



SCIENCES

BÂTIR DE NOUVEAUX MONDES

CNRS EDITIONS

SOMMAIRE

- 6 OUVERTURE
- 9 AU COMMENCEMENT,
LA **LIBERTÉ**
- 19 AU CŒUR
DE LA **MATIÈRE**
- 29 OBSERVER
JUSQU'AUX CONFINS
DE L'**UNIVERS**
- 39 « QU'EST-CE QUE
LA **VIE** ? »
- 49 AU DÉFI
DE LA **TERRE**
- 59 MATHÉMATIQUE,
MATHÉMATIQUES
- 71 SAISIR UN MONDE
EN **MOUVEMENT(S)**
- 83 LA **TRANSITION**
ÉNERGÉTIQUE
- 93 L'**OCÉAN**
COMME LABORATOIRE
- 105 LES **MÉDICAMENTS**,
DU LABORATOIRE
AU PATIENT
- 115 LES **ATOMES**,
UN SIÈCLE APRÈS
JEAN PERRIN...
- 127 L'**INGÉNIERIE** :
UNE SCIENCE,
UN ART...
- 137 LES **NEURONES**
ENTRENT EN SCÈNE...
- 147 L'**INFORMATIQUE** :
UNE SCIENCE À PART
- 157 LES **ÉCONOMISTES**
À LA CONQUÊTE
DU VASTE MONDE
- 167 L'HORIZON **EUROPÉEN**
DU CNRS
- 177 LES **MATÉRIAUX**,
UNE LONGUE HISTOIRE...
- 185 UNE **CHIMIE « VERTE »**
ENRACINÉE
DANS LA SOCIÉTÉ
- 195 **ENVIRONNEMENT**
ET DÉVELOPPEMENT
DURABLE
- 205 LE **CHANGEMENT**
CLIMATIQUE :
ÉTUDIER, COMPRENDRE...
ET AGIR!
- 217 LES AUTEURS
- 221 TABLE DES MATIÈRES

OUVERTURE

Ce n'est pas sans facétie que Jean Perrin, prix Nobel de physique et père fondateur du CNRS, reprend à son compte cette expression évangélique pour la transposer, dans l'entre-deux-guerres, au domaine de la recherche scientifique. Mais derrière la malice du physicien campe une certitude profonde : l'esprit qui doit guider la science ne connaît, à ses yeux, nulle frontière, nul dogme, nulle idéologie, et cette conviction prend d'autant plus de force lorsqu'elle est replacée dans le contexte de la montée des totalitarismes : « On ne peut pas imposer à la chimie d'être marxiste et en même temps favoriser le développement des grands chimistes, on ne peut pas imposer à la physique d'être cent pour cent aryenne et garder sur son territoire le plus grand des physiciens », affirme encore Jean Perrin après que son ami Albert Einstein a fui une Allemagne gagnée par le délire criminel du nazisme.

Mais pour que cet esprit-là puisse souffler avec autant de vigueur que de liberté, il lui faut un foyer solide, qui manque encore cruellement à la France dans les années 1920 et 1930. Depuis plus d'un demi-siècle, Louis Pasteur, Claude Bernard, Pierre et Marie Curie et tant d'autres savants n'ont eu de cesse de déplorer la faiblesse de l'organisation scientifique à travers le pays et la misère dans laquelle végètent les laboratoires, aussi bien au sein des facultés et des écoles que dans des établissements aussi vénérables que le Collège de

« L'ESPRIT SOUFFLE OÙ IL VEUT... »

France ou le Muséum national d'histoire naturelle. La croisade qu'entreprend alors Jean Perrin, en obtenant chemin faisant le soutien du gouvernement de

Front populaire et de cet homme d'État exceptionnel que fut le ministre de l'Éducation nationale Jean Zay, aboutit le 19 octobre 1939 à la création d'un organisme ambitieux et sans équivalent, le CNRS.

Regroupant à l'origine une quarantaine de laboratoires et un peu plus de six cents employés, le CNRS a dû œuvrer dans l'urgence à la mobilisation scientifique du pays, avant de subir avec tous les Français la débâcle, la capitulation et l'isolement forcé de l'Occupation. Que de chemin parcouru depuis ! Aujourd'hui, le « navire amiral de la recherche française » est investi dans tous les champs du savoir, et confronté à des défis qui, s'ils sont heureusement différents, ne sont pas moins gigantesques qu'en 1939. C'est sur ce chemin, ce sont sur ces champs et ces défis d'hier à aujourd'hui, que l'ouvrage que vous avez entre les mains se propose de lever un coin du voile.

Pourquoi un coin du voile seulement ? Depuis 80 ans, d'innombrables études, travaux et programmes de recherche ont été menés à bien par le CNRS, en lien avec l'ensemble de ses partenaires en France, en Europe et à l'international. Sans cesse, de nouvelles

idées, de nouvelles observations, de nouvelles découvertes continuent de jaillir des laboratoires. Il n'était bien sûr pas envisageable d'en dresser le tableau exhaustif! Mais les 80 textes réunis ici, rédigés par des experts de tous les domaines, offrent un aperçu que nous avons voulu le plus large possible des nouveaux mondes que la science a permis de construire ou qu'elle concourra à bâtir, en perçant chaque jour un peu plus les secrets de la vie, de la matière et de l'Univers, en s'appliquant à comprendre notre planète et les populations qui la peuplent, en mobilisant tous les savoirs et les technologies qui contribueront à les protéger des risques environnementaux, sanitaires et climatiques qui les menacent...

Ces textes, loin de former un morne défilé de projets autonomes, sont tous étroitement et activement connectés, comme le sont les recherches qu'ils dépeignent. En les lisant à la file ou en passant de l'un à l'autre au gré de ses envies, chacun pourra ainsi constater les liens qui unissent l'ensemble des thématiques et des enjeux, et, surtout, la manière dont tous les fronts de la connaissance avancent de conserve, en se nourrissant les uns des autres, des études qui semblent a priori les plus abstraites aux travaux apparemment les plus finalisés... Même cette distinction-là d'ailleurs, entre une recherche envisagée comme « fondamentale » et une autre qui apparaîtrait de prime

abord plus « appliquée », disparaît au fil de la lecture. Louis Pasteur l'avait déjà exprimé en une formule aussi belle que percutante il y a quelque 150 ans, et 70 ans avant la naissance du CNRS : « Non, mille fois non, il n'existe pas une catégorie de sciences auxquelles on puisse donner le nom de sciences appliquées. *Il y a la science et les applications de la science*, liées entre elles comme le fruit à l'arbre qui l'a porté. » Le constat demeure plus valide que jamais : chaque projet renferme de formidables opportunités pour l'avenir, comme autant de pierres pour l'édification de nouveaux mondes.

Parcourons donc ensemble quelques-uns de ces mondes, souvent surprenants, toujours riches et enthousiasmants, et reposant tous, sans aucune exception, sur un idéal qu'il appartient à la science de défendre pour que l'esprit puisse continuer de souffler où il veut : la liberté. Car c'est bien avec elle, en effet, qu'il faut débiter...

Denis Guthleben, historien,
attaché scientifique au Comité pour l'histoire du CNRS.



AU COMMENCEMENT,
LA **LIBERTÉ**

33 000 CHERCHEURS, INGÉNIEURS ET TECHNICIENS. PLUS DE 1100 LABORATOIRES, PRÉSENTS PARTOUT EN FRANCE ET À TRAVERS LE MONDE, ET ASSOCIANT DES PARTENAIRES PRESTIGIEUX. DES RÉSULTATS EXCEPTIONNELS, OBTENUS DANS TOUS LES CHAMPS DE LA CONNAISSANCE, PARTAGÉS ET VALORISÉS AU BÉNÉFICE DE LA SOCIÉTÉ. IL NE FAUT PAS AVOIR PEUR DES MOTS : LE CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE EST UN ÉTABLISSEMENT UNIQUE. SOUVENT, D'AILLEURS, SON ORIGINALITÉ SURPREND. PARFOIS, ELLE SUSCITE MÊME QUELQUES CRITIQUES... MAIS D'OÙ VIENT LE CNRS ? IL EST LE FRUIT D'UNE HISTOIRE, INAUGURÉE À L'AUBE DE LA SECONDE GUERRE MONDIALE, MAIS DONT LES ORIGINES REMONTENT BIEN PLUS TÔT.

Le CNRS et la guerre

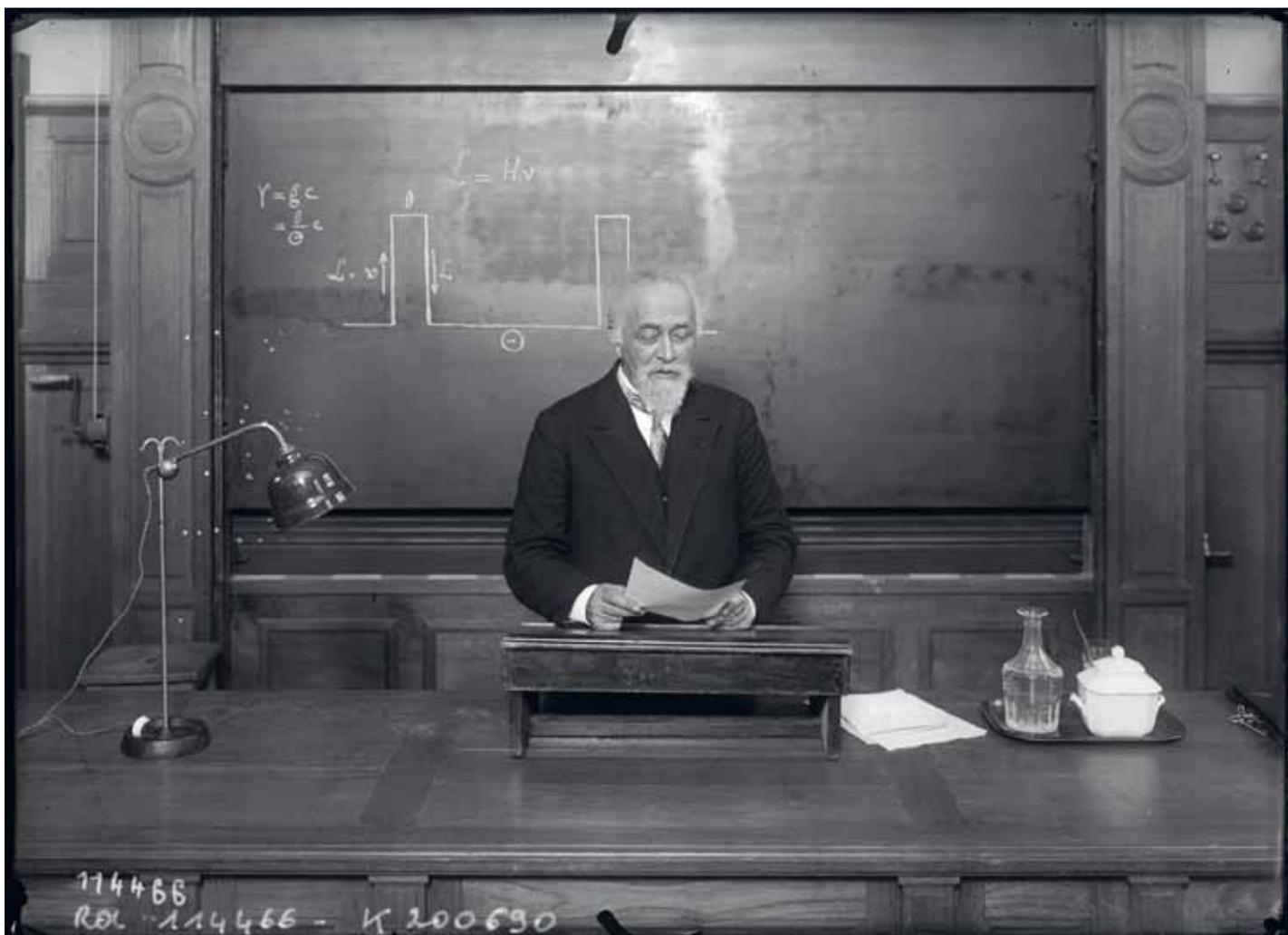
23 septembre 1939. Depuis quatre semaines, la Wehrmacht s'est lancée à l'assaut de la Pologne. Dans la foulée, l'Angleterre et la France ont déclaré la guerre au Troisième Reich. Le monde vient de basculer dans l'abîme... À Paris, le physicien Jean Perrin, président du Conseil supérieur de la recherche, prend la parole à la radio. Il évoque le rôle des scientifiques dans la mobilisation générale, et annonce la création d'un établissement chargé de la conduire : le CNRS voit officiellement le jour le 19 octobre suivant, à la faveur d'un décret du président de la République Albert Lebrun. Les circonstances, bien sûr, ont pesé sur sa naissance. Face à un conflit qui s'annonce total, tous les moyens du pays sont mis en ordre de bataille. Les scientifiques vont imaginer des dispositifs pour équiper, défendre, soigner ou ravitailler les troupes et la population. Parmi

les réalisations, le jeune physicien Louis Néel conçoit un procédé ingénieux permettant de protéger les navires contre les mines magnétiques que l'Allemagne disperse en mer : après avoir fait ses preuves au large des côtes françaises, il sera aussi adopté par la puissante Ammirauté britannique.

Une longue genèse

Né dans un monde en guerre, le CNRS n'a toutefois pas été échafaudé pour la guerre : sa création découle moins des circonstances tragiques de l'année 1939 que d'un long cortège de réflexions sur le rôle et la place de la recherche en France. Au moins depuis les années 1860, les savants n'ont eu de cesse de déplorer « la faiblesse de notre organisation scientifique » – *dixit* Louis Pasteur – et « la misère de nos laboratoires » – l'expression, de Claude Bernard, a été reprise au fil des décennies, en particulier par Pierre et Marie Curie. Chemin faisant, des personnalités de tout bord les ont rejointes : c'est le cas, à l'aube des années 1920, de Léon Blum ou, à l'opposé, de Maurice Barrès, qui note dans un ouvrage paru en 1925 que « cette misère est indigne de la France, indigne de la Science »...

L'année suivante, Jean Perrin, récompensé par le prix Nobel de physique « pour ses travaux sur la discontinuité de la matière », reprend ce flambeau. Avec le soutien de la Fondation Rothschild, il parvient tout d'abord à créer l'Institut de biologie physico-chimique (IBPC). Placé à la pointe de la science, ce dernier constitue aussi et surtout, au travers de ses missions aussi bien que dans son fonctionnement, un modèle pour une organisation nationale de la recherche. Fort de ce premier succès, Jean Perrin obtient du gouvernement Herriot la mise en place en 1930 d'une Caisse nationale des sciences, puis conduit Édouard Daladier à établir en 1933 un Conseil supérieur de la recherche, destiné à proposer les orientations d'une politique scientifique en gestation.



Jean Perrin, « père fondateur » du CNRS, dans l'amphithéâtre de son laboratoire de chimie-physique en 1926. L'année de son prix Nobel de physique.

L'année 1936 pose un jalon. Après la victoire du Front populaire, Léon Blum désigne, à l'Éducation nationale, un député radical jeune et volontaire, Jean Zay. À ses côtés, un sous-secrétariat d'État à la Recherche est inauguré. Irène Joliot-Curie y est d'abord désignée, mais elle renonce vite à ses fonctions pour reprendre le chemin de son laboratoire. Jean Perrin la remplace au pied levé : il « déploya aussitôt la fougue d'un jeune homme, l'enthousiasme d'un débutant, non pour les honneurs, mais pour les moyens d'action qu'ils fournissaient », relève Jean Zay dans ses mémoires. À l'initiative des deux hommes, les réalisations se succèdent : un service central de la recherche est créé au

ministère, et de nouveaux laboratoires sortent de terre. Plusieurs d'entre eux sont promis à un bel avenir, à l'image de l'Institut d'astrophysique de Paris, qui marque comme l'IBPC une union des disciplines, cette fois-ci entre astronomes et physiciens, ou de l'Institut de recherche et d'histoire des textes, qui témoigne de la volonté d'inclure, dès l'origine, les sciences humaines dans ce mouvement. Et, déjà, l'idée d'une grande institution nationale est évoquée. La chute du gouvernement Blum en 1937 et les tensions internationales l'année suivante retardent sa naissance : le CNRS, enfant – posthume – du Front populaire, ne voit finalement le jour qu'en octobre 1939.

Une ambition, une conviction et un idéal

Loin d'être une création *ex nihilo*, dictée par les seules nécessités militaires du moment, le CNRS apparaît donc comme le fruit d'une aspiration partagée par de nombreuses personnalités politiques et scientifiques, des hommes et des femmes – outre Irène Joliot-Curie, la chimiste Pauline Ramart-Lucas, l'ethnologue Germaine Tillion, l'historienne Jeanne Vielliard ont participé aux premiers pas du CNRS – rassemblés autour d'une même conviction, et partageant un même idéal. La conviction : la France et, à leurs yeux, l'humanité tout entière tireront profit d'une meilleure organisation de la recherche scientifique. Et l'idéal : celui de la liberté, que cette organisation doit proclamer et garantir au moment même où elle est partout menacée, et maintenir ensuite bien au-delà du conflit.

Dans son intervention radiodiffusée annonçant la naissance du CNRS, Jean Perrin l'avait affirmé : « Il n'est pas de science possible où la pensée n'est pas libre, et la pensée ne peut pas être libre sans que la conscience soit également libre... Chacun de nous peut bien mourir, mais nous voulons que notre idéal vive ! » Au lendemain de la guerre, la Nation n'a pas tardé à reconnaître sa dette à l'égard de l'architecte du CNRS : en 1948, six ans après son décès en exil à New York, elle lui a fait

les honneurs du Panthéon. Plus récemment, en accueillant le ministre Jean Zay dans son Temple, en même temps que trois autres grandes figures de la Résistance dont Germaine Tillion, elle a une nouvelle fois réuni les pères fondateurs du CNRS.

Depuis sa création, l'établissement, qui ne comptait alors qu'un millier de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens répartis dans une quarantaine de laboratoires, s'est développé et, c'est une évidence, profondément transformé. Il continue néanmoins de puiser dans ses origines des réponses aux défis contemporains : entretenir une grande ambition nationale et, de plus en plus, internationale en faveur de la recherche, rapprocher les hommes et les disciplines, et entretenir cette liberté que le CNRS a inscrite depuis 80 ans au faîte de ses valeurs... ■



Jean Zay, ministre de l'Éducation nationale du Front populaire, dans son bureau en 1936. Il contribue à la création d'un service central de la recherche et de nouveaux laboratoires.



En 1930, année de son inauguration officielle, l'Institut de biologie physico-chimique se plaçait à la pointe des laboratoires français. Ses brillants résultats inspirent une réforme de l'organisation scientifique du pays.

UNE ÉTINCELLE ORIGINELLE...

L'Institut de biologie physico-chimique (IBPC) campe le long de la rue Pierre-et-Marie-Curie, à Paris, depuis son inauguration en 1930 – à l'époque, elle ne portait encore que le seul nom de « Pierre-Curie ». Connue pour son rôle dans l'émergence et les développements de la biologie moléculaire, il héberge aujourd'hui cinq unités de recherche relevant des instituts des sciences biologiques et chimiques du CNRS. Entre leurs murs, de grandes découvertes ont été réalisées, qui ont contribué à une meilleure compréhension du vivant – parmi elles, des enzymes gouvernant la durée de vie des ARN messagers bactériens, les principes dictant la biogénèse de la photosynthèse et les mécanismes d'émission d'oxygène par les plantes, ou la synthèse

des amphipols, des molécules irremplaçables pour l'étude des structures des protéines des membranes cellulaires. Des outils uniques y ont aussi été conçus, tels que des logiciels de représentation spatiale de structures macromoléculaires complexes. Mais, pour le CNRS, l'IBPC représente plus qu'une fédération de laboratoires dynamiques : c'est ici qu'a été allumée l'étincelle qui a conduit à la naissance de l'établissement...

L'IBPC est le fruit d'une rencontre. En 1921, le baron Edmond de Rothschild, ému par les difficultés que connaissent les savants dans un pays ruiné par la Grande Guerre, crée une fondation pour soutenir leurs travaux. Jean Perrin compte parmi ses bénéficiaires. Auréolé du prix Nobel

de physique en 1926, il soumet au banquier philanthrope le projet d'un institut d'avant-garde, tant dans son organisation que dans son objet : réunir des biologistes, des physiciens et des chimistes dans un même lieu, où ils pourront étudier librement les bases physico-chimiques de la vie. Il s'agit en somme d'encourager l'« interdisciplinarité » : le mot n'existe pas encore, mais l'ambition est déjà présente !

Ce n'est pas tout : dans cet institut œuvreront des femmes et des hommes dont l'unique mission consistera, selon une belle formule de Jean Perrin, à « percer les secrets les plus dissimulés de la Nature ».

Pour qualifier ces travailleurs scientifiques employés à plein temps devant leurs paillasses, un autre mot

s'impose peu à peu dans l'usage courant : on ne parle plus de « savants », mais de « chercheurs ». Pour autant, l'IBPC n'est pas conçu comme leur tour d'ivoire. Précisément parce que le progrès des connaissances est le seul objectif de l'institut, la France ne manquera pas d'en tirer les plus grands profits. Edmond de Rothschild en a l'intime conviction : « en mettant ses personnels à l'abri des besoins matériels », leurs découvertes « peuvent apporter une contribution puissante au progrès économique du pays ».

Lorsque l'IBPC est inauguré le 22 décembre 1930, il est salué comme l'institut le plus moderne de France. Le modèle original qu'il propose et les brillants résultats qu'il produit d'emblée ne tardent pas à inspirer une réforme plus large de l'organisation scientifique du pays : une recherche libre, reposant sur le rapprochement des disciplines et le recrutement de professionnels, chercheurs et auxiliaires techniques, concourant à l'essor et au rayonnement de la France... pourquoi ne pas tenter d'étendre cette expérience à tout l'Hexagone ? Bien des efforts seront nécessaires pour aboutir à sa création une décennie plus tard, mais l'esprit du CNRS plane déjà entre les murs de l'IBPC! ■



Grand découvreur dans le domaine du magnétisme, Louis Néel incarne la recherche désintéressée pouvant trouver des applications dans des domaines divers. Il a aussi été un grand bâtisseur en faisant de Grenoble un pôle scientifique de rayonnement international : ici, une expérience d'électrostatique conduite dans son laboratoire dans les années 1960.

LA RECHERCHE « DÉSINTÉRESSÉE » ET SES APPLICATIONS

Peu avant la naissance du CNRS, Jean Perrin avait résumé ses efforts en quelques envolées lyriques : l'organisation scientifique qui se mettait en place en France, en permettant à la recherche d'être poursuivie « sans avoir d'autre but que la découverte désintéressée de l'inconnu », visait à « élargir l'esprit humain en créant une forme nouvelle d'Art et de Beauté ». Mais elle portait aussi l'espoir de retombées certaines : « C'est qu'en effet un accroissement de savoir permet presque toujours quelque utilisation, quelque invention, qui se trouvait jusqu'alors imprévisible »...

D'emblée, le CNRS s'est préoccupé de valoriser ses travaux, et ses premiers laboratoires ont noué des liens avec de nombreux partenaires. Un exemple en témoigne : celui du physicien Louis Néel. Mobilisé pendant la « drôle de guerre », il met ses compétences au service de la Marine, pour lutter contre les mines magnétiques que l'Allemagne mouille au large des côtes françaises. Plusieurs tragédies ont été causées par ces engins redoutables, qui n'explorent pas au contact des navires mais réagissent au passage de leur masse métallique. En concevant un procédé efficace d'immunisation magnétique des bateaux, le chercheur parvient à écarter la menace ! Réfugié à Grenoble après la défaite,

Louis Néel y fonde un laboratoire travaillant avec les industriels du cru. Un contrat pour la fabrication d'aimants permanents, signé avec Ugine, permet à l'entreprise de diversifier sa production, et au chercheur de trouver de nouveaux financements – il les emploie en particulier pour abriter des scientifiques juifs, en péril sous l'Occupation. Les relations se diversifient à la Libération, en même temps que les activités du laboratoire. Dès 1946, elles conduisent à la création en son sein de la SAMES, une société anonyme de machines électrostatiques qui reste aujourd'hui encore à la pointe du marché mondial des systèmes de projection de peinture pour l'automobile et l'industrie.

Bien des années après la disparition du physicien, dont les travaux théoriques de magnétisme ont été couronnés par le prix Nobel en 1970, l'Institut Néel de Grenoble s'attache toujours à valoriser les techniques conçues pour la recherche fondamentale et pouvant déboucher sur des applications dans les domaines de l'énergie, de l'instrumentation, des matériaux ou de la santé. La mise au point d'un procédé innovant pour le stockage de l'hydrogène sous forme solide a ainsi conduit en 2008 à la création de la société McPhy Energy. D'autres start-up sont en train de naître, à l'image de MOiZ, qui repose sur un savoir-faire unique dans les mesures de chaleur spécifique à très basse température. Il a abouti à la fabrication de micro-générateurs, qui tirent des fluctuations thermiques de l'air ambiant assez d'électricité pour alimenter des micro-capteurs. Lauréat en 2018 du concours i-Lab d'aide à la création d'entreprises innovantes, MOiZ fournit une solution durable de récupération d'énergie pour l'alimentation d'objets connectés, qui fonctionneront ainsi sans piles, ni fils électriques ! ■

GERMAINE TILLION, SCIENCE, JUSTICE ET VÉRITÉ

« Toute ma vie j'ai voulu comprendre la nature humaine, le monde dans lequel je vivais »... Née en 1907, disparue en 2008, Germaine Tillion a été une observatrice éclairée du XX^e siècle, autant qu'une actrice engagée : « Je pense, de toutes mes forces, que la justice et la vérité comptent plus que n'importe quel intérêt politique. » Cette conviction, elle l'a défendue jusqu'aux heures les plus sombres de l'histoire. Élève de l'École du Louvre et de l'École pratique des hautes études, diplômée de l'Institut d'ethnologie en 1932, elle part étudier les tribus berbères de l'Aurès, un territoire montagneux de l'Est algérien. Au terme d'un travail de longue haleine, achevé avec le soutien du CNRS à partir d'octobre 1939, elle rentre en France quelques mois plus tard pour assister au naufrage du pays : la débâcle, l'armistice, et la collaboration que prône le maréchal Pétain...

Germaine Tillion rejoint la Résistance dès 1940, au sein du réseau du Musée de l'Homme d'abord, puis, lorsque les efforts conjugués de l'occupant et de la police de Vichy finissent par le décimer, parmi d'autres groupes actifs. Arrêtée en août 1942, elle est enfermée à la Santé, transférée à Fresnes, puis déportée à Ravensbrück. Dans l'enfer de ce camp où périt sa mère Emilie, l'ethnologue analyse l'univers concentrationnaire : « Pour mieux condamner le système, je l'ai étudié comme une société de sauvages, une famille de chacals »... Libérée le 23 avril 1945, elle entreprend avec le soutien du CNRS une vaste étude sur les femmes déportées. Dévouée corps et âme à ce travail, elle pense tirer un trait sur ses recherches de jeunesse : « J'avais dit adieu à l'Algérie. » Mais ce n'était, en réalité, qu'un au revoir. En 1954, elle traverse à nouveau la Méditerranée. La date n'est pas neutre dans l'histoire algérienne. Elle voit les premiers accrochages entre l'armée et le FLN. En métropole, on parle d'« événements ». Mais, sur le terrain, c'est bel et bien une guerre qui débute. Au cœur de ce nouveau drame, Germaine Tillion prend position, surtout lorsqu'il s'agit de condamner les prisons et la torture. Les menaces la laissent imperturbable. Après la signature des accords d'Évian, elle peut se consacrer entièrement à ses

activités scientifiques. Des missions du CNRS lui permettent de se rendre en Algérie, en Libye, au Maroc et en Tunisie, puis au Mali, en Mauritanie et au Niger. Ses engagements se succèdent au fil des années : en faveur de l'éducation, pour les droits des femmes, aux côtés des survivants du goulag, avec les exclus de tout bord, à travers le monde et jusqu'au cœur de Paris, parmi les sans-papiers de l'église Saint-Bernard, à qui elle apporte en 1996 le soutien de ses 89 printemps et l'expérience d'une vie de combat. Le 27 mai 2015, Germaine Tillion est entrée au Panthéon. La Nation a ainsi pu rendre hommage à la Résistance, celle qui n'a jamais plié, à la Femme, dans ce temple de la République qui demeure surtout celui des « grands hommes », et à la Science, dans ce qu'elle a de plus admirable... ■



« TOUTE MA VIE
J'AI VOULU COMPRENDRE
LA NATURE HUMAINE,
LE MONDE DANS LEQUEL
JE VIVAIS. »

Germaine Tillion

Dans les années 1930, alors qu'en France le CNRS est en gestation, Germaine Tillion mène ses recherches en Algérie, partageant la vie des tribus qu'elle étudie...

The background is a complex composition of geometric patterns. At the top, there are blue diagonal stripes. Below them, a series of concentric, jagged lines in blue and gold create a sense of depth and movement. The central text is set against a white background with a gold zigzag pattern. To the left, there are horizontal blue lines, and to the right, a pattern of diagonal blue lines. At the bottom, there are vertical gold lines, a blue and white checkered pattern, and a series of horizontal blue stripes.

AU CŒUR
DE LA **MATIÈRE**

**LA PHYSIQUE A PROGRESSÉ
CONSIDÉRABLEMENT CES 80 DERNIÈRES
ANNÉES ET TOUT PARTICULIÈREMENT
DANS LA CONNAISSANCE
DE L'ORGANISATION INTIME DE LA
MATIÈRE. GRÂCE À LA PHYSIQUE
NUCLÉAIRE ET À LA PHYSIQUE DES
PARTICULES, LA STRUCTURE DE
L'ATOME ET SES COMPOSANTS ULTIMES
SONT DE MIEUX EN MIEUX CONNUS.**

Physique nucléaire et physique des particules

En 1952 un partage des rôles était établi entre le CNRS, chargé, depuis 1945, de « développer, orienter et coordonner les recherches de tous ordres », et les universités : ces dernières fourniraient aux laboratoires leurs crédits de fonctionnement et le CNRS financerait les gros équipements. Deux ans plus tard, le Cern était créé, et en 1971 tous les laboratoires français de physique subatomique, hors CEA, étaient regroupés au sein du CNRS, via l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3). Aux côtés de la physique nucléaire, qui étudiait la structure du noyau atomique et les réactions nucléaires, la physique des particules avait pour missions d'identifier les constituants ultimes de la matière, et d'étudier l'interaction électromagnétique, l'interaction faible, responsable de la radioactivité bêta (émission d'un électron ou d'un positron par un noyau instable), et l'interaction forte, qui explique la cohésion des atomes. À l'astrophysique nucléaire, née en 1938 avec les travaux de Hans Bethe, vint s'ajouter l'astrophysique des particules. Quant à la physique des ions lourds, elle avait pris son essor en France dans les années 1960 à l'Institut de physique nucléaire d'Orsay.

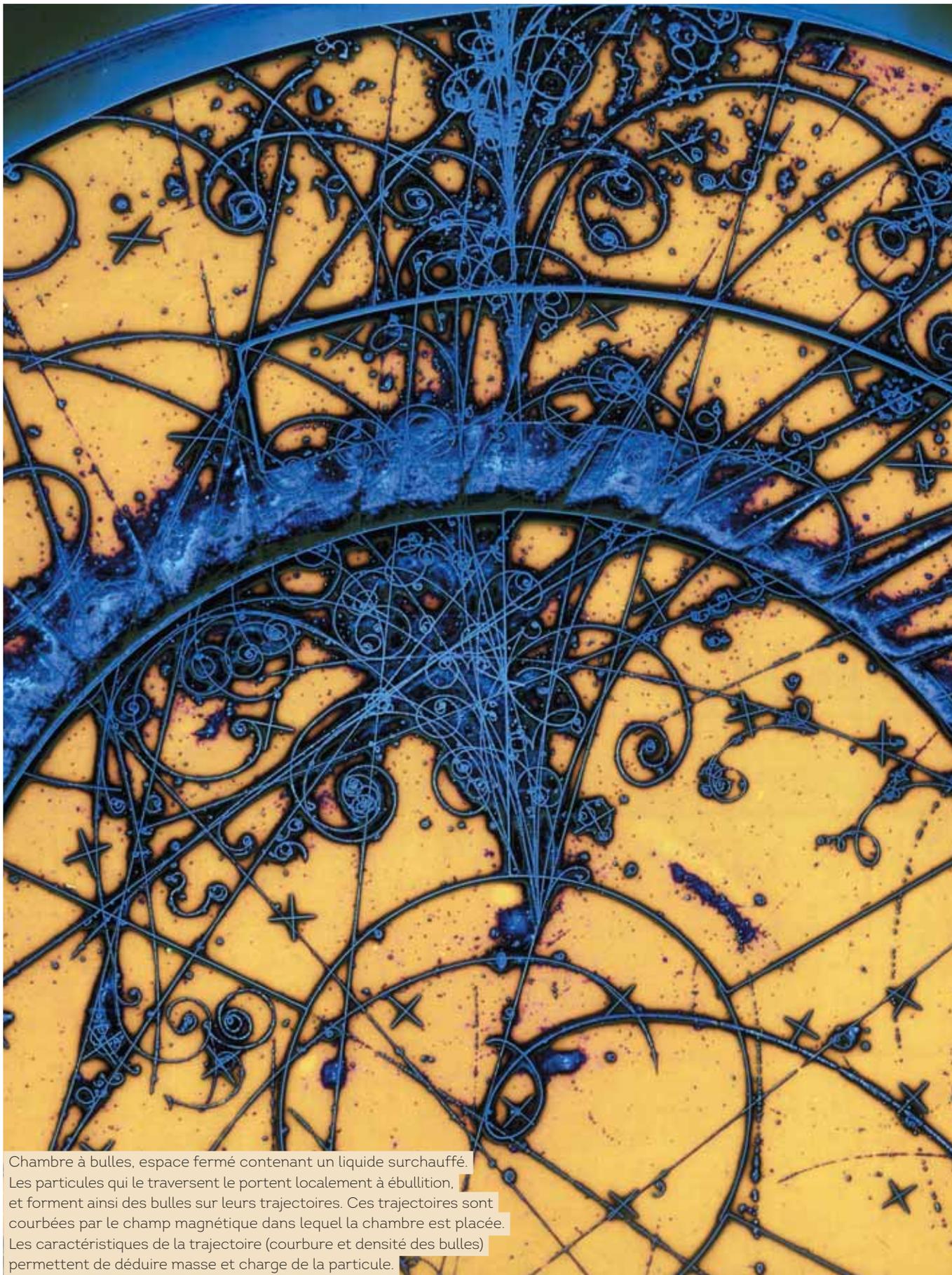
Accélérateurs, spectromètres et détecteurs

Un accélérateur de particules permet d'amener des particules chargées électriquement (des électrons ou des ions) à des vitesses très élevées. Ces particules ainsi accélérées sont utilisées pour bombarder des atomes, et modifier leur noyau par des réactions nucléaires. Les produits de ces réactions sont analysés par des

spectromètres et observés dans des détecteurs. Dans les accélérateurs électrostatiques et les accélérateurs linéaires, la trajectoire des particules est rectiligne. Dans un synchrotron, elle est circulaire. Dans un cyclotron, ou un synchrocyclotron, elle est en forme de spirale. Les énergies en jeu, mesurées en électronvolts, sont considérables, et plus elles sont élevées, plus on peut scruter le cœur de la matière. Très peu d'accélérateurs existaient en France au début de la Seconde Guerre mondiale, et il ne s'agissait que de machines de basses énergies. À la fin des années 1950, un synchrotron à protons de 3 gigaélectronvolts (GeV) fut construit à Saclay, un synchrocyclotron à protons de 150 mégaélectronvolts (MeV) et un accélérateur linéaire d'électrons de 1,3 GeV sur le campus d'Orsay. Vinrent ensuite les accélérateurs du Cern, largement ouverts aux physiciens français : un synchrocyclotron de 600 MeV, puis un ensemble d'anneaux injectant les uns dans les autres qui portèrent les énergies de collision de 25 GeV en 1959 à 13 000 GeV en 2014 !

Les accélérateurs d'ions plus lourds que l'hélium (ion de masse atomique égale à 4) fleurirent entre 1970 et 1983, année qui vit le démarrage du Grand accélérateur national d'ions lourds (Ganil) à Caen. L'autre machine nationale, le synchrotron Saturne II, produisit, de 1978 à 1997, des faisceaux de protons de 3 GeV et d'ions lourds jusqu'à 1,15 GeV par nucléon (le mot nucléon désigne les protons et les neutrons du noyau). Enfin, deux Van de Graaff Tandem, l'un à Orsay, l'autre à Strasbourg, accélèrent des protons et des ions lourds de plus faible énergie mais dont l'énergie était définie de façon bien plus précise.

Les détecteurs évoluèrent aussi de façon considérable à partir de 1960. Les chambres à bulles, comme Gargamelle, qui permettaient d'observer la trajectoire des particules qui les traversaient, et d'en déduire masse et charge, régnèrent dans les années 1970. Ensuite, grâce aux progrès de l'électronique, elles furent remplacées par des ensembles gigantesques associant des milliers de détecteurs (scintillateurs, chambres d'ionisation, compteurs Geiger-Müller, compteurs proportionnels multifils de Georges Charpak, prix Nobel 1992, etc.). En physique des particules, certains de ces ensembles portaient des noms évocateurs comme Delphi ou Atlas, un géant de 46 m de long, 25 m de large et 25 m



Chambre à bulles, espace fermé contenant un liquide surchauffé. Les particules qui le traversent le portent localement à ébullition, et forment ainsi des bulles sur leurs trajectoires. Ces trajectoires sont courbées par le champ magnétique dans lequel la chambre est placée. Les caractéristiques de la trajectoire (courbure et densité des bulles) permettent de déduire masse et charge de la particule.

de haut, encore opérationnel aujourd'hui. En physique nucléaire, les détecteurs étaient de dimensions plus modestes, mais chacun d'eux visait un objectif précis, et leurs noms étaient tout aussi poétiques : le Château de cristal, Amphora, Indra, Must...

Placés entre le point de collision et les détecteurs, ou intégrés aux ensembles de détection, les analyseurs magnétiques, ou spectromètres, jouèrent aussi un rôle important pour l'identification des particules émises et la mesure précise de leur énergie. Sur Saturne II, il y eut ainsi SPES I, SPES II, etc., et au GaniI, Alpha, Lise et le spectromètre de haute résolution SPEG.

De grandes découvertes...

Des nombreux thèmes d'études ont été abordés avec succès. Parmi eux, le modèle standard de la physique des particules est l'aboutissement d'une cinquantaine d'années de recherches menées au niveau mondial. Cette théorie traite des composants ultimes de la matière – et de leurs antiparticules – ainsi que des forces qui assurent sa cohésion. Deux classes de constituants élémentaires ont été identifiées : les quarks, qui sont au cœur des protons, neutrons et mésons, et les leptons, qui vont par paires. À chaque lepton chargé (électron e , muon μ , tauon τ) est associé un lepton neutre ou neutrino (ν_e, ν_μ, ν_τ). Toutes ces particules ont une masse et sont donc soumises à la gravitation. L'étude des trois autres forces fondamentales (électromagnétique, faible et forte) entre dans le cadre du modèle standard. Elles agissent via des échanges de bosons, dits « médiateurs », qui sont respectivement le photon, le Z, les W et les gluons. L'interaction forte n'agit que sur les quarks, l'interaction électromagnétique agit sur les quarks et les leptons chargés, et l'interaction faible sur les trois types de particules. Aujourd'hui, toutes les hypothèses ayant servi à construire cette théorie ont été validées par l'expérience.

L'unification de ces trois forces fondamentales est depuis longtemps l'un des objectifs majeurs de la physique des particules : elles sont pour l'instant décrites avec des constantes différentes, et il est naturel, en physique, de chercher à simplifier les descriptions en les unifiant. Une avancée déterminante, la découverte des courants neutres, fut réalisée en 1973 par l'équipe Gargamelle, dirigée par André Lagarrigue. Placée dans

	masse →	charge →	spin →
QUARKS	$\approx 2,3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$
	$\approx 1275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$
	$\approx 173,07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$
	$\approx 4,8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$
	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$
	$\approx 4,18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$
LEPTONS	$0,511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$
	$105,7 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$
	$1,777 \text{ GeV}/c^2$	-1	$1/2$
	$< 2,2 \text{ eV}/c^2$	0	$1/2$
	$< 0,17 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$
	$< 15,5 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$
BOSONS DE JAUGE	0	0	0
	$91,2 \text{ GeV}/c^2$	0	0
	$80,4 \text{ GeV}/c^2$	± 1	1
	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$	0	0

un faisceau secondaire du Cern, la grande chambre à bulles détecta une collision très particulière d'un neutrino muonique avec un électron du gaz, qui s'interprétait, selon la théorie quantique des champs par l'échange d'une particule neutre, le boson Z^0 . Ce courant neutre faible venait s'ajouter aux courants chargés (échanges de bosons W^+ ou W^-) qui avaient été observés précédemment. Cette découverte capitale entraînait la possibilité d'unifier l'interaction faible et l'interaction électromagnétique, c'est-à-dire de les inclure dans un même formalisme théorique. Les bosons W^+ , W^- et Z^0 furent produits et identifiés au Cern dans des collisions proton-antiproton en 1983, puis créés en grands nombres et étudiés au LEP (Large Electron Positron collider). Contrairement au photon, ces trois bosons ont une masse non nulle. Pour expliquer cette différence, il faut faire appel à un mécanisme de brisure de symétrie. La théorie prévoit en effet qu'à très haute température, dans les premiers instants de l'Univers, les deux interactions sont totalement unifiées (symétrie totale). Cette symétrie est brisée lorsque la température s'abaisse, et c'est alors que les bosons W^+ , W^- et Z^0 acquièrent une masse. Ce mécanisme fut décrit dans les années 1960 par plusieurs théoriciens parmi lesquels Peter Higgs. Il impliquait l'existence d'un nouveau boson, appelé communément boson de Higgs, qui fut identifié au LHC (Large Hadron Collider), le grand collisionneur de protons du Cern, en 2012, 50 ans après la réalisation de l'anneau de collision d'Orsay (ACO), un pionnier des collisionneurs de particules.

Tableau des particules élémentaires d'après le modèle standard. À gauche, les constituants de base de la matière (quarks et leptons); à droite, les vecteurs des interactions fondamentales, encore appelés bosons de jauge (*gauge bosons*), et le boson de Higgs.

Enfin, la production de faisceaux d'ions lourds radioactifs (qui sont des noyaux instables n'existant pas dans la nature) – et la découverte de noyaux exotiques (noyaux radioactifs de très grande instabilité) – fut développée notamment au Ganil. Dès les premières années de fonctionnement du spectromètre Lise, en 1984, il fut démontré que des faisceaux secondaires d'ions radioactifs pouvaient être produits en bombardant des cibles de carbone ou de béryllium, notamment par des faisceaux d'isotopes stables comme l'argon 40 (noté ^{40}Ar , dont le noyau est constitué de 40 nucléons). Les noyaux instables ainsi produits pouvaient être étudiés en tant que tels pour préciser leurs propriétés, ou utilisés comme projectiles pour initier des réactions nucléaires inédites (faisceaux radioactifs). C'est ainsi qu'à la fin des années 1980 purent être étudiés les noyaux à halo comme ^{11}Li (lithium 11), qui possède huit neutrons pour trois protons seulement, et dont deux des neutrons occupent un halo, ce qui lui donne un rayon bien supérieur à celui de ses voisins. Par la suite, d'autres noyaux étranges furent découverts, comme l'hydrogène 7, de durée de vie extrêmement faible, synthétisé au Ganil en 2007 et le noyau-bulle ^{34}Si (silicium 34), dont la densité de protons est plus faible à l'intérieur qu'à la périphérie, découvert en 2016 aux États-Unis par une équipe dirigée par des chercheurs français. ■

Intérieur du cyclotron CIME, conçu pour accélérer les particules radioactives.



LA COURSE AUX ACCÉLÉRATEURS

Un laboratoire de physique nucléaire est créé à Orsay à la fin des années 1950 par l'union de chercheurs issus de l'Institut du radium et du Collège de France, sur un terrain trouvé par Irène Joliot-Curie. C'est d'abord Frédéric Joliot qui le dirige, son épouse étant décédée en 1956. Mais il meurt à son tour en 1958, peu après le démarrage du synchrocyclotron qu'Irène y a fait construire. Sous la direction de Jean Teillac, il prend le nom de Laboratoire Joliot-Curie qu'il conserve jusqu'en 1966, date à laquelle il devient l'Institut de physique nucléaire d'Orsay (IPN). Dans les années 1960, il bénéficie de la vague d'embauches et des importants crédits attribués à la recherche. Deux nouveaux accélérateurs sont construits, un cyclotron à ions lourds, qui deviendra l'ensemble Alice par l'adjonction d'un injecteur linéaire en 1970, puis un Tandem, en 1972. L'Institut atteindra son apogée dans les années 1980, avec un effectif de 600 personnes réparties en trois divisions (physique nucléaire, chimie nucléaire et radiochimie, physique théorique). L'IPN fut doté, dès son origine, d'une solide infrastructure administrative, et de puissants services techniques (mécanique, électronique, cryogénie, puis informatique). Ses spécialistes des accélérateurs joueront un rôle majeur dans la conception et la construction du Ganil. L'IPN constitue dès lors une structure pratiquement



Intérieur du bras ouest de 3 km dans lequel circule l'un des deux faisceaux du laser infrarouge de l'interféromètre Virgo à Cascina, près de Pise. Ce détecteur capable de mesurer les ondes gravitationnelles, infimes déformations de l'espace-temps, est issu d'une collaboration internationale.

autonome, capable de s'attaquer à la plupart des problèmes de physique nucléaire et bien au-delà. Aujourd'hui, ses chercheurs travaillent au sein de collaborations nationales ou internationales, soit avec ses propres accélérateurs, comme l'ensemble Alto (incluant le Tandem et un accélérateur linéaire d'électrons de 50 MeV), soit sur des machines extérieures. Ils étudient des domaines variés : confinement des quarks, structure des noyaux loin de la stabilité, matière nucléaire chaude, rayonnements cosmiques de très haute énergie (à l'Observatoire Pierre-Auger, en Argentine), transmutation des déchets nucléaires... Des recherches innovantes dans le domaine des accélérateurs

et détecteurs sont aussi menées au sein de deux divisions techniques spécialisées. Les notions de macro-physique et de thermodynamique nucléaires, introduites par les chimistes nucléaires, prirent une grande importance dans les années 1970, avec les premières expériences réalisées sur l'accélérateur Alice. Dans les années 1980, avec des ions lourds de haute énergie, il fut possible de communiquer aux noyaux de fusion des énergies d'excitation, donc des températures nucléaires de plus en plus élevées. Ce fut l'époque des noyaux chauds pendant laquelle on chercha à déterminer la température maximale tolérable par un noyau, et à caractériser une transition

de phase (passage de l'état liquide à l'état gazeux) de la matière nucléaire. Celle-ci fut mise en évidence au Ganil au cours des années 1990 et 2000. À des énergies beaucoup plus hautes, une autre transition de phase intervient, comparable à l'ionisation des gaz à haute température, c'est-à-dire à la formation d'un plasma. Mais ici, il s'agit d'un plasma de quarks et de gluons, phénomène étudié actuellement au LHC avec le détecteur Alice. ■

LES ONDES GRAVITATIONNELLES, NOUVEAU MESSAGER DE L'UNIVERS

C'est une aventure qui aboutira à la création d'une nouvelle discipline scientifique : l'astronomie gravitationnelle. Pour la France, l'histoire commence dans les années 1990, lorsque le CNRS s'associe à l'Institut italien de physique nucléaire. Ils signent une collaboration pour construire Virgo, un détecteur tentaculaire près de Pise et dont les deux bras s'étendront sur trois kilomètres chacun. Cet instrument gigantesque doit pouvoir mesurer les infimes déformations de l'espace-temps produites par de lointains cataclysmes cosmiques. Selon la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, des événements d'une violence inouïe comme la fusion de deux trous noirs génèrent des ondes gravitationnelles qui parcourent l'Univers à la vitesse de la lumière. L'espace-temps tremble lors de leur passage. Ces vibrations d'Univers sont si faibles qu'Einstein lui-même avait écarté l'idée de pouvoir les détecter. Mais il ne pouvait pas imaginer les trésors d'ingéniosité déployés par les scientifiques dans la course aux ondes gravitationnelles. Cette compétition sera menée de part et d'autre de l'Atlantique : le projet franco-italien Virgo et le projet américain LIGO.

Le pari technologique est risqué. Les détecteurs d'ondes gravitationnelles doivent cumuler les superlatifs : des lasers les plus stables possible qui circulent au cœur d'enceintes où le vide est poussé à l'extrême. Les miroirs utilisés doivent réfléchir

parfaitement la lumière et, une fois installés dans le dispositif, seront les objets les plus immobiles du monde. Les défis technologiques sont tels que LIGO et Virgo s'associent en 1997 pour créer une vaste entente scientifique à l'écoute de cette mystérieuse musique cosmique. Le travail acharné des milliers de scientifiques de la collaboration LIGO/Virgo paiera enfin le 14 septembre 2015. Ce jour-là, les deux détecteurs de LIGO captent le signal de la fusion de deux trous noirs. L'événement s'est produit il y a 1,3 milliard d'années libérant, en un instant, une puissance cinquante fois plus importante que toutes les étoiles de l'Univers observable ! Il s'agit de la première détection directe de trous noirs qui, par définition, sont invisibles aux instruments sensibles à la lumière. Pour ses travaux sur Virgo, Alain Brillet, spécialiste des lasers ultra-stabilisés et virtuose des expériences à la sensibilité extrême,

sera récompensé de la médaille d'or du CNRS en 2017. Il partagera la distinction avec Thibault Damour, théoricien de la relativité qui a su décrire les signaux attendus pour guider les instruments. Depuis cette première détection, les découvertes se multiplient. En août 2017, LIGO/Virgo détecte un nouveau signal et sollicite des dizaines de télescopes dans le monde. Ensemble, ils observent la fusion de deux étoiles à neutrons et confirment que c'est ainsi qu'est produit l'or que l'on trouve sur Terre et ailleurs dans l'Univers. L'astronomie gravitationnelle est désormais considérée comme une nouvelle fenêtre sur l'Univers. L'humanité peut s'émerveiller de ce nouveau paysage cosmique dont l'exploration vient de commencer... ■



Éléments d'un banc optique du détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo, en salle blanche. Il permettra d'observer le faisceau qui arrive à l'extrémité d'un bras de l'interféromètre.



LES DEUX INFINIS

Élaborer, développer et coordonner en France, dans le monde académique, les recherches sur l'infiniment petit et sur l'infiniment grand : ces travaux mobilisent un nombre important de chercheurs et demandent une vision stratégique, la réalisation de grandes infrastructures (accélérateurs et télescopes) et la formation de vastes collaborations scientifiques internationales sur la durée, qui font maintenant référence dans le monde scientifique. Ces recherches vont de la compréhension de la matière (la recherche des poupées russes ultimes : noyaux, protons et neutrons, quarks et électrons...) à celle des grandes structures de l'Univers (étoiles, galaxies, amas de galaxies, superamas et structuration à la plus grande échelle de l'Univers observable). De manière inattendue, entre infiniment petit et infiniment grand, entre particules élémentaires et messagers de l'Univers lointain, entre mécanique quantique et relativité générale, les convergences sont apparues, le dialogue s'est ouvert,

offrant de nouveaux questionnements de portée culturelle et philosophique. La lumière n'est plus le seul messager qui nous permet d'observer l'Univers : l'astronomie multimessager (photons, ondes gravitationnelles, neutrinos, rayons cosmiques) est maintenant à l'œuvre pour comprendre les phénomènes extrêmes (explosion ou coalescence d'objets massifs notamment, noyaux actifs de galaxie...). Les hautes énergies qui servent à sonder la matière servent aussi à sonder l'Univers (on parle d'astrophysique des hautes énergies). On sait aujourd'hui que l'Univers observable a une histoire. En remontant suffisamment loin dans son passé, il formait une soupe de particules élémentaires très dense avec des grumeaux. Ces grumeaux sont les germes historiques de sa structuration aujourd'hui. Ils trouvent leur origine, pense-t-on, dans les fluctuations quantiques du vide, qui elles-mêmes trouvent sans doute la leur dans un mécanisme de type « Brout, Englert et Higgs » - le même qui plus tard va conférer une masse aux particules élémentaires ! On parle ainsi de cosmologie et de grand récit de l'Univers.

La résonance culturelle et philosophique de ces avancées est évidente. Le CNRS, à travers ses instituts, l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3, créé en 1971) et l'Institut national des sciences de l'Univers (INSU, créé en 1985), ses théoriciens, ainsi que ses philosophes, a joué un rôle majeur dans l'émergence de ce qu'on pourrait appeler une révolution scientifique au tournant du siècle passé dans la compréhension des deux infinis. Bien des pays envient l'existence de ces instituts. Certains les ont copiés. ■

Rubans de gaz et de poussière qui s'enroulent autour du centre perché de la galaxie barrée NGC 1398, dans la constellation de Fornax (le Fourneau), à environ 65 millions d'années-lumière. Le CNRS a joué un rôle majeur dans la compréhension de l'infiniment grand et de l'infiniment petit.

The background features a complex geometric design. In the top left, there are diagonal blue and white stripes. To the right, there are horizontal blue and white stripes. The central and lower portions are dominated by intricate patterns of parallel lines in gold and light blue, forming a series of nested, overlapping shapes that resemble a stylized 'E' or a series of chevrons. The text is positioned in the upper right quadrant, overlaid on the white background.

OBSERVER
JUSQU' AUX CONFINS
DE L' **UNIVERS**

DEPUIS TOUJOURS, LEVANT LES YEUX AU CIEL, L'ÊTRE HUMAIN S'INTERROGE SUR SES ORIGINES, CELLES DE L'UNIVERS, ET SUR LA PLACE QU'IL Y OCCUPE. COMMENT SE FORMENT LES ÉTOILES ET LES PLANÈTES? LA TERRE EST-ELLE LA SEULE À ABRITER LA VIE? POURQUOI LE CLIMAT CHANGE-T-IL? POUR RÉPONDRE À CES QUESTIONS, L'OBSERVATION SE PLACE AU CŒUR DE LA DÉMARCHÉ SCIENTIFIQUE, PAR LAQUELLE LE DÉTECTIVE-SCIENTIFIQUE RASSEMBLE PATIEMMENT LES INDICES POUR TESTER SES HYPOTHÈSES ET EN ÉCHAFAUDER DE NOUVELLES.

À l'origine était l'astronomie

Les objets célestes ont de tout temps matérialisé ce besoin d'observer pour comprendre. Après le passage de la grande comète de 1664, l'astronome Adrien Auzout (1622-1691) suggéra à Louis XIV la création d'un grand observatoire royal. Construit en 1667, il constitue aujourd'hui l'Observatoire de Paris. Haut lieu de la recherche astronomique française, il a longtemps été un site d'observation scientifique régulier où des instruments d'observation astronomique remarquables ont été conçus, et continuent encore de l'être.

Avec l'avènement de l'astronomie moderne et sa convergence avec la physique, les astronomes ont compris que regarder loin était aussi remonter le temps, et voir les premières lumières de l'Univers, ou repérer des objets rares et exotiques tels que quasars et trous noirs. Le XX^e siècle aura donc été marqué par une course effrénée pour se doter de télescopes toujours plus puissants, parfois en orbite autour de la Terre, pour observer notre Univers avec toute l'acuité nécessaire. On a pu observer les vestiges des premiers rayonnements du Big Bang, comprendre la formation des galaxies et des étoiles, et calculer l'âge de l'Univers, vieux de plus de 15 milliards d'années. On a découvert des planètes extrasolaires contemporaines de notre Système solaire,

voire plus jeunes. Compte tenu de leur complexité et de leur coût, ces grandes entreprises ne peuvent aujourd'hui qu'être des efforts internationaux. Le CNRS, notamment l'Institut national des sciences de l'Univers, et ses partenaires investissent chaque année dans les grandes infrastructures de recherche pour offrir aux scientifiques du monde entier des instruments remarquables tels que le télescope Canada-France à Hawaii, le Very Large Telescope au Chili ou l'Institut de radio-astronomie millimétrique sur le sol français.

Observer notre planète sous toutes ses coutures

Les sciences de la Terre et la géophysique ne sont pas en reste puisque l'Observatoire de Paris a également hébergé de 1841 à 1883 l'Observatoire national du champ magnétique terrestre, déplacé ensuite à Chambon-La-Forêt où il est sous la responsabilité de l'Institut de physique du globe de Paris. La dynamique terrestre se construit sur des échelles de temps très longues et ses effets s'expriment souvent, en dehors du volcanisme ou du risque sismique, par des signaux faibles qu'il faut collecter sur de très longues périodes de temps pour les interpréter et les comprendre. Il en va ainsi de la danse des plaques lithosphériques à la surface du globe, dont les mouvements annuels au mieux centimétriques se cumulent sur des milliers et millions d'années et se libèrent avec violence en quelques secondes lors des tremblements de terre. L'observation GPS continue du déplacement des continents sur des dizaines d'années permet de comprendre la dynamique de notre Terre et d'en prévoir ainsi les soubresauts. La France fut pionnière dans la constitution de ces observatoires géophysiques, qui travaillent à présent en réseau mondial et auscultent quotidiennement les mouvements du sol ainsi que les variations des champs magnétiques ou de pesanteur, pour comprendre la dynamique du noyau terrestre, la formation et la remontée des magmas depuis les profondeurs jusqu'aux volcans, ou encore la formation des chaînes de montagnes.

Du côté de l'atmosphère et de l'océan, l'homme s'est toujours interrogé sur les grands équilibres qui affectent son environnement quotidien. Les mesures météorologiques au Puy-de-Dôme depuis 1869 ou celles de l'ozone au pic du Midi de Bigorre dès 1879 témoignent de la démarche précoce en France de construire des observatoires, qui ont eu un rôle essentiel dans la détection du trou dans la couche d'ozone, par exemple à l'Observatoire de Haute-Provence depuis le début des années 1970. Les glaciers, sentinelles du climat, sont régulièrement suivis, comme à l'Observatoire Vallot sous le sommet du mont Blanc. Pour le milieu marin, si Pytheas « le Marseillais » fut le premier océanographe scientifique, il a fallu attendre le XVIII^e siècle et l'industrialisation des pays occidentaux pour voir l'océanographie s'organiser avec de grandes explorations maritimes. Avec la création de la Commission d'océanographie du CNRS en 1966, un corps d'océanographes est officialisé, que rejoignent physiciens, chimistes, géologues et biologistes. L'exploration de l'océan et de son impact

sur le climat restent des ambitions majeures, pour lesquelles navires de recherche, engins autonomes (notamment le réseau global Argo, fort de 300 profileurs) et satellites concourent à apporter des réponses.

L'observation continue depuis des décennies a été l'élément déterminant de la démonstration de la réalité du changement climatique par les chercheurs du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Initiative française, le GIEC se nourrit du travail des chercheurs du CNRS et de ses partenaires français et européens, qui modélisent les données des observatoires de l'atmosphère, de l'océan, de la biosphère et des surfaces continentales pour comprendre la « machine climatique » dans sa globalité et son impact sur les ressources (en eau, en sol, en biodiversité) et donc sur l'avenir de nos sociétés.

Observer les autres planètes par procuration

Les grandes missions spatiales planétaires relèvent du même désir d'observer, toujours au plus près, notre Système solaire, de comprendre son évolution et l'origine de la diversité des planètes et d'atteindre un jour des terres plus lointaines, ces exoplanètes dont on découvre de nouveaux spécimens presque chaque jour. Dans sa quête d'une vie extraterrestre, se demandant avec angoisse si la Terre est la seule planète abritant la vie dans l'Univers, le géologue rejoint l'astronome dans l'étude de ces corps extraterrestres sur lesquels il ne peut poser le pied que par l'intermédiaire de sondes spatiales et de robots.

Le scientifique va jusqu'à aborder les comètes, ces corps les plus primitifs de notre Système solaire, comme l'a réalisé récemment Rosetta en se posant sur « 67P/Tchourioumov-Guérassimenko ».

De la grande comète de 1664 à Rosetta, l'observation est donc un fil rouge nourri de la curiosité insatiable de l'homme pour son Univers. ■



Observatoire Vallot (4350 m d'altitude) dans le massif du Mont-Blanc. Construit il y a plus d'un siècle par Joseph Vallot, l'observatoire a depuis été confié au CNRS. Site de très haute altitude unique en France, il sert de base pour des études glaciologiques, atmosphériques mais aussi d'adaptation physiologique à l'altitude.

LE CANADA-FRANCE-HAWAII : UN TÉLESCOPE HISTORIQUE

Lors d'une conférence donnée au Canada en 1989, l'astronome Roger Cayrel, premier directeur de la Société du télescope Canada-France-Hawaii (CFHT), expliqua en guise de boutade que cet instrument n'aurait jamais pu voir le jour sans le premier choc pétrolier. Il est vrai que la crise économique qui s'ensuivit incita les Français et les Canadiens, qui nourrissaient leurs propres projets de télescope de 4 mètres de diamètre, à unir leurs forces. La société fut fondée en juin 1974, mais le partage des tâches entre les deux pays fut parfois houleux en raison des choix antérieurs opérés au niveau national. Au final, le miroir français fut choisi, et poli par les Canadiens au Dominion Astrophysical Observatory de Colombie britannique. De même, la structure reprit le modèle établi par l'Institut national d'astronomie et de géophysique du CNRS, tandis que les Canadiens réalisèrent le contrôle commande du télescope. Malgré tout, l'affaire fut rondement menée, et la première lumière obtenue dès août 1979.

Le but principal des concepteurs du projet était d'obtenir la meilleure qualité d'image. Il éclaira le choix du site hawaïen, au sommet du volcan endormi Mauna Kea, à 4 200 m d'altitude, identifié dès les études préliminaires de Gérard Kuiper comme le meilleur site au monde... malgré l'éloignement et les difficultés de construire un télescope à une si haute altitude! Prise en 1973, la décision d'installer là le télescope, en association avec l'université

Le télescope
Canada-France-Hawaii
installé près du sommet du Maura Kea,
à Hawaii, à 4 204 mètres d'altitude.





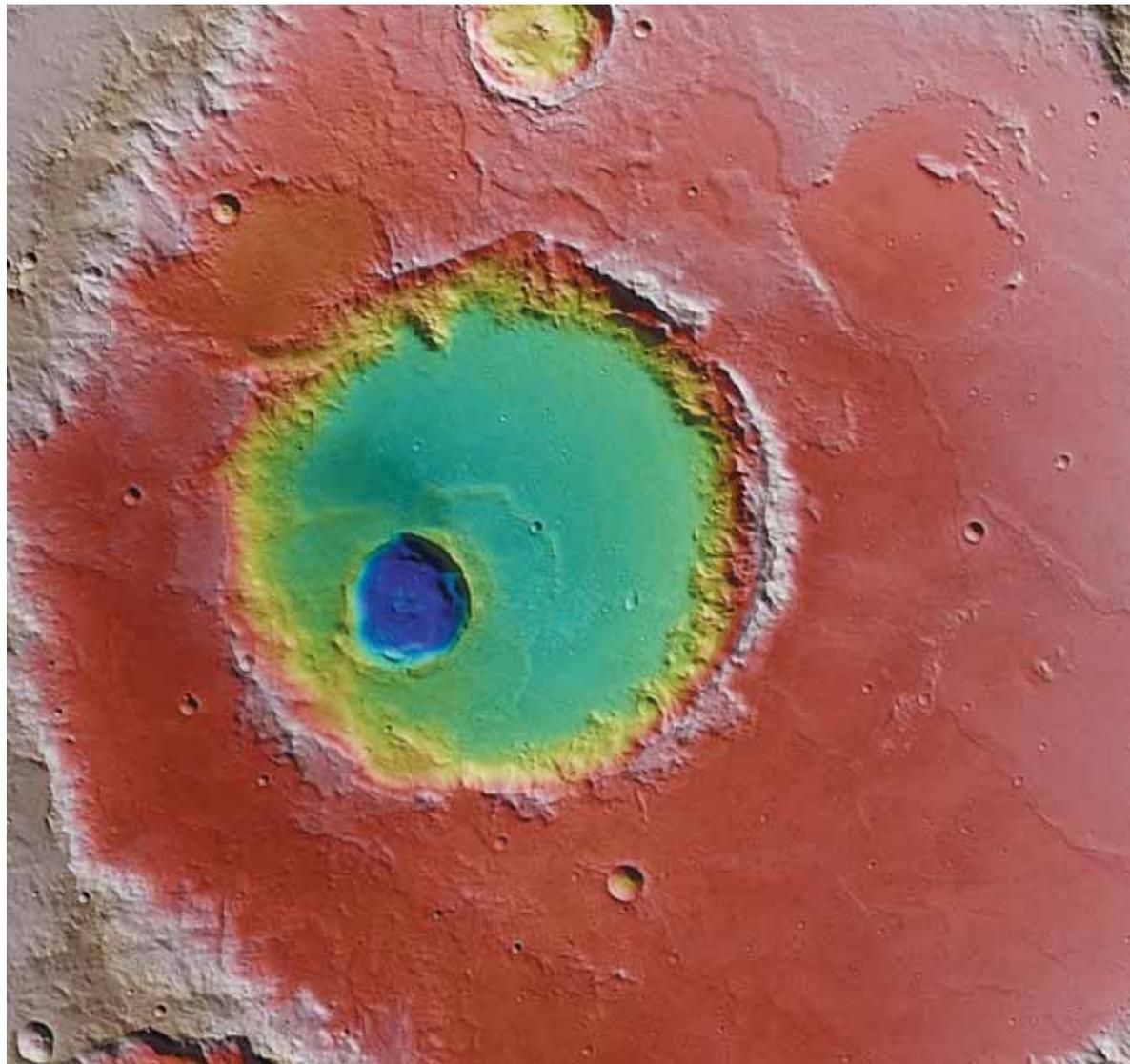
d'Hawaii, conduisit à rebaptiser l'instrument « Canada-France-Hawaii ». Un concept de miroir primaire parabolique fut privilégié, qui devait donner une meilleure image que les autres projets contemporains. Mais ce choix avait un coût, en raison de la plus longue focale, et donc de la nécessité de disposer d'un dôme plus vaste. Un grand soin fut également apporté à l'environnement thermique : un plancher refroidi permit d'assurer un équilibre parfait entre l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la coupole. Puis, au fil des années, de nouvelles améliorations garantirent une qualité d'image qui a toujours fait la réputation internationale du télescope.

De 1980 à 2000, le CFHT a été l'un des télescopes de la classe de 4 m les plus productifs, l'un des premiers à être équipé d'une caméra CCD, d'instruments dans l'infrarouge et l'ultraviolet, et d'une bonnette d'optique adaptative novatrice, développée par François Rodier, en collaboration avec des équipes du CNRS et de l'Observatoire de Paris... Les astronomes sur le site développèrent aussi des techniques nouvelles pour optimiser les observations, comme le contrôle à distance et la gestion des observations adaptées aux conditions météorologiques instantanées. Et les résultats furent au rendez-vous, avec entre autres les travaux effectués sur les noyaux de galaxies et la confirmation de l'existence de trous noirs supermassifs dans ces noyaux, la première image du tore de poussière autour du noyau de la galaxie active NGC1068 en utilisant l'optique adaptative, ou le premier

grand relevé de mesures de vitesse de 591 galaxies lointaines.

À la fin des années 1990, le CFHT s'orienta vers une nouvelle aventure, celle de l'astronomie à grand champ, au travers du projet

« Megaprime », reposant sur la caméra Megacam de 340 millions de pixels, développée par le CEA et l'INSU. 500 nuits d'observation furent dédiées à trois grands relevés du ciel : un relevé très profond pour sonder l'Univers lointain et détecter des supernovas lointaines, un grand relevé couvrant 150° carrés pour l'étude de la matière noire, et un très grand relevé moins profond sur le plan de l'écliptique pour détecter des objets trans neptuniens rares. Associé à un centre de traitement de données dédié à l'Institut d'astrophysique de Paris et à un centre d'archivage au Canada, le programme fut un succès, comptant pour 75% des publications du CFHT. D'autres résultats encore ont démontré la pertinence de cette spécialisation dans les grands relevés en imagerie, comme la mesure de l'accélération de l'expansion de l'Univers par Pierre Astier, et la détermination de la distribution à grande échelle de la matière noire par Yannick Mellier. Aujourd'hui, grâce à la qualité des équipes qui l'ont toujours maintenu à la pointe des innovations, le CFHT reste un télescope très compétitif, même après la généralisation des télescopes de 8 mètres et la future génération d'Extremely Large Telescope de 30 mètres ou plus.... ■



Vue du cratère martien Hadley, basée sur un modèle numérique du terrain de la région, à partir duquel la topographie du paysage peut être dérivée. Le codage couleur souligne la profondeur du cratère d'impact central, atteignant près de 2600 m par rapport à la région qui l'entoure. Des cratères profonds comme celui-ci offrent une vue de la chronologie historique de la formation de Mars. L'image a une résolution au sol d'environ 19 m par pixel.



LA VITALITÉ DE LA PLANÉTOLOGIE FRANÇAISE

La communauté française de planétologie a vécu un développement considérable depuis 1945 et occupe actuellement, au niveau international, la deuxième place derrière les États-Unis pour le nombre de chercheurs, ainsi que pour le volume et l'impact des publications. Ses premiers pas ont permis de défricher deux chemins différents : d'une part, celui de la théorie des systèmes planétaires, de leur dynamique et de leur stabilité, ainsi que des satellites et anneaux, qui s'est développé autour de l'Observatoire de Paris, de l'Observatoire de Nice et de l'Institut d'astrophysique de Paris ; d'autre part, celui de l'observation télescopique, qui a révélé les caractéristiques des surfaces de la Lune, de Mars et des nuages des planètes géantes, grâce aux instruments des observatoires de Meudon, de Haute-Provence et du Pic du Midi.

Au tournant des années 1960 et 1970, le premier spectrographe à haute résolution a permis de déterminer précisément à l'Observatoire de Meudon la composition chimique des atmosphères planétaires. Grâce à la qualité de cet instrument, d'étroites collaborations ont été nouées avec les États-Unis, qui ont permis d'embarquer sur les missions d'exploration du Système solaire de la NASA (Voyager, Galileo, Cassini), et de former plusieurs générations de jeunes chercheurs brillants.

En parallèle, des équipes ont commencé à s'intéresser aux milieux dilués, à la haute atmosphère terrestre mais aussi aux comas et atmosphères cométaires. La synergie entre les équipes du Service d'Aéronomie, du Centre d'études spatiales des rayonnements à Toulouse et de l'Observatoire de Paris a permis de développer de nombreux instruments pour l'exploration de la comète Halley dans la mission européenne Giotto ou les missions soviétiques Vega. La forte participation française à la mission Rosetta constitue l'héritage de ces pionniers. L'étude de la composition chimique des atmosphères planétaires et des atmosphères cométaires bénéficia également du développement de la radioastronomie millimétrique à Grenoble et à Bordeaux.

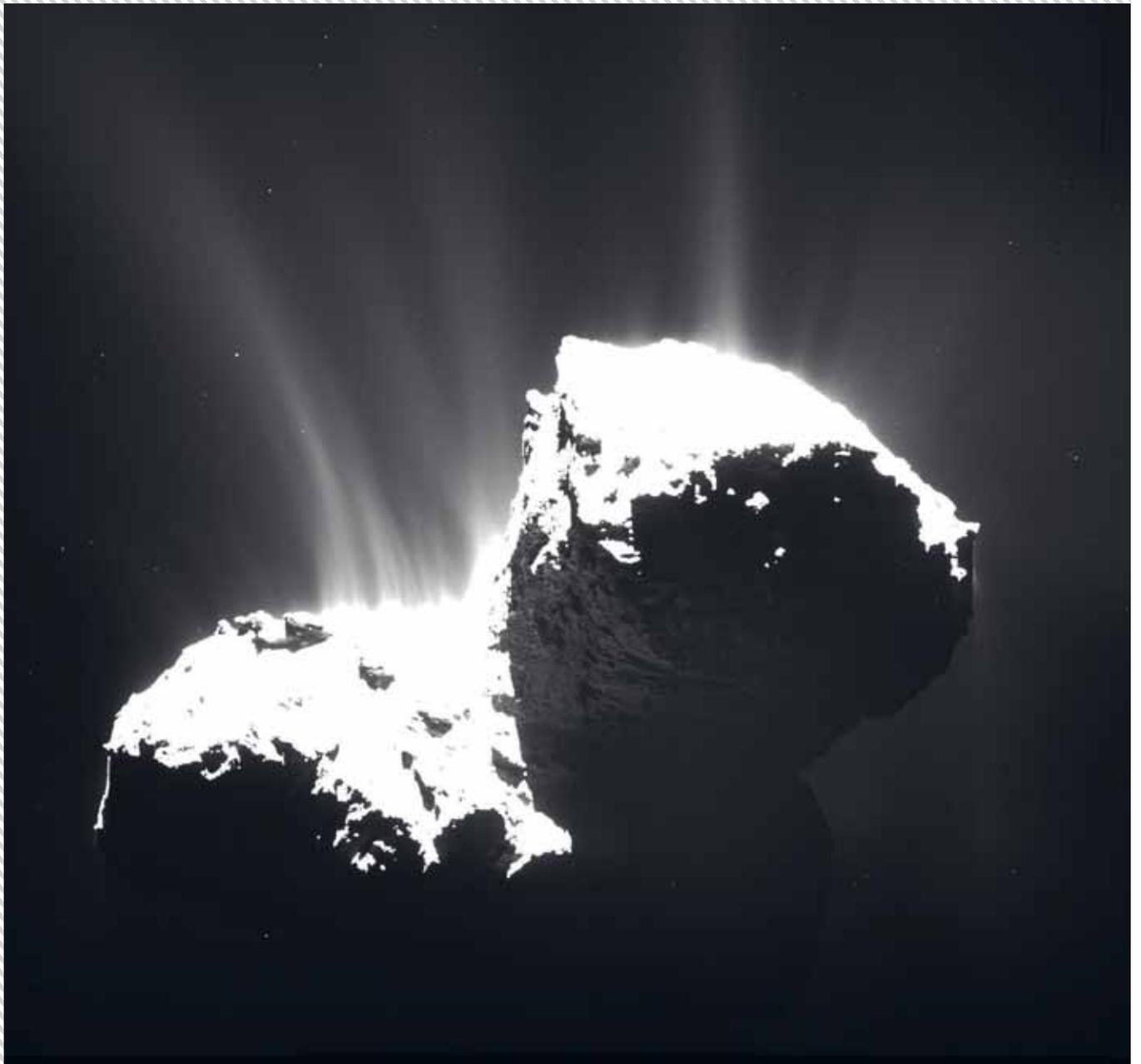
Les missions Apollo et le retour des échantillons de la surface de la Lune permirent à de jeunes équipes françaises d'étudier la minéralogie lunaire, ainsi que son vieillissement sous les rayons cosmiques et le vent solaire, une expertise qui s'est étendue aux poussières interplanétaires et cométaires collectées sur des avions stratosphériques ou à bord de la station MIR. Grâce à la mission Mars Express de l'ESA, l'équipe de l'Institut d'Astrophysique spatiale révolutionna ensuite la minéralogie de la surface martienne en y découvrant d'abondants affleurements d'argile et de sulfate hydraté, signature des importantes quantités d'eau que la planète abrita

au début de son histoire. L'évolution de la surface martienne fut aussi révélée par les études de géomorphologie à partir des images satellitales. Elles ont créé une école française en géologie martienne, prolongée par les participations françaises aux missions américaines (MSL et Mars2020) et européennes (ExoMars).

En parallèle, au Laboratoire de Météorologie dynamique, le modèle de circulation générale terrestre fut adapté à la modélisation du climat martien ou de Titan : le début d'une longue histoire, couronnée par le succès international de la base de données du climat martien et l'adaptation du modèle à Vénus, Saturne, Pluton jusqu'aux exoplanètes !

Pendant que les observateurs et les missions spatiales découvraient et révélaient de nouveaux mondes aux confins du Système solaire, les équipes de mécanique céleste et de dynamique du Système solaire continuaient de perfectionner leurs méthodes de calcul et leurs modèles de formation et de stabilité. C'est ainsi que fut proposé le « modèle de Nice », paradigme toujours d'actualité pour la formation de notre système. Enfin, ce fut à l'Observatoire de Haute-Provence que fut détectée la première exoplanète, 51 Peg b, le 6 octobre 1995. Ce jour-là, s'ouvrait une nouvelle histoire toujours en train de s'écrire. ■

Jets de gaz et poussières s'échappant du noyau de la comète Tchourioumov-Guérassimenko, à 30 km du noyau, le 22 novembre 2014. Le noyau est surexposé pour mettre en évidence la structure fine des jets de poussière. La mission Rosetta (Esa) a permis de lancer 15 expériences différentes sur la comète, dont 2 sous responsabilité française.



L'AVENTURE DE ROSETTA

Si l'exploration spatiale cométaire a débuté avec la comète de Halley en 1986, des astronomes français, tel Jérôme Lalande, Alexis Clairaut et Nicole Lepaute, ou le physicien et homme d'État François Arago, s'étaient déjà illustrés dans l'étude de ces petits corps célestes aux XVIII^e et XIX^e siècles.

L'agence spatiale européenne (Esa) sélectionna, pour survoler Halley avec la sonde *Giotto*, dix expériences sous la responsabilité de principaux investigateurs (PIs) européens, dont deux Français rattachés à des laboratoires du CNRS. De plus, sur la proposition de Jacques Blamont, alors haut conseiller scientifique du Cnes, les sondes franco-soviétiques *Vega 1* et *Vega 2* furent réorientées vers Halley après leur mission sur Vénus pour assurer, telles des éclaireurs, le succès de *Giotto*.

Ces trois projets ont établi l'existence d'un noyau cométaire irrégulier et noirâtre au cœur de la chevelure, et ont décelé dans celle-ci la présence de molécules organiques et de poussières sombres et poreuses.

Après le choix par l'Esa, en 1993, de la mission Rosetta pour un rendez-vous de longue durée avec la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko, 15 expériences furent sélectionnées. L'atterrisseur Philae a embarqué 10 expériences européennes, dont 2 sous responsabilité française. Sur l'ensemble des 25 expériences de Rosetta et Philae, environ 70 co-investigateurs français, rattachés à plus de 15 laboratoires du CNRS, se sont ainsi trouvés impliqués.

L'odyssée spatiale de Rosetta a connu, après le lancement en 2004, un extraordinaire impact médiatique, avec des survols d'astéroïdes en 2008 et 2010, puis le réveil après une phase d'hibernation et l'épopée Philae sur le noyau en 2014. Le passage au plus près du Soleil et les sursauts d'activité en 2015, et enfin l'atterrissage final de Rosetta sur le noyau en 2016 ont tout particulièrement intéressé le public. Les explorations menées, grâce à des techniques inédites de navigation spatiale, à des distances variées du noyau et du Soleil ont permis et permettent encore, grâce au travail coopératif des équipes impliquées dans le monde entier, de multiples découvertes. À la fin 2018, environ 75 thèses avaient été soutenues et 1 000 articles scientifiques publiés dans des revues internationales à comité de lecture!

Les expériences, menées sur 26 mois, ont confirmé la faible densité du noyau bilobé, établi qu'il n'a pas de champ magnétique propre, révélé qu'il est constitué de plus de matériau réfractaire que de glaces, et dévoilé une surface incroyablement complexe et évolutive (escarpements, empilements, dunes, failles, fractures, dépressions, puits...). Elles ont aussi mis en évidence la grande variété des molécules issues de la sublimation des glaces, et des jets spectaculaires dans lesquels sont entraînées des poussières. Ces particules solides sont constituées de minéraux, mais aussi d'une forte proportion de composés carbonés complexes, et présentent une

structure en agrégats hiérarchiques plus ou moins poreux.

Rosetta, comme l'indique son nom inspiré de la pierre de Rosette, devait permettre de mieux déchiffrer les processus relatifs à la formation du Système solaire et à son évolution initiale. Mission accomplie! Les résultats indiquent en effet que le noyau s'est formé par agglomération dans le disque protoplanétaire de grains interstellaires, et autorisent des spéculations sur l'apport par les comètes de molécules organiques complexes sur la Terre primitive.

Les découvertes devraient encore se poursuivre pendant des décennies, avec des comparaisons et synthèses des résultats facilitées par l'archivage de l'ensemble des données sur des sites dédiés de l'ESA et de la NASA, couplées à de nouvelles observations, modélisations ou études expérimentales, et aussi peut-être aux résultats futurs de missions d'exploration de petits corps primordiaux de notre Système solaire. ■

LES AUTEURS

Hippolyte d'Albis, directeur de recherche au CNRS, Paris-Jourdan Sciences Économiques (UMR 8545).

Nicolas Arnaud, directeur de recherche au CNRS, directeur de l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS.

Luc Avérous, professeur à l'université de Strasbourg, Institut de chimie et procédés pour l'énergie, l'environnement et la santé (ICPEES - UMR 7515).

Aurélien Babarit, ingénieur de recherche/HDR, Laboratoire d'hydrodynamique, énergétique et environnement atmosphérique (Centrale Nantes/CNRS).

Nicolas Baker, rédacteur en chef multimédia, CNRS Images.

Jean-Gaël Barbara, Neurosciences Paris Seine - Institut de Biologie Paris Seine (NPS - IBPS), laboratoire Sciences, philosophie, histoire des sciences (SPHERE).

Pierre Barré, chargé de recherche au CNRS, laboratoire de géologie de l'École normale supérieure.

Emanuel Bertrand, maître de conférences de l'ESPCI Paris, chercheur au Centre Alexandre-Koyré (EHESS/CNRS/MNHN).

René Bimbot, physicien nucléaire et ancien directeur de recherche au CNRS.

Lucie Bittner, maître de conférences à Sorbonne Université en génomique évolutive et environnementale, Institut de systématique, évolution et biodiversité, Muséum national d'histoire naturelle.

Christophe Blondel, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de physique des plasmas (UMR 7648).

Gilles Boëtsch, anthropologue, directeur de recherche au CNRS.

Janet Borg, rédactrice en chef de *l'Astronomie*, ancienne enseignante-chercheuse à l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay.

Catherine Boyen, directrice de recherche au CNRS, Station biologique de Roscoff (CNRS-Sorbonne Université).

Pascal Brault, directeur de recherche au CNRS, GREMI CNRS-Université d'Orléans, délégué scientifique Énergie CNRS-INSIS.

Martine Bungener, directrice de recherche émérite au CNRS, Centre de recherche médecine, sciences, santé, santé mentale, société (CERMES3).

Laure Cailloce, journaliste, collabore au site d'information scientifique lejournal.cnrs.fr et à la revue *Carnets de science*.

Anny Cazenave, chercheuse émérite au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales à Toulouse, directrice pour les sciences de la Terre à l'International Space Science Institute et membre de l'Académie des sciences.

François Charles, professeur au département de mathématiques d'Orsay, Laboratoire de mathématiques d'Orsay (université Paris-Sud).

Daniel Choquet, directeur de recherche au CNRS, directeur de l'Institut interdisciplinaire de neuroscience, directeur du Bordeaux Imaging Center.

Matthias Cléry, Groupe d'histoire et de diffusion des sciences d'Orsay (université Paris-Sud) et Laboratoire de probabilités, statistique et modélisation (Sorbonne Université).

Susana Coelho, directrice de recherche au CNRS, Station biologique de Roscoff (CNRS-Sorbonne Université).

Robert Cori, professeur émérite à l'université de Bordeaux, Laboratoire bordelais de recherche en informatique (LABRI-UMR 5800).

Patrick Couvreur, professeur de pharmacotechnie et biopharmacie, Institut Galien Paris-Sud.

- Corine Defrance**, directrice de recherche au CNRS, Sorbonne, identités, relations internationales et civilisations de l'Europe.
- Thomas Dubos**, professeur chargé de cours à l'École polytechnique, UMR 8539, Laboratoire de météorologie dynamique/IPSL, Palaiseau, France.
- Bernard Dujon**, professeur émérite de génétique à Sorbonne Université et à l'Institut Pasteur, membre de l'Académie des sciences.
- Agathe Euzen**, anthropologue, directrice adjointe scientifique l'Institut écologie et environnement du CNRS.
- David Farrusseng**, directeur de recherche au CNRS, Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (Ircelyon - UMR 5256).
- Patrick Flandrin**, directeur de recherche au CNRS, laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Lyon, membre de l'Académie des sciences.
- Guillaume Forcade**, CEO, cofondateur de scorelab.io.
- Thierry Fouchet** (Sorbonne Université/Observatoire de Paris), directeur du Programme national de planétologie (PNP).
- Patrick Geistdoerfer**, Directeur de recherche au CNRS - océanographe, membre de l'Académie de marine, membre du Bureau des longitudes en service extraordinaire.
- Pierre-Henri Gouyon**, professeur au Muséum national d'histoire naturelle, à l'AgroParisTech, à l'ENS et à Sciences Po, Institut de systématique, évolution, biodiversité (MNHN-CNRS), département de « Systématique & Évolution ».
- Françoise Guéritte**, ICSN-CNRS.
- Michel Grossetti**, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire interdisciplinaire solidarités, sociétés, territoires (LISST).
- Chantal Guillard**, directrice de recherche au CNRS, équipe CARatérisation et REmédiation des polluants dans l'air et l'eau (CARE), Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon.
- Denis Guthleben**, attaché scientifique au Comité pour l'histoire du CNRS, rédacteur en chef d'*Histoire de la recherche contemporaine*.
- Peter Hawkes**, retraité, directeur de recherche au CNRS, CEMES.
- Olivier Houdé**, directeur honoraire du LaPsyDÉ, UMR CNRS 8240, professeur de psychologie à l'Université de Paris, membre de l'Académie des sciences morales et politiques de l'Institut de France.
- Éric Humler**, directeur adjoint scientifique de l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS, professeur à l'École des mines de Nantes.
- Sandrine Jamet**, chargée de communication, Laboratoire d'hydrodynamique, énergétique et environnement atmosphérique (Centrale Nantes/CNRS).
- François Jérôme**, directeur de recherche au CNRS, Institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers.
- Catherine Jessus**, directrice de recherche au CNRS, Laboratoire de biologie du développement, CNRS-Sorbonne Université.
- Christian Joachim**, directeur de recherche au CNRS, CEMES.
- Abderrahmane Kheddar**, directeur de recherche au Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier (LIRMM - CNRS/ Université de Montpellier).
- Yves Lagabrielle**, directeur de recherche au CNRS, UMR Géosciences Rennes.
- Frédéric Lamaty**, directeur de recherche au CNRS, équipe Chimie verte et technologies innovantes, Institut des biomolécules Max-Mousseron, Montpellier.
- Thomas Lecuit**, professeur au Collège de France (chaire de dynamique du vivant), directeur du projet CenTuri (Centre Turing des systèmes vivants).
- Liliane Léger**, professeur à l'université Paris-Sud, Laboratoire de physique des solides.
- Muriel Le Roux**, IHMC-CNRS-ENS-Paris 1.
- Hervé Le Treut**, professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie, directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) et membre de l'Académie des sciences.
- Anny-Chantal Levasseur-Regourd**, professeure émérite à Sorbonne Université, chercheuse au LATMOS.
- Jean-Pierre Lévy**, directeur de recherche CNRS (LATTS - UMR CNRS 8134).
- Jacques Livage**, professeur émérite au Collège de France, membre de l'Académie des sciences.
- Pierre-Olivier Mattei**, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de mécanique et d'acoustique.
- Bertrand Maury**, Laboratoire de mathématiques d'Orsay (université Paris-Sud), département de mathématiques et applications (École normale supérieure).
- Laurent Mazliak**, Laboratoire de probabilités, statistique et modélisation (Sorbonne Université).
- Laura Maxim**, chargée de recherche au CNRS, Laboratoire interdisciplinaire sciences innovations sociétés (LISIS).
- Marjorie Musy**, Directrice de Recherche (CEREMA Ouest & IRSTV FR CNRS 2488).
- Jean-Baptiste Pautrizel**, directeur scientifique, cofondateur de scorelab.io.
- Frédéric Petroff**, directeur de recherche au CNRS, Unité mixte de physique CNRS/Thales (UMR 137).

Catherine Pinel, directrice de recherche au CNRS, directrice de l'Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon.

Patrick Pintus, directeur adjoint scientifique de l'Institut des sciences humaines et sociales du CNRS, professeur à Aix-Marseille Université.

Astrid Pinzano, chargée de recherche à l'Unité d'ingénierie moléculaire et physiopathologie articulaire (IMoPA CNRS-Université de Lorraine).

Philippe Portier, directeur d'études à l'École pratique des hautes études, titulaire de la chaire « Histoire et sociologie des laïcités », directeur du laboratoire GSRL (Groupe sociétés, religions, laïcités).

Norbert Schappacher, professeur à l'université de Strasbourg, IRMA.

Daniel Shulz, Institut des neurosciences Paris-Saclay (Neuro-PSI).

Abdelilah Slaoui, directeur de recherche au CNRS, directeur adjoint scientifique et responsable de la cellule Énergie du CNRS.

Etienne Snoeck, directeur de recherche au CNRS, directeur du CEMES.

Michel Spiro, ancien directeur de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (2003-2010), *president designate* de l'Union internationale de physique pure et appliquée.

Kristiana Stoitseva, responsable de programmes et partenariats scientifiques à l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS.

Eva Telkes-Klein, historienne, membre du CRFJ.

André Thiaville, Laboratoire de physique des solides (Université Paris-Sud-CNRS).

Stéphanie Thiébault, directrice de recherche, paléo- et archéo-botaniste, directrice de l'Institut écologie et environnement du CNRS.

André Toulmond, Station biologique de Roscoff (CNRS-Sorbonne Université).

Bernard Valade, professeur émérite à l'université Paris Descartes, président d'honneur du comité de rédaction de *L'Année sociologique*.

Jean-Pierre Verjus, président du Campus numérique in the Alps, président du conseil de surveillance de French Tech in the Alps - Grenoble.

Philippe Vernier, Institut des neurosciences Paris-Saclay (Neuro-PSI).

Laurent Vigroux, astrophysicien, directeur de recherche au CEA; ancien directeur de l'Institut d'astrophysique de Paris de 2005 à 2013.

Marie Claire Villeval, directrice de recherche au CNRS, Groupe d'analyse et de théorie économique (GATE - UMR 5824), directrice du GATE-Lab.

TABLE DES MATIÈRES

OUVERTURE, p.6

AU COMMENCEMENT, LA LIBERTÉ

Denis Guthleben, p.9

Une étincelle originelle...

Denis Guthleben, p.13

La recherche « désintéressée » et ses applications

Denis Guthleben, p.15

Germaine Tillion, science, justice et vérité

Denis Guthleben, p.16

AU CŒUR DE LA MATIÈRE

René Bimbot, p.19

La course aux accélérateurs

René Bimbot, p.23

Les ondes gravitationnelles, nouveau messager de l'Univers

Nicolas Baker, p.25

Les deux infinis

Michel Spiro, p.27

OBSERVER JUSQU'AUX CONFINS DE L'UNIVERS

Nicolas Arnaud, p.29

Le Canada-France-Hawaii : un télescope historique

Laurent Vigroux, p.32

La vitalité de la planétologie française

Thierry Fouchet, p.35

L'aventure de Rosetta

Anny-Chantal Levasseur-Regourd
Janet Borg, p.37

« QU'EST-CE QUE LA VIE ? »

Catherine Jessus, p.39

Le sens de la Vie : la théorie de l'évolution en France depuis 80 ans

Pierre-Henri Gouyon, p.43

Vers une vision intégrée du vivant

Thomas Lecuit, p.44

De la génétique à la génomique

Bernard Dujon, p.47

AU DÉFI DE LA TERRE

Éric Humler, p.49

Scientifiques lanceurs d'alerte ?

Éric Humler, p.53

La théorie de la tectonique des plaques

Yves Lagabriele, p.54

La terre, du noyau aux volcans

Éric Humler,
Kristiana Stoitseva, p.56

MATHÉMATIQUE, MATHÉMATIQUES

Norbert Schappacher, p.59

Les mathématiques du hasard à l'Institut Henri-Poincaré

Matthias Cléry, Laurent Mazliak, p.65

Géométries algébriques

François Charles, p.67

Mathématiques et mouvements de foule

Bertrand Maury, p.69

SAISIR UN MONDE EN MOUVEMENT(S)

Corine Defrance, p.71

Israël de la préhistoire à nos jours

Eva Telkes-Klein, p.76

Les sciences du religieux

Philippe Portier, p.78

La communication

Bernard Valade, p.81

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Pascal Brault,

Abdelilah Slaoui, p.83

Un « grand four » pour capturer le soleil...

Denis Guthleben, p.87

Bâtiment et pratiques énergétiques

Marjorie Musy,

Jean-Pierre Lévy, p.88

Énergies marines renouvelables : de l'idée au premier kWh

Aurélien Babarit,

Sandrine Jamet, p.91

L'OCÉAN COMME LABORATOIRE

Patrick Geistdoerfer, p.93

La Station biologique de Roscoff

Catherine Boyen,

André Toulmond, p.98

L'océan depuis l'espace

Anny Cazenave, p.100

Tara Océans, un rêve de marin, de science et de partage

Lucie Bittner, p.102

LES MÉDICAMENTS, DU LABORATOIRE AU PATIENT

Muriel Le Roux,

Françoise Guéritte, p.105

Vers une chimie douce bio-inspirée

Jacques Livage, p.109

Quand les patients s'invitent dans la recherche

Martine Bungener, p.110

Les nanotechnologies, pour des médicaments plus efficaces et plus sûrs

Patrick Couvreur, p.112

LES ATOMES, UN SIÈCLE APRÈS JEAN PERRIN...

Christophe Blondel, p.115

Des premiers microscopes électroniques aux molécule-machines

Peter Hawkes,

Christian Joachim,

Étienne Snoeck, p.121

La matière molle, du passé à l'avenir

Liliane Léger, p.122

L'aventure des films magnétiques ultraminesces

André Thiaville, p.124

L'INGÉNIERIE : UNE SCIENCE, UN ART...

Denis Guthleben, p.127

De l'électricité industrielle à l'analyse des systèmes

Michel Grossetti, p.131

L'ingénierie contre les pollutions sonores

Pierre-Olivier Mattei, p.133

L'ingénierie contre l'arthrose

Astrid Pinzano, p.134

LES NEURONES ENTRENT EN SCÈNE...

Jean-Gaël Barbara, p.137

Les neurosciences, de Roland-Garros au plateau de Saclay

Daniel Shulz,

Philippe Vernier, p.142

Les neurosciences dans l'éducation

Olivier Houdé, p.143

L'imagerie au service des neurosciences

Daniel Choquet, p.145

L'INFORMATIQUE : UNE SCIENCE À PART

Jean-Pierre Verjus, p.147

l'Institut Blaise-Pascal, un des pionniers de la science informatique

Robert Cori, p.152

l'information, le signal, les images et la vision

Patrick Flandrin, p.153

De la robotique franco-japonaise

Abderrahmane Kheddar, p.154

LES ÉCONOMISTES À LA CONQUÊTE DU VASTE MONDE

Patrick Pintus, p.157

L'économie comportementale et expérimentale

Marie Claire Villeval, p.161

Économie et migrations

Hippolyte d'Albis, p.162

Science et vin

Guillaume Forcade,
Jean-Baptiste Pautrizel, p.165

L'HORIZON EUROPÉEN DU CNRS

Denis Guthleben, p.167

Neutrons et réconciliation...

Denis Guthleben, p.171

Hubert Curien, un Européen convaincu

Denis Guthleben, p.172

Percer les secrets des algues brunes

Susana Coelho, p.174

LES MATÉRIAUX, UNE LONGUE HISTOIRE...

Emanuel Bertrand, p.177

Des petits trous, encore de petits trous...

David Farrusseng, p.180

La magnétorésistance géante

Frédéric Petroff, p.181

Les matériaux biosourcés

Luc Avérous, p.182

UNE CHIMIE « VERTE » ENRACINÉE DANS LA SOCIÉTÉ

Laura Maxim, p.185

La biomasse, pour une économie viable et durable

François Jérôme,
Catherine Pinel, p.188

Malmener les molécules pour le bien-être des hommes et de la planète...

Frédéric Lamaty, p.191

Photocatalyse, environnement et énergie

Chantal Guillard, p.192

ENVIRONNEMENT ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

Nicolas Arnaud,
Stéphanie Thiébault, p.195

L'eau, un bien commun précieux et vulnérable

Agathe Euzen, p.199

Les sols : quand le chercheur creuse...

Pierre Barré, p.201

Une grande muraille... verte!

Gilles Boëtsch, p.202

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : Étudier, Comprendre... ET AGIR !

Nicolas Arnaud, p.205

Claude Lorius, une vie sur la glace

Laure Cailloce, p.210

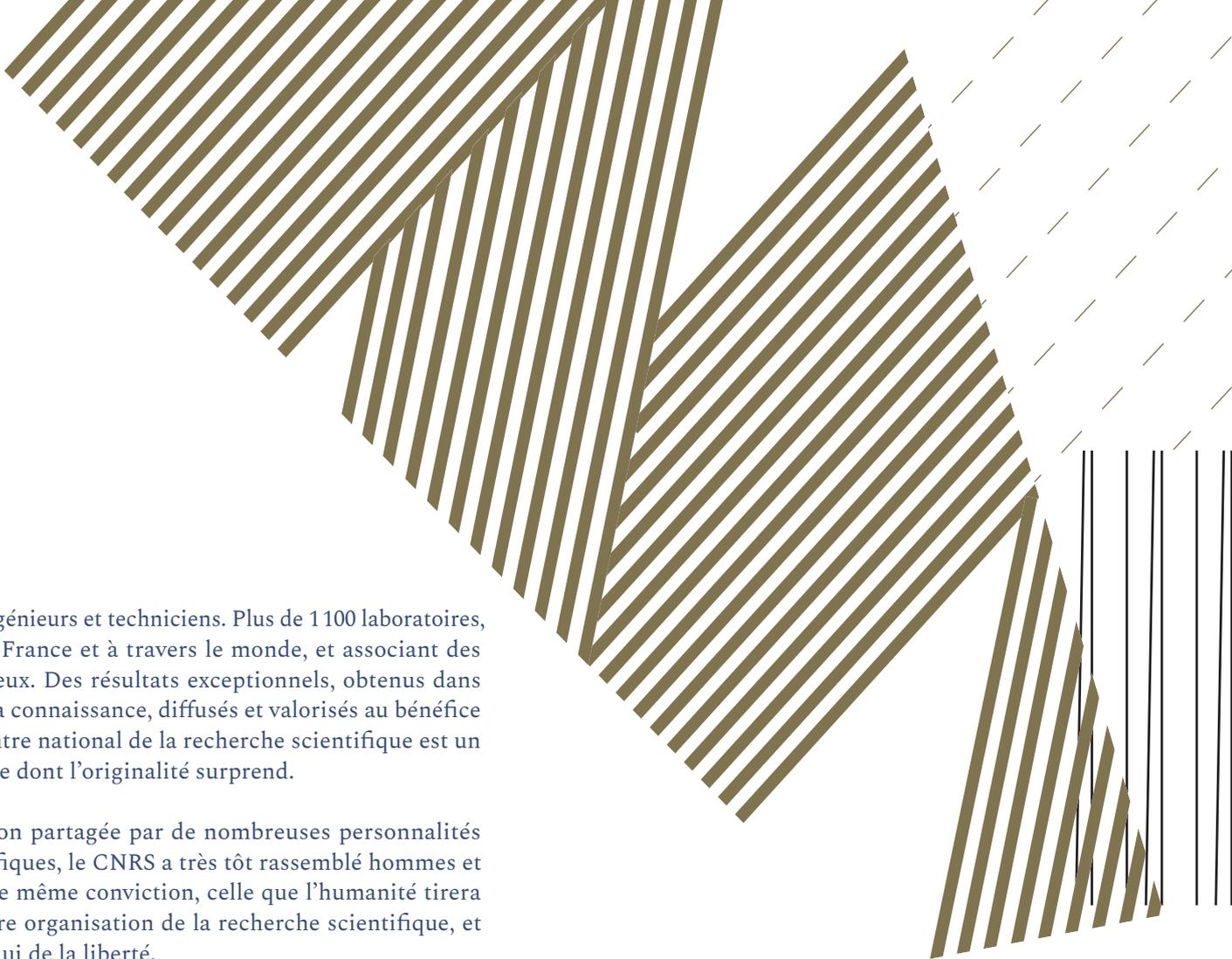
50 ans de modélisation des climats

Thomas Dubos, p.212

Les experts français au cœur du GIEC

Hervé Le Treut, p.215

LES AUTEURS, p.217



33000 chercheurs, ingénieurs et techniciens. Plus de 1100 laboratoires, présents partout en France et à travers le monde, et associant des partenaires prestigieux. Des résultats exceptionnels, obtenus dans tous les champs de la connaissance, diffusés et valorisés au bénéfice de la société. Le Centre national de la recherche scientifique est un établissement unique dont l'originalité surprend.

Fruit d'une aspiration partagée par de nombreuses personnalités politiques et scientifiques, le CNRS a très tôt rassemblé hommes et femmes autour d'une même conviction, celle que l'humanité tirera profit d'une meilleure organisation de la recherche scientifique, et d'un même idéal, celui de la liberté.

Depuis sa création en 1939, l'établissement s'est développé et profondément transformé. Biologie, chimie, écologie et environnement, homme et société, ingénierie et systèmes, mathématiques, nucléaire et particules, physique, sciences de l'information, Terre et Univers : dans tous ces domaines, le CNRS continue de puiser dans ses origines des réponses aux défis contemporains.

Sous la direction de Denis Guthleben, historien, attaché scientifique au Comité pour l'histoire du CNRS.



www.cnrseditions.fr

24 € prix valable en France
ISBN : 978-2-271-12626-9



9 782271 126269