant modulaire et de favoriser l'interchangeabilité des appareils. Le réseau de distribution d'air est complexe : deux à quatre lignes de prélèvements extérieurs doivent alimenter indifféremment les instruments, en passant par des pompes, des vannes multivoies et des systèmes de déshumidification. En fonctionnement, chaque appareil devra être périodiquement étalonné. Ces opérations doivent être réalisées le plus rapidement possible afin de favoriser les périodes de mesure. Tous ces instruments et composants d'automatisme sont plus ou moins interdépendants et peuvent être soumis à des anomalies de fonctionnement. Par ailleurs, la station a vocation à être industrialisée en petite série pour être déployée en Europe sur des sites isolés, éventuellement sans présence humaine. Ceci conditionne les solutions techniques retenues, l'accent devant être mis sur la construction d'une machine la plus fiable possible, contrôlable et pilotable à distance et pouvant fonctionner en mode dégradé.

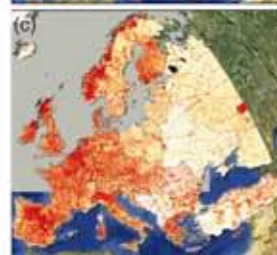
A travers Icos, dont le démonstrateur devra être opérationnel en 2011, le SIS et l'Irfu ont l'occasion de développer des compétences adaptées aux réseaux d'instruments comme le sont beaucoup de projets de l'Irfu (CTA ou  $\text{Km}^3$  par exemple), de valoriser leur savoir-faire en dehors de l'Institut ainsi que de les appliquer à des enjeux sociétaux.



Émissions de  $\text{CO}_2$  dues aux combustions fossiles



Densité de population



Émissions de  $\text{CO}_2$  par habitant dues aux combustions fossiles

© www.icos-infrastructure.eu

Olivier Corpace (Irfu/SIS) et Léonard Rivier (LSCE), ingénieurs, sont les chefs de projet d'ICOS.





# L'impossible dans les m

Romain Gary, dans *Charge d'âme*, dit, à propos de la Science, *s'arrêter, mais pour tenter l'impossible dans les meilleures* Il y a un siècle, notre vision du corps humain se limitait à sans déchirer la chair tenait de l'impossible. Inimaginable est aujourd'hui capable de regarder un cerveau penser, de cette fiction en réalité, permis d'étendre nos sens jusqu'à conditions ? Le partage des connaissances.



© Musée Curie (coll. ACJC)/Institut Curie

La médecine et la biologie ont amplement bénéficié des avancées de la physique corpusculaire et des instruments développés pour ce domaine. Peu après la découverte des rayons X, l'imagerie médicale a révolutionné la médecine en apportant une vision anatomique (statique) puis physiologique (dynamique) du corps humain grâce à l'utilisation de traceurs radioactifs produits par des accélérateurs de particules. L'utilisation de rayonnements s'est élargie bien au-delà de l'imagerie avec la radiothérapie. Aujourd'hui, le besoin d'aimants à haut champ (Etoile, Neurospin et Iseult présentés en page 12), d'instrumentation (Alexia, ART, Calipso), de simulations efficaces des interactions particules-matière pour optimiser les traitements radiothérapeutiques (Prouesse) ont complété la synapse fonctionnelle entre savoir-faire de l'Irfu et besoins des sciences du vivant. Cet échange s'étend à nos méthodes de travail et, en particulier, à la gestion de grands projets qui n'est pas usuelle aux médecins bien qu'elle soit devenue indispensable pour des projets comme Neurospin ou FluorC. L'Irfu, dans ses nombreux domaines de compétence, apporte des solutions à des problèmes spécifiques qui se posent au monde biomédical ne trouvant pas de réponse adaptée dans l'industrie.



Quand on travaille dans la recherche fondamentale, on se doit de penser aux applications possibles des connaissances acquises, au-delà de la finalité de son étude. Il y a bien d'autres secteurs de première importance que le biomédical comme celui de l'environnement et de l'énergie. Plus que jamais il faudra faire l'impossible dans les meilleures conditions. La révolution industrielle a permis une amélioration essentielle des conditions sanitaires, ce qui a amélioré le confort et l'espérance de vie des populations, mais il peut y avoir des conséquences à l'utilisation des avancées scientifiques et techniques amenant un progrès.

« Le paradoxe de la science est qu'il n'y a qu'une réponse à ses méfaits et à ses périls : encore plus de science. »

Romain Gary, *Charge d'âme*.

La Syn a

Instrumentation

Accélérateur

Aimant

Physique

Simulation

Gestion de projet

Irfu



## ART Instrumentation Recherche

Pour développer des médicaments ou de nouveaux traceurs, les biologistes font des premiers tests sur des animaux. Ils ont besoin de suivre la molécule testée en mesurant sa concentration dans le plasma, au cours du temps. Le projet ART (Analyse de paramètres physiologiques du rongeur sous imagerie TEP) propose une chaîne automatique de mesure de la concentration du traceur dans le sang de l'animal en fonction du temps simultanément à l'imagerie TEP, depuis le prélèvement de micro-échantillons sanguins jusqu'au comptage plasma. Impliqué dans cette collaboration avec des médecins et des biologistes, l'Irfu a fait bénéficier de son savoir-faire un monde où il est inhabituel de développer ses propres outils. Au-delà du projet ART, il a apporté d'autres innovations comme un connecteur standard sans volume mort adapté aux besoins des chercheurs en biologie et des médecins en pédiatrie. Ce projet interdisciplinaire a déjà conduit au dépôt de quatre brevets.

## Calipso Instrumentation Imagerie

Projet de détection novateur, les qualités anticipées de Calipso devront permettre d'améliorer l'efficacité de détection des Tomographes à émission de positron (TEP), jusqu'à un facteur 10 pour les TEP hospitalières, mais aussi d'obtenir une résolution d'image du millimètre pour un cerveau ou un petit animal. La meilleure efficacité permet de diminuer les doses de radiation délivrées au patient et le gain en résolution un meilleur diagnostic médical. La première phase de Calipso consiste à réaliser un prototype de calorimètre optimisé pour la détection et la localisation de photons d'une énergie voisine du MeV. Ces travaux de recherche et développement sont mis en œuvre à l'Irfu en coordination avec l'Iramis et le SHFJ.

## Prouesse Simulation Thérapie

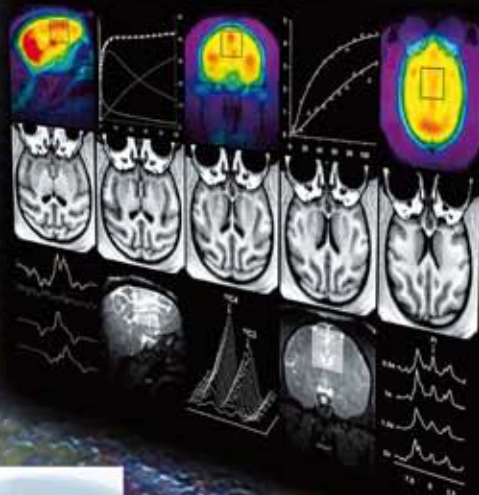
La radiothérapie permet de traiter certains cancers localisés. L'efficacité du traitement dépend de la précision de l'irradiation de la tumeur. L'utilisation de rayons ionisants irradiant un patient nécessite des codes de simulation numérique 3D de grande précision géométrique et dosimétrique afin de planifier au mieux le traitement. Le projet Prouesse, piloté par la DRT, a sollicité l'expertise des interactions hadrons-matière et le savoir-faire en simulation de l'Irfu afin de développer un code apte à donner rapidement des résultats précis et fiables pour la hadronthérapie. Il sera intégré dans la planification de traitement utilisée en milieu hospitalier. Ainsi, le médecin et le physicien d'hôpital auront une connaissance précise de la dose réelle distribuée en chaque point du corps du patient. Ce projet fait l'objet d'un financement ANR.



# meilleures conditions

qu'elle permet de « connaître les limites du possible. Pas pour les conditions. ».

ce que nous montraient nos yeux : observer les os, les organes aussi d'agir sur une zone interne sans ouvrir. Et pourtant, on traite une tumeur, sans intrusion. Qu'est-ce qui a transformé tout voir, tout savoir, de réaliser l'impossible dans les meilleures



Imagerie

Recherche

Thérapie

Médical

Au SHFJ, les traceurs radioactifs sont produits par l'irradiation de carbone et de fluor par des protons accélérés par le cyclotron. Associés à des molécules spécifiques de la fonction d'un organe (os, poumon, coeur...), ils sont ensuite injectés au patient de façon automatique avant de réaliser l'imagerie.

FluorC

Projet Imagerie

Jean-Michel Dumas, membre de l'Irfu travaillant au SHFJ, nous raconte...

« Une cure de jouvence au Service hospitalier Frédéric Joliot du Centre hospitalier d'Orsay : C'est ce qu'entreprend actuellement l'Institut d'imagerie biomédicale (I2BM) de la DSV avec l'aide de l'Irfu, dans le cadre du projet FluorC.

A ma première visite en 2008 au SHFJ, Malgorzata Tkatchenko, Chef de l'I2BM, m'explique : « Il nous faut rénover les installations de fabrication des médicaments et traceurs radioactifs destinés à l'imagerie par tomographie par émission de positrons (TEP), tout en maintenant les activités de recherche. Cette opération, lourde, est critique vis-à-vis des autorisations permettant la recherche clinique. Nous avons besoin de l'Irfu pour la direction du projet et l'expertise nucléaire afin d'assainir les locaux (anciens cyclotron et laboratoires de synthèse radio-chimique) et créer une nouvelle plate-forme de fabrication. »

Je découvre alors un nouvel environnement de travail, celui des médecins et pharmaciens, des techniciens et chercheurs en biologie, naturellement proches des patients ou afférés à la recherche sur l'animal, loin de préoccupation projet, dans une installation chargée d'histoire depuis la construction de son premier bâtiment (1959), celui à moderniser où l'on reçoit les patients. La rénovation en cours englobe l'ensemble du processus depuis la production des radionucléides ( $^{18}\text{F}$  et  $^{11}\text{C}$ ) avec le cyclotron jusqu'à la mise en seringue des médicaments radio-pharmaceutiques. Un vrai défi où nucléaire (confinement des substances radioactives) et médicaments (stérilité en salle blanche) sont à marier ! »

Gantry

Aimant Thérapie

Alexia

Instrumentation Thérapie

En 2013, le Centre lyonnais Etoile introduira en France une nouvelle technique de radiothérapie ultra-précise pour le traitement de certaines tumeurs inopérables et résistantes aux photons : l'hadronthérapie par faisceau d'ions carbone. Ces particules lourdes sont difficiles à guider, d'où la nécessité de dispositifs magnétiques imposants, similaires à ceux utilisés auprès d'accélérateurs de particules. Pour alléger la structure en chicane appelée « gantry », capable de tourner autour du patient allongé afin d'attaquer la tumeur sous différentes incidences, les spécialistes de l'Irfu (SACM, SIS) proposent d'utiliser la supraconductivité. Une première dans le domaine de la radiothérapie... et une très belle façon de valoriser un savoir-faire technologique de l'Institut.

Le Service hospitalier Frédéric Joliot (SHFJ) de la DSV a fait appel au SIS en 2006 afin d'automatiser un processus de préparation de produits radioactifs utilisés pour l'imagerie (radiotraceurs). Cet automate vient remplacer une méthode manuelle exposant le personnel à des irradiations au bout des doigts.

Le travail du SIS a abouti au préparateur Alexia permettant de fabriquer automatiquement un flacon d'une solution ayant la concentration de radiotraceurs souhaitée par l'utilisateur, réduisant ainsi les doses reçues par le personnel. Un premier brevet a été déposé en octobre 2009.

L'étape suivante vise à préparer automatiquement, à partir de cette solution, des seringues contenant les doses nécessaires de radiotraceurs pour l'injection au patient. Ce projet a reçu le soutien du programme transverse Techno-Santé du CEA.





## Retombées économiques du LHC Par Jean-Claude Brisson

Lors de la conférence européenne sur les infrastructures de recherche, en décembre 2008 à Saclay, Pierre Lasbordes<sup>1</sup> relevait « ... l'impact scientifique, mais aussi économique et sociétal des infrastructures de recherche. »

Les retombées économiques liées à la construction des équipements sont quantifiables comme cela a pu être fait pour le LHC. Elles sont bien plus difficiles à établir à long terme.

(1) Vice-président de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Les retombées technologiques et économiques d'un grand projet de recherche sont souvent difficiles à quantifier. Ce n'est pas le cas de la phase de construction du LHC qui fournit ainsi un bon

exemple pour comprendre l'impact économique de la construction de grandes infrastructures de recherche.

Le coût des détecteurs a été de 1,1 milliard d'euros dont 20% étaient à la charge du Cern, le reste étant financé par les instituts de la collaboration, souvent sous forme de fournitures en nature. L'accélérateur a coûté 2,4 milliards d'euros. Sur cette somme, les industriels français ont reçu 542 millions d'euros.

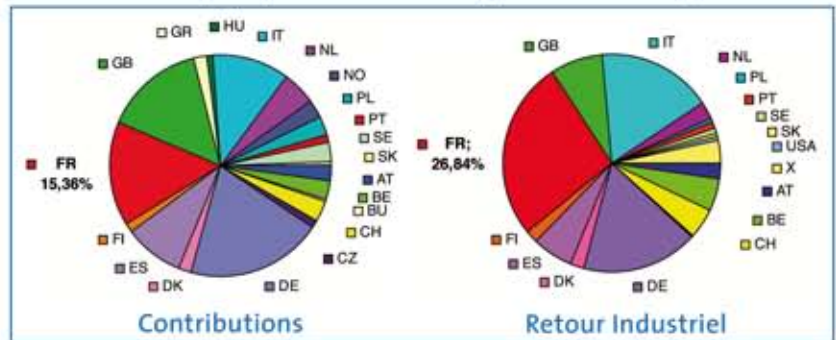
On peut comparer la contribution financière de chaque pays de l'Union Européenne au montant des contrats passés avec ses entreprises (retour industriel). On notera un bilan nettement favorable pour la France avec

un retour de 26,8% par rapport à une contribution de 15,4%. Sur plus de 1600 entreprises françaises mises à contribution par le Cern, 250 ont bénéficié d'un chiffre d'affaire compris entre

50 k€ et 180 M€ pour un total de plus de 400 M€. Les entreprises des autres Etats Membres ont, de plus, sous-traité en France des travaux pour un montant de 120 M€.

La recherche fondamentale nécessite d'importants développements technologiques en termes de puissance, de sensibilité, de fiabilité, et souvent de miniaturisation. Les dépenses en France sont plutôt associées à des matériels de haute technologie comme le montre le tableau ci-dessus dans lequel la part du génie civil est faible par rapport aux équipements cryogéniques ou magnétiques, par exemple. La réalisation de grandes installations de recherche nécessite souvent l'acquisition, par les entreprises, de savoir-faire à la pointe de la technologie ce qui élargit leurs compétences.

Les retombées économiques et technologiques positives du LHC pour les entreprises françaises, comme celles d'autres grands projets de recherche, découlent de la politique des différents gouvernements depuis la



Machine	Éléments magnétiques	279
	Équipements cryogéniques	121
	Autres composants d'accélérateur	32
	Injection Lignes de transfert	8
Zones Expérimentales	Génie Civil	34
	Infrastructures techniques	41
Total M€	Génie Civil	14
	Infrastructures techniques	13
Total M€		26,8% de la construction 542

Libération qui, à travers les grands instituts (CEA, Cnes, CNRS, DGA...), ont poussé de grands projets, scientifiques ou techniques, civils ou militaires, en s'appuyant sur l'industrie. Ceci a permis aux industriels d'augmenter leurs compétences dans des domaines de haute technologie et de bien maîtriser leur productivité, leur donnant les moyens non seulement de répondre aux besoins des très grandes installations de recherche mais de le faire à un prix compétitif par rapport aux entreprises des autres états membres de l'Union Européenne.

### Exemple de collaboration industrielle

En 1996, le Cern définit le besoin d'une vanne assurant à la fois l'admission de l'hélium superfluide dans les aimants cryogéniques et son évacuation rapide pour protéger l'enceinte d'hélium en cas de surpression (*quench*). Le CEA a collaboré avec la société Adareg, chacun apportant son expertise dans son domaine de compétence : Adareg, 30 années d'expérience dans la régulation de fluides critiques et le CEA, expert des très basses températures. En 1999, son prototype de vanne ayant été qualifié, la société, devenue Adareg-Velan, gagne l'appel d'offre du LHC pour fournir les 400 vannes de *quench*. On voit d'après cet exemple que les exigences de l'excellence scientifique, les possibilités de collaboration entre entreprises et organismes de recherche permettent aux industriels d'enrichir leur catalogue et leurs savoir-faire. Cet investissement est productif pour toutes les parties car au-delà des 2500 vannes de cette société qui équipent le LHC aujourd'hui, des vannes similaires seront nécessaires à d'autres projets comme le projet Iter.



# équipements de recherche

L'Irfu et la fusion Par Jacques Marroncle



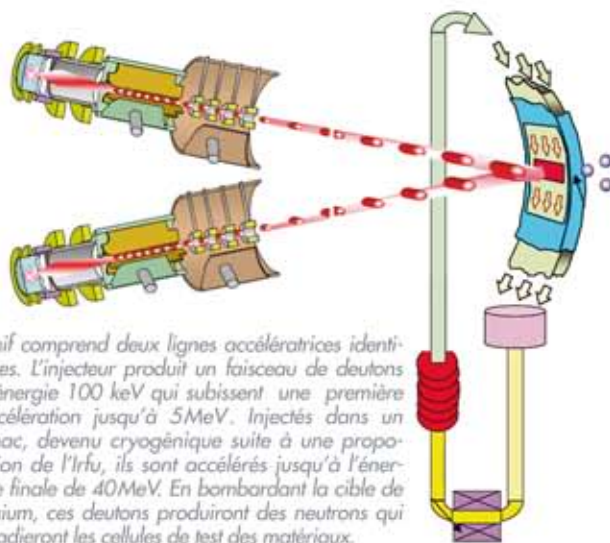
**Au-delà des aspects économiques, la science est aussi une pièce maîtresse du positionnement d'un pays sur l'échiquier international comme on peut le sentir avec le projet mondial Iter et son approche élargie dans laquelle l'Irfu a pris une importante responsabilité technique.**

La France accueille le programme mondial Iter (*International Thermonuclear Experiment Reactor*) qui vise à démontrer la faisabilité scientifique et technologique de la fusion nucléaire par confinement magnétique comme source d'énergie. L'Irfu fait partie de cette aventure pour laquelle ses compétences en accélérateurs de haute intensité seront exploitées afin de tester le vieillissement des matériaux des réacteurs de fusion du futur.



Linac supraconducteur dans son enceinte cryogénique.

Parallèlement à Iter, un accord signé entre l'Europe et le Japon en février 2007 vise à « accélérer le développement de l'énergie de fusion en coopérant à des projets d'intérêt commun ». Cet accord, dit de « l'approche élargie », porte sur trois projets dont Ifmif (*International Fusion Materials Irradiation Facility*). L'installation Ifmif sera la source de neutrons la plus intense au monde. Elle permettra de tester et de caractériser *in situ* des matériaux capables de supporter les énormes flux de neutrons de 14 MeV produits par les réacteurs de fusion. Elle consistera en deux accélérateurs de deutons, chacun d'intensité 125 mA et d'énergie 40 MeV, qui bombarderont une cible de lithium liquide, laquelle produira le flux de neutrons destiné à irradier les cellules de test situées en aval.



Ifmif comprend deux lignes accélératrices identiques. L'injecteur produit un faisceau de deutons d'énergie 100 keV qui subissent une première accélération jusqu'à 5 MeV. Injectés dans un Linac, devenu cryogénique suite à une proposition de l'Irfu, ils sont accélérés jusqu'à l'énergie finale de 40 MeV. En bombardant la cible de lithium, ces deutons produiront des neutrons qui irradieront les cellules de test des matériaux.

Eveda (*Engineering Validation Engineering Design Activities*) doit démontrer la faisabilité d'Ifmif par la construction d'un accélérateur prototype à Rokkasho Mura (Japon), d'une cible de lithium à l'échelle 1/3, et d'un ensemble de cellules de test. Le prototype accélérateur délivrera des deutons de 9 MeV avec une intensité de 125 mA. La mise en service de cet accélérateur est prévue pour 2014. Parallèlement, l'ensemble de l'étude d'Eveda, dont les

activités accélérateurs sont coordonnées par Alban Mosnier du Service d'ingénierie Ifmif-Eveda (Siev), devra préparer le dossier complet de construction de l'installation Ifmif.

La conception et la réalisation de l'accélérateur prototype est répartie entre trois grandes organismes de recherche européens, l'INFN de Legnaro (Italie), le Ciemat de Madrid et le CEA de Saclay. L'Irfu est fortement impliqué dans la construction du prototype accélérateur et mobilise les compétences de tous les services d'instrumentation pour les tâches de conduite de projet, d'ingénierie des systèmes, de cryogénie, de dynamique faisceau, de diagnostics, de contrôle-commande, d'architecture mécanique et d'expertise en conception d'accélérateur. L'ensemble des savoir-faire techniques de l'Irfu est au service du projet.

L'Irfu a longtemps travaillé sur des projets d'accélérateurs de très haute intensité (comme Iphi), dont les finalités sont multiples : usines de noyaux exotiques pour la physique nucléaire, usines de neutrinos intenses ou futurs collisionneurs à muons pour la physique des particules, sources de neutrons de spallation pour l'étude de la matière condensée, ou encore de systèmes hybrides pour la transmutation. Les technologies supraconductrices, appliquées dans ces accélérateurs, le sont également pour des aimants à forts champs utilisés pour l'étude de la fusion magnétique (W7X, JT60SA...). Le savoir-faire en accélérateurs de très haute intensité et l'expertise du froid constituent deux domaines d'excellence de l'Irfu, exploités dans des projets d'importance pour l'ensemble de l'Humanité.

Jacques Marroncle, physicien au Siev, s'investit aujourd'hui dans le projet Eveda après avoir longtemps travaillé sur le nucléon au SPHn.

## W7X

Le stellarator Wendelstein 7-X (W7-X) est une des machines européennes de recherche sur la fusion thermonucléaire par confinement magnétique. Elle est constituée de 70 aimants supraconducteurs destinés au confinement du plasma. Le SACM a eu la charge des tests de ces aimants. Ils ont permis d'étudier le comportement électrique, thermique et hydraulique de chaque aimant aux températures ambiante et cryogénique. (NDLR)

## JT60-SA

Dans le cadre de l'approche élargie pour la fusion thermonucléaire, l'Europe a en charge la remise à niveau du tokamak JT60 situé à Naka au Japon (premier dispositif à obtenir un rendement de fusion supérieur à 1) en le passant d'une technologie "chaude" à supraconductrice. L'Irfu gère le projet de réalisation d'une station de validation des aimants supraconducteurs, avant leur montage définitif sur la machine au Japon. Ce projet, démarré en 2009 viendra compléter les informations apportées par Iter pour préparer les futurs réacteurs de fusion. Ces travaux sont des retombées importantes de l'expertise en cryomagnétisme de l'Irfu. (NDLR)

## Regrets

Notre collègue et ami, Michel Painchaud nous a quittés le jeudi 29 octobre, à l'âge de 54 ans, après une longue maladie. Ingénieur de l'INP Grenoble, il a rejoint l'Irfu en 1998 et s'est depuis entièrement consacré à réalisation des RFQ de l'injecteur Iphi. Ses hautes compétences et son esprit méthodique ont permis d'établir une base technique solide à ce projet. Nous gardons de Michel le souvenir d'un collègue affable, travailleur et généreux.



# Maîtriser et prévoir

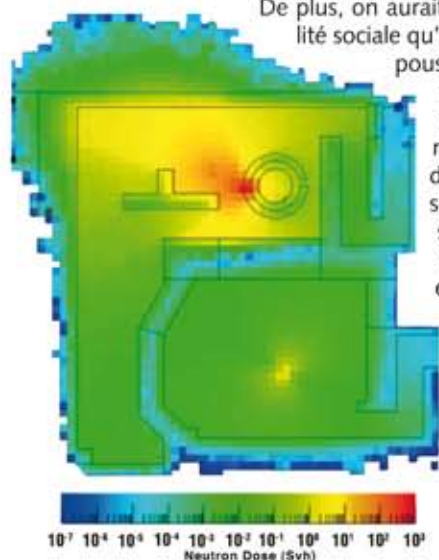
Par Frédéric Marie

**L'expertise de la physique nucléaire, des interactions rayonnement-matière et le savoir-faire en simulation, acquis pour les besoins de la recherche fondamentale à l'Irfu, répondent à une forte demande d'applications au service de la société. Le Service d'expertise nucléaire en assainissement et conception (Senac) exerce ses missions principalement pour le compte du CEA, mais aussi au bénéfice des pouvoirs publics.**

La maîtrise des risques occasionnés par les rayonnements ionisants et la minimisation de leurs conséquences pour l'homme et l'environnement est un enjeu sociétal majeur pour l'ensemble des pays ayant recours à l'énergie du noyau, que ce soit à des fins scientifiques, technologiques, économiques, thérapeutiques ou stratégiques. Elle recouvre de multiples facettes. En termes de santé publique et de respect de l'environnement, la mise en œuvre du principe Alara (*as low as reasonably achievable*), mettant en cause la responsabilité des exploitants et des producteurs de déchets, nécessite des simulations poussées et performantes qui entraînent une minimisation des impacts du nucléaire. En termes de respect des délais et d'efficacité, la prise en compte, dès la conception, de tous les risques nucléaires liés à l'exploitation et aux opérations de fin de vie des installations, permet d'anticiper les actions à entreprendre et donc de minimiser les coûts. La maîtrise des risques a donc un impact économique fort, en particulier lié aux activités croissantes de démantèlement, assainissement, création et recyclage des installations nucléaires en France et à travers le monde.

De plus, on aurait tort de négliger l'acceptabilité sociale qu'apporte un travail d'expertise poussé. A intérêt scientifique ou technologique égal, un projet de construction d'installation nucléaire aura d'autant plus de chances d'être accepté qu'il sera accompagné d'une analyse pertinente et transparente et d'un argumentaire adapté envers les instances consultées, sur les risques qu'il occasionne pour l'homme et l'environnement.

*Distribution du flux de neutrons produits lors des traitements au Centre de protonthérapie d'Orsay*



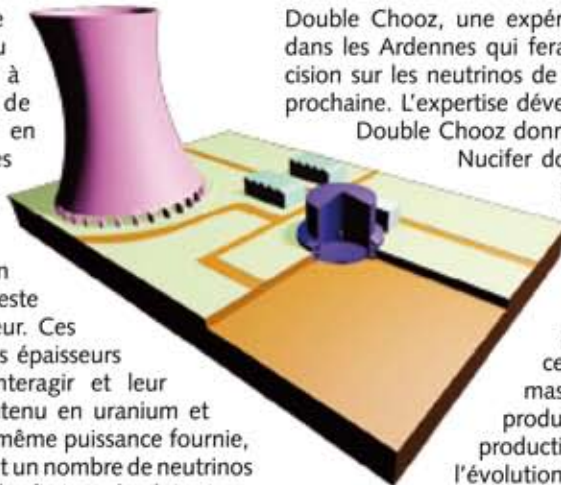


# La non-prolif' portée aux $\nu$

Par David Lhuillier

Face à l'accroissement de la demande énergétique et au changement climatique, la part de l'énergie nucléaire dans la production mondiale d'énergie devrait croître. Cela pose le problème de la prolifération des matières fissiles et de leur détournement à des fins militaires.

Le projet Nucifer propose de tester un nouveau moyen de surveillance à distance des réacteurs de puissance ou de recherche en appui aux différentes techniques déjà utilisées par l'AIEA<sup>(1)</sup>. Le principe repose sur la détection des anti-neutrinos (que l'on nommera sous l'appellation générique de neutrino dans le reste de l'article) émis par un réacteur. Ces particules peuvent traverser des épaisseurs colossales de matière sans interagir et leur production est sensible au contenu en uranium et plutonium du cœur : pour une même puissance fournie, les fissions de l'uranium induisent un nombre de neutrinos détectés 60% supérieure à celui des fissions du plutonium. En conséquence, les neutrinos sont des témoins privilégiés du fonctionnement d'un cœur de centrale. Le concept du détecteur Nucifer est basé sur une cible d'un mètre-cube de liquide scintillant, un détecteur



« miniature » comparé aux masses typiques des détecteurs neutrinos comprises entre 10 et 50 000 tonnes. La très faible probabilité d'interaction des neutrinos est compensée par le flux énorme de  $5 \cdot 10^{20}$  neutrinos par GW et par seconde. A 25 mètres d'un réacteur de 1 GW

l'évolution du combustible.

L'Irfu est impliqué dans la simulation des flux de neutrinos ainsi que dans la mesure de données nucléaires nécessaires pour atteindre la précision souhaitée. Parmi ces mesures, on peut citer les mesures de probabilité de capture et de fission à l'ILL<sup>(2)</sup> de Grenoble et à n-TOF au Cern ainsi que les récentes mesures de rendement de fission à l'ILL. Ce programme de mesures se poursuivra dans le cadre du projet Neutron for Science (NFS) à Ganil, à plus haute énergie.

Un prototype de Nucifer vient d'être monté. Il est testé en laboratoire. Les premiers signaux de neutrinos sont attendus mi-2010 avec une campagne auprès du réacteur Osiris du CEA Saclay.

Schéma de Nucifer et de sa cuve de  $1\text{m}^3$  de liquide scintillant (gris) vue par ses 16 photomultiplicateurs (violet).

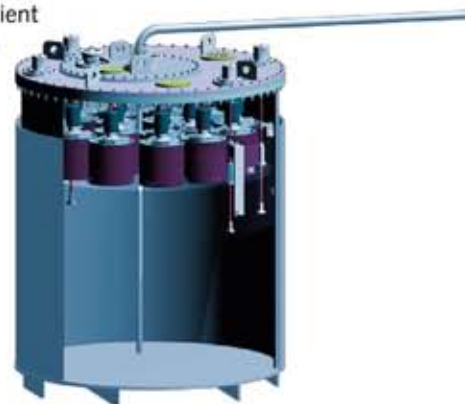
Aujourd'hui, un des principaux scénarios de détournement est l'extraction du plutonium produit dans les réacteurs après séparation chimique du reste du combustible. Nucifer se place dans le cadre d'une surveillance déclarée où l'opérateur de la centrale connaît l'existence du détecteur. Les données neutrinos permettent un recoupement avec les déclarations de fonctionnement, complémentaire à tous les autres moyens de surveillance actuels.



Les photomultiplicateurs de Nucifer regardent la lumière émise lors de l'interaction d'un neutrino avec les protons du liquide scintillant.

électrique, on s'attend ainsi à détecter de l'ordre de 1500 neutrinos par jour avec Nucifer.

Les contraintes de réalisation sont imposées par les souhaits des inspecteurs de l'AIEA : le détecteur doit être compact, peu cher, contrôlable à distance et de maintenance très réduite. Nucifer est un partenariat entre la DAM, la DSM et Subatech Nantes. La majeure partie du détecteur est conçue et réalisée à l'Irfu en synergie avec



David Lhuillier, physicien au SPhN, travaille sur les projets double Chooz et Nucifer après avoir exploré la structure des nucléons.

(1) AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique

(2) ILL : Institut Laue-Langevin



# De la physique au cerveau

Par Xavier Charlot et Franck Lethimonnier

**Au-delà des savoirs et des techniques, il est quelquefois primordial d'emprunter les méthodes de travail d'une autre communauté. Pour réaliser Neurospin, la DSV est allée chercher à l'Irfu des compétences techniques mais aussi des ingénieurs susceptibles de gérer ce projet unique de grand instrument.**

**N**eurospin, projet de la DSV, vise à mieux comprendre le fonctionnement, le développement et les pathologies du cerveau humain. La neuro-imagerie est devenue une approche majeure car elle permet l'obtention, de manière atraumatique, d'informations *in vivo* et *in situ* de la physiologie et du fonctionnement du cerveau. La DSV a construit le centre Neurospin où sont développés et utilisés des outils d'imagerie par résonance magnétique (IRM) d'une puissance à ce jour inégalée. Pour relever ce défi, il fallait avoir la capacité de gérer un grand projet aux multiples interfaces et développer

une nouvelle génération d'IRM clinique à très haut champ, nécessitant des aimants supra-conducteurs de grande

taille. Ces besoins ont conduit la DSV à se tourner vers l'Irfu.

A la suite des premières études, le projet s'est scindé en deux : Neurospin incluant la construction du centre et l'intégration d'IRM avec des champs de 3 teslas, 7 teslas destinés à l'homme et de 17 teslas pour l'animal et le projet Iseult qui vise au développement de l'IRM à très haut champ (11,7 teslas) pour faire de l'imagerie humaine « corps entier » dès 2013. Associé à une nouvelle génération d'agents de contraste, il permettra de différencier aux niveaux tissulaire, cellulaire et même moléculaire les tissus sains des tissus malades et ainsi de dépister précocément des pathologies comme la maladie d'Alzheimer, les accidents cardiovasculaires et les tumeurs cérébrales.

Neurospin est une collaboration exemplaire où, sur la base du besoin d'expertise, le « client-DSV » pousse l'expert dans ses limites avec la réalisation de l'aimant d'Iseult qui sera une première mondiale, non seulement par l'intensité de son champ magnétique pour un corps entier mais aussi par ses caractéristiques (stabilité dans le temps et homogénéité dans l'espace). Il constitue un défi que le CEA a décidé de relever notamment grâce aux compétences acquises à l'Irfu dans la réalisation d'aimants pour l'étude des lois fondamentales de l'Univers.

*Vue éclatée de l'aimant Iseult qui permettra de faire une IRM d'un corps entier dans un champ de 11,7 T.*

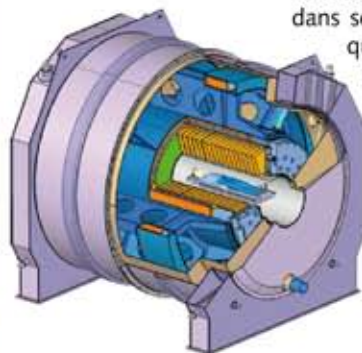
## Le regard de Xavier Charlot (Passé de DSM à DSV)

« Décembre 2002, première lumière de la caméra Megacam. Fin d'un projet début d'un autre. J'entends parler d'un projet à la DSV : « Ils veulent construire un centre de recherche sur le cerveau, ils parlent d'IRM... ils cherchent un chef de projet... ».

Première rencontre marquante avec le responsable du projet, Denis Le Bihan, et le directeur de la DSV de l'époque, André Syrota. J'allais découvrir un autre monde, celui des médecins et des chercheurs en biologie mais également celui des architectes et des entreprises de travaux de bâtiment. Je passais du monde de la maîtrise d'œuvre à celui du maître d'ouvrage.

L'adaptation n'a pas toujours été aisée mais l'expérience acquise à l'Irfu en qualité de chef de projet m'a permis de conserver la sérénité nécessaire à un tel projet.

La remise en question de sa visibilité, le dépaysement scientifique et le changement de communauté ne sont finalement que des obstacles mineurs au regard de l'expérience acquise et de l'élargissement de ses connaissances. »



## Le regard de Franck Lethimonnier (DSV)

« L'Irfu apporte au projet Iseult un savoir-faire indiscutable sur les aimants et l'électromagnétisme, mais surtout une grande expérience du travail en projet avec un objectif à long terme et de nombreux partenaires. La DSV n'a pas cette culture car ses recherches sont basées sur un travail expérimental quotidien qui, suivant le succès ou l'échec d'une expérience, demande un réajustement permanent. L'organisation du travail dans un projet comme Iseult n'est pas du tout la même. De culture DSV, il m'a fallu un peu de temps pour m'adapter et prendre plaisir à travailler en projet. Pour moi, il ne s'agit pas de passer d'une méthode à une autre au cours de ma vie professionnelle, mais de basculer de l'une à l'autre tous les jours, depuis maintenant trois ans. C'est une source d'enrichissement personnel formidable. »



Directeur de la publication : Philippe Chomaz

Directeur scientifique : Vanina Ruhlmann-Kleider Rédacteur en chef : Jean-Luc Sido

Comité éditorial : Maryline Besson, Rémi Chipoux, Olivier Corpore, Philippe Daniel-Thomas, Antoine Drouart, Christian Gouiffès, Florence Hubert-Delisle, Fabien Jeanneau, Sophie Kerhoas-Cavato, Emmanuelle de Laborde, David Huillier, Pierre Manil, Jacques Marroncle, Vanina Ruhlmann-Kleider, Yves Sacquin, Angèle Séné, Didier Vilanova

Secrétariat : Maryline Besson

Mise en page : Christine Morteau

Crédits Photo : CEA - Cern - Deviantart - Gonil - Musée Curie - SHFJ - Neurospin - Imag'In Irfu (Alain Porcher)

Abonnement : Sophie Chastagner Tél : 01 69 08 75 57 ou sophie.chastagner@cea.fr

<http://irfu.cea.fr>

Dépôt légal : Février 2010