

50 ans d'avancées scientifiques et techniques à la DAM

Le 12 septembre 1958 était créée la Direction des applications militaires du CEA. Rares sont les organismes scientifiques qui ont réussi, à l'image de la DAM, à étendre et diversifier autant leurs domaines de recherches en 50 ans.

Après les travaux des pionniers, les connaissances et les savoir-faire se sont construits progressivement grâce à l'inventivité de personnalités remarquables, accompagnées par des équipes très motivées.

Devant l'impossible tâche de recenser toutes ces avancées, la rédaction en a sélectionné quelques unes, parmi les plus emblématiques.

À leur lecture, on comprend tout ce que la DAM d'aujourd'hui doit à celle d'hier. Les réussites du passé sont autant de promesses de succès pour l'avenir.



Quand la DAM est à l'honneur dans les médias :
La Recherche en janvier 2006 et Sciences&Avenir en février 2007.

BAOBAB, ou l'extraordinaire histoire du plutonium à la DAM

Le plutonium est, depuis la naissance de la DAM, au centre des études théoriques et technologiques.

Les propriétés nucléaires de certains de ses isotopes sont favorables au développement des chaînes de réaction de fission ; sa masse critique, relativement faible, en fait un bon candidat pour l'inclure dans une arme nucléaire.

De numéro atomique 94, cet élément a été découvert en 1941 par G. Seaborg et qualifié en 1983 par S.S. Hecker de "Cauchemar en temps de guerre et rêve de métallurgiste".

Artificiellement recréé par l'homme à partir de l'uranium dans un réacteur nucléaire, le plutonium a des propriétés étonnantes voire imprévisibles. Ces propriétés sont liées à sa structure électronique versatile, dépendant fortement de son environnement atomique en raison de la délocalisation des électrons de la couche 5f. Son point de fusion, anormalement bas à 641°C, n'avait-il pas été théoriquement prévu vers 1800°C, en cohérence avec les autres actinides ?

Parmi ses propriétés qui fascinent le scientifique, on peut en citer deux :

- l'existence de six phases solides différentes α , β , γ , δ , δ' , ϵ allant, en température croissante, de la phase monoclinique simple α à très basse symétrie avec 32 atomes par maille à la phase haute température ϵ cubique centrée à deux atomes par maille ;
- une contraction de volume très importante (25 %) entre les structures cubique δ de densité 15,8 et monoclinique α de densité 19,84 ou une dilatation entre le liquide et le solide cubique ϵ (comme l'eau et la glace).

Mais ces propriétés sont aussi le "cauchemar" du technologue. Par exemple, ces changements de volume importants rendent difficile le soudage du plutonium pur ou l'obtention par fonderie d'un solide de densité théorique 19,84. En outre, en raison des propriétés pyrophoriques et oxydantes du plutonium pur à l'air ambiant et pour éviter tout risque de contamination et d'inhalation, les utilisateurs sont contraints de manipuler dans des boîtes à gants sous atmosphère contrôlée.

Les contraintes technologiques, liées à l'environnement thermomécanique des armes, ont amené les scientifiques à stabiliser, à température et pression ambiantes, des phases de haute symétrie. En effet, le plutonium est sensible aux impuretés ou éléments d'alliages, qui peuvent modifier considérablement le diagramme d'équilibre, en relation avec la délocalisation des électrons 5f. L'alliage de plutonium pur avec des éléments dits deltagènes comme *Al, Ce, Ga, Zn ou Am*, permet de "stabiliser" la phase cubique haute température δ , jusqu'à l'ambiante et même en deçà. Le domaine de stabilité de cette phase, très dépendant de la teneur et de l'état de microségrégation du soluté au sein de l'alliage, est extrêmement sensible aux paramètres tels que la pression et la température. L'application d'une pression (ou contrainte), voire la diminution de la température, peut conduire le plutonium en phase δ à se transformer en phase martensitique α' . Cette dernière se réfère à la phase α du plutonium pur, le caractère prime indiquant que les atomes de solutés sont en sursaturation dans la maille cristalline.

La phase δ est d'autant plus stable que la transformation a lieu à haute pression et basse température et que la teneur en éléments deltagènes est élevée. La transformation athermique de la phase δ vers la phase α' , dite martensitique, commence à être modélisée de plus en plus finement dans les simulations avec les équations d'état incluant les changements de phases.

C'est en janvier 1959, sur le centre de Bruyères-le-Châtel, que le bâtiment D, dit le "sous-marin", est entré en fonctionnement. Objectif : réaliser les pièces en plutonium nécessaires à la première expérimentation nucléaire. Le 15 juin 1959 a lieu la première fonderie dans le four appelé BAOBAB. Le 21 octobre 1959 est réalisée la première fonderie de pièce M1, le cœur de la première expérience nucléaire Gerboise bleue.

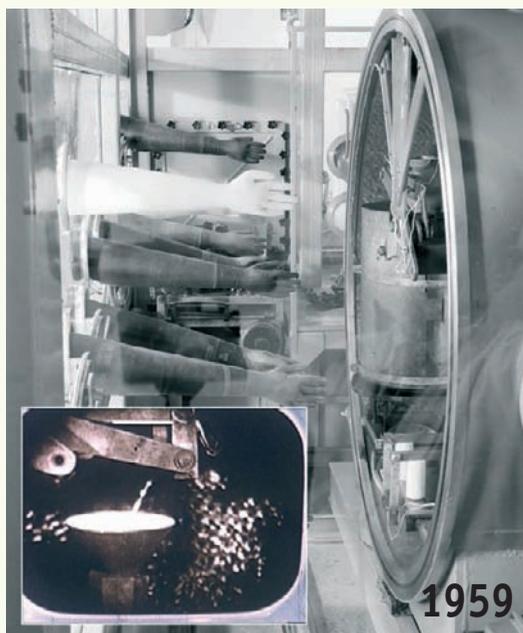


Martensite α' monoclinique d'un alliage de plutonium obtenue à -132°C à partir de la phase cubique δ .

Lors des décennies qui suivent, tous les domaines de la recherche sont développés pour que l'objet dit "engin expérimental", découlant de la conception théorique, puisse être calculé (en particulier, son énergie), et militarisé ultérieurement : physique nucléaire (sections efficaces), détonique, hydrodynamique, physique du solide, comportement (compressibilité, endommagement) sous conditions extrêmes en pression et température, et métallurgie (mise en forme par fonderie, déformation plastique et usinage, assemblage par fusion ou brasage).

Une riche moisson de données nucléaires, métallurgiques, technologiques, accompagnées de simulations numériques toujours plus fines, remplaçant les expérimentations nucléaires grandeur nature, est issue de cette "graine" de BAOBAB plantée au bâtiment D à Bruyères-le-Châtel.

Aujourd'hui, les fonderies en plutonium sont réalisées sur le centre de Valduc.



Première coulée de plutonium pur dans le four BAOBAB du bâtiment D à Bruyères-le-Châtel.

Une science détonante

À Vaujours ont démarré, en 1955, les études sur les poudres et explosifs utiles à la réalisation d'armes nucléaires. Elles ont permis de réaliser, dès la fin des années 1950, les premiers implosions pour la préparation de Gerboise bleue. Ces ensembles, de taille imposante, étaient d'une grande complexité technologique.

Par la suite, il a fallu renforcer les connaissances en physique des explosifs et en physique des ondes de choc, en particulier s'intéresser à l'acquisition de données sur les équations d'état des matériaux lorsqu'ils sont soumis à des très hautes pressions. La DAM s'est alors équipée des moyens nécessaires pour résoudre, dans des temps raisonnables, les problèmes mathématiques et physiques posés par le calcul de l'implosion. Les premiers outils informatiques font leur apparition dans ce domaine jusqu'alors expérimental, ainsi que les premiers codes de calculs de ce qui ne s'appelait pas encore la détonique théorique.

En parallèle, des méthodes de mesures et des moyens expérimentaux adaptés à ces enjeux sont développés. Il s'agit de vérifier la qualité des implosions et d'acquiescer les bases de cette nouvelle physique. Les caméras ultrarapides à image ou à fente (CF4, CF6, CFAT...) conçues par la DAM se révèlent remarquables par leur performance et leur fiabilité.

La détonique prend son essor dans les années 1960 : mesure des vitesses de détonation, détermination de l'équation d'état des métaux... La méthode des chambres à argon, mise au point en 1959 par Jean Viard et Joseph Pujol, est systématiquement appliquée à de nombreux matériaux. Dans ce dispositif, l'onde de choc fournit, par ionisation de l'argon, un signal lumineux bref et intense. Il est repéré dans le temps à l'aide d'un signal électrique généré par la polarisation d'un matériau diélectrique traversé par cette même onde de choc. Les résultats obtenus par Jacques Thouvenin l'amènent à ébaucher un modèle original de propagation des chocs dans les corps poreux, remarqué aux États-Unis.



Jean Viard (à droite) sur une dalle de tir au polygone d'expérimentation de Moronvilliers (PEM).

La formulation d'explosifs, à la fois performants et sûrs, constitue un des grands challenges de la DAM dans les années 1970. Succédant aux explosifs à liant fusible, les explosifs à liant polymère sont mis au point dans les ateliers de Vaujours. La première de ces compositions est homologuée en 1969, résultat d'un long travail de physico-chimie. Les compositions explosives à base de TATB (Triamino-trinitrobenzène) permettent à la DAM de franchir une étape décisive dans la production de compositions hautement insensibles à très fort taux de charge (de 96 à 97 %).

Mais les études de chimie de la DAM ne se limitaient pas à formuler ; elles allaient devenir de véritables outils de conception, grâce notamment aux travaux d'Alain Delpuech. Sa théorie sur les mécanismes de décomposition des molécules explosives donnait une explication prédictive de la sensibilité des explosifs. Ce progrès décisif obtenu à l'aide de calculs de chimie quantique eut un retentissement international.

Gogny : le nom célèbre d'une force

Dès le début des années 1960, décrire le noyau à l'aide d'approches purement microscopiques est apparu incontournable. Une collaboration avec l'Institut de physique nucléaire d'Orsay a permis de construire une interaction nucléon-nucléon libre reproduisant au mieux les observations de la diffusion proton-proton, neutron-proton et neutron-neutron. Toutefois, les premiers calculs de structure nucléaire fondés sur cette interaction en ont démontré les limites. Ils ont conduit Daniel Gogny à substituer à cette interaction libre l'interaction effective et de portée finie de deux nucléons dans l'environnement des autres nucléons au sein du noyau. Cette interaction est qualifiée d'effective, par opposition à l'interaction élémentaire qui intervient entre deux nucléons isolés et aussi en raison de son association forte à la théorie du champ moyen pour laquelle elle est construite.



Daniel Gogny, lors d'une journée de rétrospective qui lui est consacrée.

Un des principaux intérêts de l'interaction de Gogny réside dans le fait qu'elle possède la propriété de décrire un phénomène très important dans les noyaux : les corrélations d'appariement entre les nucléons. L'interaction de Gogny est encore aujourd'hui la seule force nucléon-nucléon effective capable de déterminer simultanément le champ moyen et ces corrélations d'appariement. Elle donne ainsi la possibilité de décrire la structure nucléaire et la dynamique de phénomènes complexes dans un cadre théorique unique et complètement microscopique.

Un des premiers succès de la force de Gogny est l'interprétation des mesures de densités de charges des noyaux au début des années 1980. Depuis, l'exploitation de cette interaction effective n'a cessé de prouver la validité de cette description. Les principales études réalisées portent sur les propriétés de structure du noyau dans son état fondamental (existence, masse, déformation...) et sur la description des excitations des noyaux avec des approches au-delà du champ moyen. Cette force de Gogny a ouvert la possibilité de calculer de façon auto-cohérente le champ du noyau soumis à des contraintes extérieures. Elle a ainsi conduit à décrire des processus dynamiques complexes tels que la fission. La pertinence de la force de Gogny est aujourd'hui reconnue par toute la communauté internationale.

Des études sont menées actuellement sur les importants moyens de calcul du CEA, afin d'améliorer la paramétrisation D1S de cette force. Ces améliorations portent notamment sur le réexamen des paramètres pour mieux décrire les noyaux et systèmes exotiques. Elles concernent également une révision de sa forme pour son emploi dans les nouvelles approches au-delà du champ moyen en cours de développement à la DAM. Toutes sont réalisées selon la philosophie initiale de Daniel Gogny : obtenir une force la plus fondamentale possible, utilisable dans tous les noyaux et permettant de décrire l'ensemble des propriétés de structure du noyau.

Le fabuleux destin des lasers à la DAM

Alors même que le premier laser – à rubis – voit le jour en 1960, les chercheurs de la DAM comprennent très vite l'intérêt d'un tel outil pour ses applications. Dès 1962, un programme laser est initié. C'est sur le centre de Limeil que sont construits plusieurs lasers au néodyme : L3, L4, L5... Ils sont utilisés pour étudier l'interaction du rayonnement laser avec la matière. En 1966 sont mis en évidence les ions multichargés, les ions rapides, l'émission X du plasma...

En 1969, le laser L5 conduit, pour la première fois, à l'observation de neutrons de fusion thermonucléaire à partir de cibles constituées de bâtonnets de deutérium solide.

Les équipes de Limeil réalisent une autre première mondiale en 1972, avec la démonstration de l'existence des harmoniques 1/2, 3/2 et 2 de la fréquence laser, signatures du développement dans le plasma d'instabilités paramétriques telles que les diffusions stimulées Brillouin et Raman.

Dans les décennies qui suivent, tous les domaines de la physique de l'interaction laser-matière sont développés dans le cadre des études sur la fusion par confinement inertiel (FCI) : absorption du rayonnement laser et instabilités paramétriques, hydrodynamique du plasma, physique atomique...

Sur le plan de l'hydrodynamique, la vitesse de détente du plasma, puis la détermination de la pression d'ablation et sa variation avec le flux, sont mesurées sur des feuilles minces mises en vitesse par attaque directe.

Le débouché d'un choc, prémice à la mesure d'équation d'état à l'aide de cibles "marche", est observé avec une cible cylindrique creuse en 1974.

Une question, fondamentale pour l'implosion, est le développement des instabilités hydrodynamiques. La première approche consiste à mettre en évidence par spectroscopie le développement d'une zone de mélange dans des cibles multicouches présentant une interface instable.

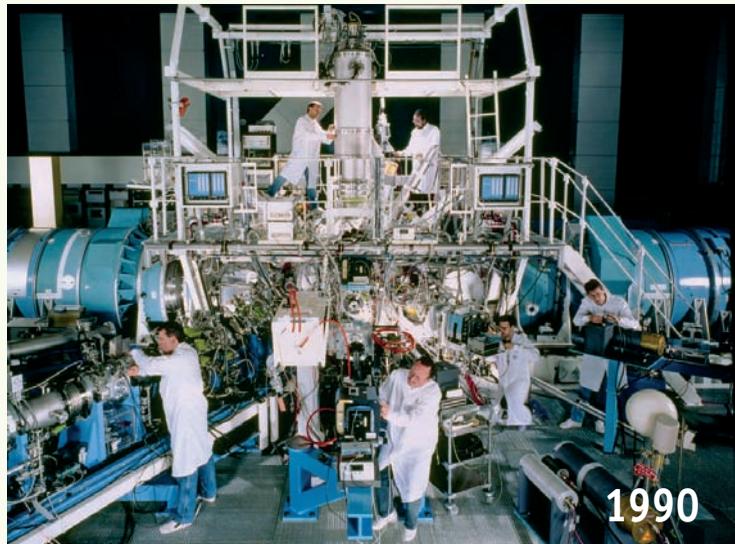
En 1973 démarrent les expériences sur la conversion X. Ce domaine reste largement développé sur toutes les installations laser, car fondamental pour les expériences d'implosion en cavité. Un des aspects essentiels est le taux de conversion du rayonnement laser en rayonnement X réémis, qui peut dépasser 60 %.

Les expériences d'implosion sont réalisées à partir de 1973 en attaque directe. En 1977, l'expérience COQUELICOT fournit des résultats scientifiques sur des implosions de type explosion de poussoir. Dans ce type d'explosion, la paroi du microballon explose sous l'effet du dépôt d'énergie par les électrons suprathermiques créés lors de l'irradiation.

En 1982, une orientation décisive est donnée aux expériences. On réalise l'implosion par attaque indirecte, c'est-à-dire en utilisant le rayonnement X créé en irradiant l'intérieur de la cavité renfermant le microballon ; cette expérience nécessite de regrouper en deux cônes les huit faisceaux du laser OCTAL, construit en 1975. Pour limiter la génération des électrons chauds et augmenter le taux d'absorption, le laser fonctionne dans l'ultra-violet, à la longueur d'onde de 0,35 μm . Les résultats sont exploités pour préparer le programme envisagé avec PHEBUS, dont la construction a été décidée en 1981.

De nombreuses campagnes d'expériences sont effectuées pour mettre en évidence et étudier l'effet laser X, en mettant en œuvre divers mécanismes. En 1987, l'effet laser X est obtenu pour la première fois dans un plasma de germanium.

Jusqu'à la fermeture du centre de Limeil, en 1999, les chercheurs recueillent avec PHEBUS des résultats importants, principalement sur l'implosion en attaque indirecte et sur des expériences classifiées. Par comparaison avec OCTAL, le saut d'énergie permet de réaliser des implosions de meilleure qualité bien qu'il n'y ait que 2 faisceaux.



Chambre expérimentale de Phébus et ses 2 chaînes lasers au centre de Limeil.

Ces travaux expérimentaux ont également permis de développer et de valider des codes de simulation numérique :

- les expériences sur la conversion X pour les codes d'hydrodynamique radiative et les modèles d'ionisation, ont ouvert la voie à des mesures d'opacité spectrale ou d'opacités moyennes ;
- l'accélération de cibles planes multicouches pour décrire le développement d'instabilités hydrodynamiques par un code de turbulence.

L'ensemble des résultats acquis a conduit à définir les caractéristiques d'une nouvelle installation permettant d'atteindre les conditions d'allumage du mélange deutérium-tritium en laboratoire, à savoir le Laser Mégajoule (LMJ) implanté sur le centre du CESTA.

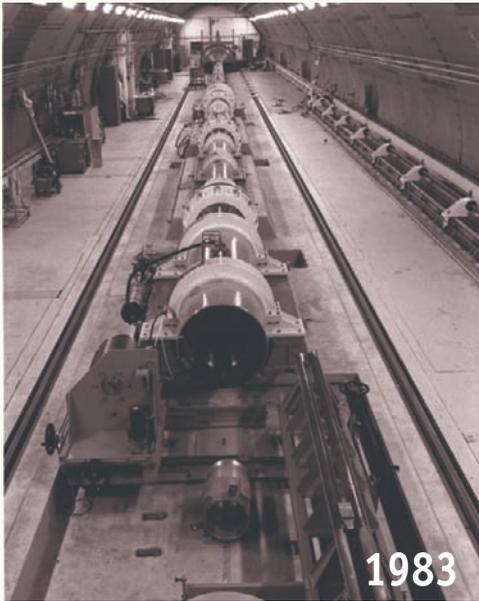
Voyage dans le monde de l'extrême

Pour concevoir les armes nucléaires, la DAM développe depuis 50 ans des moyens expérimentaux en vue d'étudier le comportement de la matière sous des conditions de très fortes densités et très hautes températures.

Actuellement, cette étude de la matière sous conditions extrêmes est un domaine de recherche très actif dans le monde académique, stimulé par des applications en sciences de la terre, planétologie ou synthèse de nouveaux matériaux. Il y a 50 ans, ce domaine était beaucoup plus confidentiel et principalement restreint aux laboratoires ayant des applications militaires. Il est bien reconnu maintenant que le moteur du développement des expériences dynamiques (du fait des temps brefs mis en jeu) a été l'avènement de l'arme nucléaire, conduisant la DAM à être à la pointe dans ces domaines tant en France qu'au niveau international.

Ces mesures de l'extrême, intimement liées aux techniques, reposent sur deux approches : dynamique et statique.

L'approche dynamique est basée sur une grande expertise en détonique. La DAM a développé d'importantes installations associant édifices explosifs, canons à poudre et canons à gaz à simple et double étages, lasers de puissance, à un ensemble de diagnostics spécifiques. Objectif : étudier, par exemple, la transition choc-détonation des explosifs, le comportement sous choc des matériaux métalliques. Des avancées récentes ont été obtenues dans l'étude de la dégradation des matériaux métalliques à l'état solide ou liquide sous l'effet d'une onde de choc. Motivés par le développement de modèles prédictifs à bases micromécaniques, ces travaux ont bénéficié de l'apport de générateurs de sollicitation et de configurations d'essais originaux. Ils ont permis de qualifier et de quantifier les mécanismes physiques responsables de l'endommagement des matériaux étudiés.



Canon à gaz léger (CAGL) au centre de Vaujours :
60 mètres de long, calibre de 80 mm, pouvant propulser 1 kg à 4500 m/s.

Dans les années 1960, les mesures de compression dynamique atteignaient des pressions de plusieurs centaines de gigapascals (GPa), alors que les mesures statiques dépassaient difficilement les dizaines de GPa. Dans les années 1960 à 1970, ces dernières sont réalisées à l'aide de presses à enclumes multiples (tétraédrique ou hexaédrique), de "belts" ou de dispositifs de type piston-cylindre. Des progrès spectaculaires sont réalisés en compression dynamique, et surtout en compression statique, grâce à l'apparition de la presse à enclumes de diamant. Cet outil, révolutionnaire de par sa simplicité et ses performances, permet, dès le début des années 1980, de gagner deux ordres de grandeur en pression pour atteindre aujourd'hui en routine le domaine, longtemps inaccessible, des centaines de GPa en compression statique. Couplée à l'utilisation du rayonnement synchrotron, la presse à enclumes de diamant mesure désormais les propriétés structurales de la matière dans des conditions extrêmes avec la même précision qu'à pression ambiante.

Une étude systématique du diagramme de phase des éléments jusque dans le domaine des 300 GPa a été entreprise par de nombreux groupes dans le monde. La DAM a apporté des contributions majeures sur les systèmes reliés à ses applications, comme l'hydrogène, les métaux de transition ou les actinides.

Le domaine des pressions dynamiques commence à être significativement étendu en utilisant les lasers de puissance pour générer le choc. Les très fortes densités des intérieurs planétaires pourront être reproduites en couplant la compression statique et la compression dynamique. Cette nouvelle voie de compression dynamique par laser de puissance devrait montrer tout son potentiel avec l'utilisation du Laser Mégajoule (LMJ) et son prototype la Ligne d'intégration laser (LIL). Déjà, la courbe adiabatique dynamique du diamant a été étendue à 1500 GPa.

Des installations dédiées à l'étude des actinides ont été développées pour ces deux approches dynamique et statique. Complexes, elles nécessitent un environnement très contrôlé et un travail en boîtes à gants. Dès la fin des années 1960, les chercheurs de la DAM établissent le diagramme de phase pression - température du plutonium et de ses alliages. Les mesures récentes portent sur la détermination de la courbe de fusion et les transitions de phase de ses alliages et sur l'état liquide. De nouveaux moyens d'essais dynamiques sur le plutonium ont été développés ces dernières années.

Depuis 50 ans, ces mesures servent également à tester les différentes approches théoriques visant à décrire l'équation d'état des matériaux dans des domaines inaccessibles par l'expérience. Aujourd'hui, les efforts de cette confrontation théorie-expérience se concentrent sur des calculs *ab-initio*, c'est-à-dire sans ou avec peu de paramètres ajustables. La mesure de l'équation d'état de nombreux métaux de transition a permis de tester les formes de fonctionnelles d'échange et de corrélation utilisées dans les calculs de la fonctionnelle de la densité électronique.

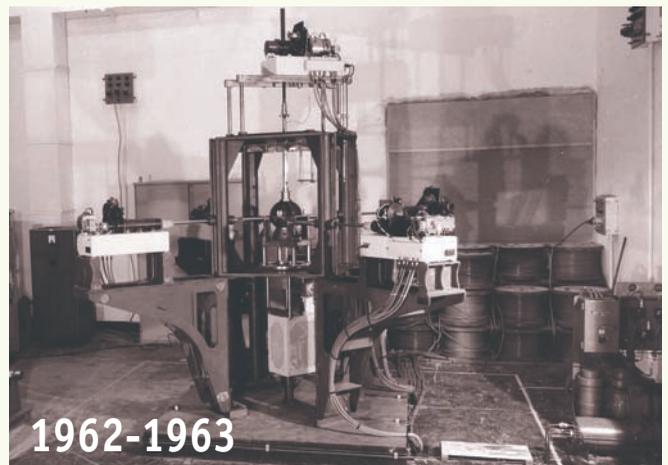
Pour modéliser le comportement élasto-plastique et l'endommagement dynamique des matériaux, l'approche reste davantage phénoménologique. Des modèles intégrant des ingrédients microstructuraux à l'échelle méso-scopique sont en cours de développement. Certains paramètres peuvent être accessibles par le calcul *ab-initio* ; c'est le cas du module de cisaillement. Des efforts sont menés pour une unification des descriptions de l'échelle atomique (*ab-initio*) à l'échelle microstructurale, en passant par l'échelle mésoscopique (champs de phase pour le mouvement des dislocations).

Criticité : RACHEL et les autres

La Section d'études et de criticité rapide (SECR) implantée sur le centre de Valduc est issue du groupe RACHEL, créé en 1957 pour réaliser le premier assemblage critique rapide français. Dès 1962, elle perfectionne des méthodes de mesure pour accéder aux paramètres caractéristiques de la neutronique appliquée : facteur de multiplication d'un assemblage, constante de décroissance, temps de vie des neutrons, spectre en énergie.

À cette époque, les théoriciens disposent d'essais en vraie grandeur, donnant des indications sur le fonctionnement intégral d'un engin. Pour améliorer certaines filières, étudier séparément les différents phénomènes se révèle incontournable. C'est la raison pour laquelle la SECR se spécialise dans l'étude expérimentale de la neutronique. En 1961, RACHEL prépare sa première expérience de criticité sur assemblage métallique mettant en œuvre la machine de rapprochement MARIANNE, en mode sous-critique. En 1963, l'expérience CAPUCINE utilise un cœur en plutonium réfléchi par du graphite. Les résultats sont utilisés pour valider des calculs en géométrie cylindrique.

C'est en 1962 qu'est construite la machine CARMEN, afin de réaliser des expériences critiques. Elle est équipée d'un système de bloc de sécurité puis de barres de contrôle. En 1964-1965, les expériences JACINTHE et GERANIUM sur CARMEN conduisent à déterminer les épaisseurs critiques de cuivre et d'uranium autour d'un cylindre en plutonium. En 1966, l'expérience PRIMEVERE conduit à l'étude des configurations



CARMEN : machine à rapprochement en mode critique.

critiques d'assemblage plutonium-fer.

Durant les années 1970, d'autres séries d'expériences telle que VIOLETTE et TULIPE testent des matériaux réflecteurs légers ou en coquille intermédiaire, en géométrie sphérique. Les expériences VERVEINE et MENTHE permettent de vérifier l'influence du plutonium 240 sur la sûreté. Des informations sur la neutronique d'une amorce dans le cadre de son optimisation sont obtenues grâce à l'expérience VÉRONIQUE.

Dans les décennies qui suivent, d'autres moyens voient le jour tant du point de vue des mesures de neutronique que des mesures du rayonnement γ . Tous les moyens neutroniques sont regroupés en 2002 avec ceux de l'ancienne station d'irradiation de l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN, devenu IRSN) au sein du Service de recherche en neutronique et criticité. Cette unité, implantée sur le centre de Valduc, est un expert incontournable dans le domaine de la criticité.

Des "Trois Grâces" à AIRIX

À la fin des années 1960 sont développés des moyens expérimentaux pour couvrir les besoins d'études de durcissement, c'est-à-dire l'étude du comportement de composants, de systèmes électroniques, ou de matériaux soumis à l'agression des rayonnements (X, γ , neutrons) produits par une explosion nucléaire.

Des générateurs électriques spécifiques sont mis en œuvre pour produire une gamme de rayonnements adaptés. Tous sont basés sur le principe d'une décharge brutale d'une impulsion électrique de forte énergie dans une diode pour créer un rayonnement électromagnétique intense. On parle alors de hautes puissances pulsées (HPP).

La gamme des HPP atteinte pendant les années 1970 et 1980 se caractérise, selon les spécificités des machines, par la mise en œuvre d'impulsions de tension de 1 à 10 MV, d'une durée de quelques dizaines de nanosecondes, de courants de 100 kA à 2 MA, de puissance électrique de 100 GW à 1 TW. C'est à la SECR que sont conçus les premiers générateurs de HPP dédiés à l'étude du durcissement des systèmes électroniques. Dans ce contexte naissent les Trois Grâces, EUPHROSYNE, AGLAÉ puis THALIE.

EUPHROSYNE, mise en service en 1968, est dédiée à la production de rayonnement γ à large spectre (0 à 3,5 MeV).

La machine AGLAÉ (1969), plus petite et de conception technologique différente, est notamment employée pour des expériences de Z-pinch. Le principe consiste à faire circuler un gaz dans l'espace anode-cathode de la diode, en forme de cylindre creux. Lors du passage du courant, ce cylindre creux implose sous l'effet de la pression magnétique et crée au centre (axe Z de la machine) un plasma chaud et dense qui rayonne. En 1981, AGLAE II prend le relais : cette nouvelle machine délivre un courant de l'ordre de 1 MA sous 1 MV.

En 1974, la DAM se dote de THALIE, moyen d'irradiation imposant avec une longueur de 33 mètres et un diamètre de 6 mètres pour ses lignes de mise en forme de l'impulsion électrique.

Une autre machine voit le jour en 1986 : AMBIORIX (2 MA sous 1 MV) conçue pour étudier les effets thermomécaniques induits sur des composants électroniques par le rayonnement X (thermochoch).

L'année 1988 est celle du transfert des moyens d'irradiation de la SECR de Valduc vers le centre du CESTA. Les machines EUPHROSYNE, AGLAE II, AMBIORIX et THALIE sont du voyage. EUPHROSYNE est détournée du durcissement de l'électronique pour des études sur le laser à électrons libres, avant son démantèlement quelques années plus tard. Unique en Europe, AMBIORIX connaît des développements technologiques : elle propose aujourd'hui trois modes de fonctionnement selon la diode utilisée. THALIE continue à être exploitée pour le durcissement électronique jusqu'à son démantèlement en 1997.

1988 est également l'année de la construction, pour le Centre d'études de Gramat, du générateur ASTERIX, de technologie similaire à celle de THALIE. Il est dédié aux conditions de fonctionnement des armements conventionnels sur un théâtre d'opérations en ambiance nucléaire. La puissance électrique d'ASTERIX est identique à celle de THALIE pour un encombrement 5,5 fois plus faible.



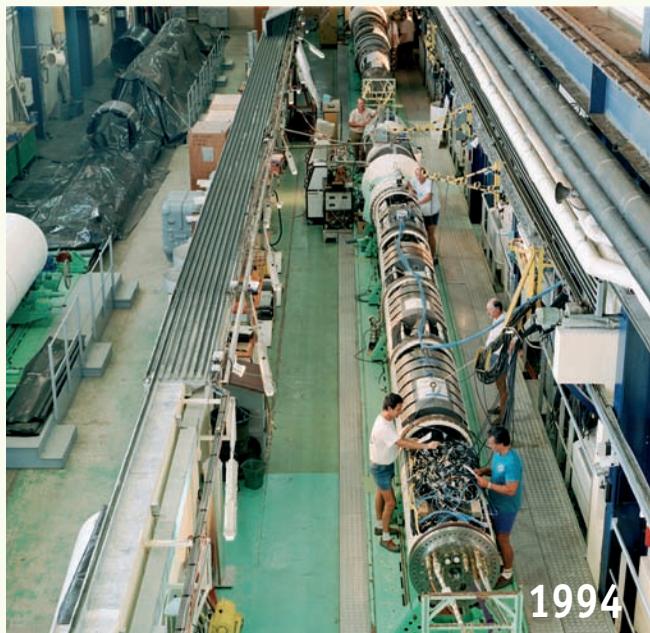
Vue de l'accélérateur AIRIX.

Ces connaissances acquises dans les hautes puissances pulsées sont mises à profit pour d'autres applications :

- études de base menées sur les lasers à électrons libres, de 1988 à 1992 ;
- étude d'un moyen de radiographie-éclair performant pour répondre au besoin du programme Simulation. Cela se concrétise par la construction, sur le Polygone d'expérimentations de Moronvilliers (PEM), de la machine AIRIX, opérationnelle au début des années 2000 ;
- travaux sur les micro-ondes de fortes puissances permettant d'aborder un domaine nouveau avec le fonctionnement de générateurs HPP en mode récurrent (quelques centaines de hertz).

Des mesures rapides comme l'éclair

Lors du fonctionnement d'un engin thermonucléaire, les matériaux sont portés dans des conditions (densité, température, pression, vitesse,...) qu'on ne retrouve simultanément dans aucun autre domaine de l'industrie ou de la recherche. Les équipes chargées de concevoir et de réaliser les mesures lors des campagnes d'essais de 1960 à 1996 ont été amenées à mettre au point des dispositifs innovants pour étudier ces phénomènes très particuliers. Parmi les problèmes à traiter, figurent la brièveté et la rapidité des phénomènes à analyser. En effet lors de la phase initiale du fonctionnement (phase pyrotechnique), les matériaux sont portés à des vitesses de quelques centaines de km/s en quelques millièmes de seconde (μ s). Lors de la phase thermo-nucléaire, on atteint respectivement des dizaines de milliers de km/s et une dizaine de milliardièmes de seconde (10 ns).



Préparation d'un conteneur équipé de son instrumentation en vue d'un essai souterrain.

Des dispositifs équivalents sont utilisés pour des expériences de détonique sur champ de tir ou de physique des plasmas auprès des installations lasers de puissance. Pour ces dernières, les phénomènes à étudier ont des durées de quelques nanosecondes à quelques picosecondes (un millième de milliardième de seconde). Certaines mesures requièrent une résolution spatiale élevée. Pour cela, avec des objets en mouvement rapide, il est indispensable de réduire le flou de bougé : une capsule implosée par laser à une vitesse de 300 km/s parcourt 0,3 micromètre en 1 picoseconde. Une résolution spatiale de l'ordre du micron nécessite donc un temps de pose ultra-bref de l'ordre de la picoseconde. Résolution spatiale et résolution temporelle sont donc le plus souvent intimement liées.

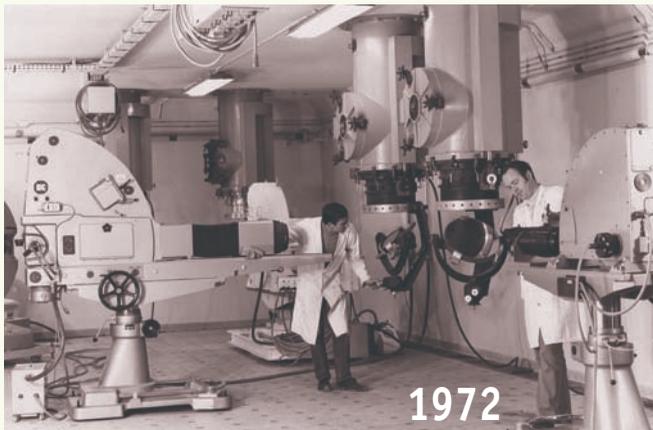
La révolution numérique

La mise en place du programme Simulation, avec l'importance accrue des expériences de détonique et le démarrage du Laser Mégajoule, confirme le besoin en dispositifs de mesures ultra-rapides. La volonté d'améliorer les modèles de physique utilisés dans les codes de calcul conduit à réaliser des expériences de validation toujours plus précises, en particulier au niveau temporel.

Un dispositif de mesure, couramment appelé diagnostic, est composé de différents éléments :

- un dispositif de mise en forme, de sélection du rayonnement à analyser : système d'imagerie, de spectrographie... ;
- un capteur transformant le rayonnement étudié en signal électrique. Les rayonnements auxquels on s'intéresse dans le cadre des expériences liées au programme Simulation sont très variés : ils couvrent une large partie du spectre électromagnétique allant de l'infrarouge au rayonnement γ , en passant par le visible et l'ensemble du spectre X. On étudie également les particules telles que les neutrons produits lors des expériences de fusion par confinement inertiel ;
- un analyseur : parmi les analyseurs ayant fait l'objet de développements importants figurent les caméras à balayage de fente utilisées tant en détonique que pour l'étude des plasmas laser ;
- un enregistreur qui stocke l'information dans une mémoire numérique ou un film. La DAM a développé un numériseur rapide qui reste sans équivalent sur le marché : le FTD10000 commercialisé par Greenfield Technology sous licence CEA.

Concernant la réponse temporelle d'un diagnostic, il ne suffit pas de considérer la réponse de chacun des composants ; il est indispensable d'optimiser la réponse globale de la chaîne de mesure.



Réglage des caméras ultra-rapides, dans le laboratoire d'optique jouxtant la dalle de tir au Polygone d'expérimentation de Monroville (PEM).

Au-delà de leur performance temporelle, les mesures réalisées dans le cadre des essais nucléaires et du programme Simulation ont d'autres particularités. Il s'agit le plus souvent d'expériences monocoup au cours desquelles l'objet étudié est détruit. Que l'expérience soit réalisée sur une dalle de tir ou auprès d'un laser de puissance, la mesure est effectuée dans un environnement hostile : ondes de choc, débris, rayonnements parasites... nécessitant des systèmes fiables et robustes.

Le développement de dispositifs nouveaux constitue un champ de recherche actif pour les équipes de la DAM, pour lequel elles s'appuient largement sur des collaborations tant académiques qu'industrielles.

Dès sa création, la DAM a eu recours à la simulation numérique pour mener les études scientifiques et technologiques conduisant à la conception des armes nucléaires.

La simulation numérique des armes nucléaires constitue un formidable défi. Le calcul doit prendre en compte des systèmes complexes, qui mettent en jeu de très nombreux phénomènes physiques couplés, le tout en dynamique rapide. Le couplage de la matière en mouvement avec des rayonnements de différentes natures doit notamment être décrit. Les modèles physiques se traduisent par des équations mathématiques non linéaires, dont la résolution numérique, à l'aide de méthodes d'approximation spécifiques, nécessite une forte puissance de calcul.

En outre, les systèmes simulés dépendent d'une large gamme de paramètres géométriques et physiques. Le choix optimal de ces paramètres, à la charge des concepteurs d'armes, nécessite de nombreuses simulations numériques qui se traduisent par des volumes de données hors du commun. Il en est de même pour la démarche de comparaison et de validation des calculs par rapport aux expériences.

C'est pourquoi, la simulation numérique des armes nucléaires suppose des ressources informatiques importantes : ordinateurs puissants, matériels pour le stockage, l'archivage et le dépouillement des données. Ces ressources permettent d'utiliser au mieux les logiciels de simulation numérique : codes de calcul, logiciels et interfaces applicatives pour la CAO, les maillages, la gestion des données, la visualisation...

La puissance de calcul est passée de quelques milliers d'opérations flottantes par secondes (kiloflop/s) à des dizaines-centaines de téraflops (mille milliards d'opérations par seconde), et le pétaflops (encore un facteur mille) est à portée de main. Les capacités en mémoire des ordinateurs, les capacités de stockage des résultats ont augmenté dans des proportions comparables. Les modèles de programmation, séquentiels puis vectoriels et aujourd'hui parallèles, apportent également des gains importants.



Ordinateur IBM au centre de Limeil.

Ces progrès dans les matériels ont entraîné de grandes améliorations des modèles et des données physiques associées, mais également des couplages entre ces modèles physiques. Simultanément, les méthodes mathématiques et numériques utilisées pour résoudre les équations des modèles physiques ont progressé : méthodes pour les équations de la dynamique des gaz, de la diffusion et du transport, sans oublier les couplages associés.

Les méthodes de l'informatique scientifique et du génie logiciel, associées aux progrès des langages informatiques, ont amélioré le développement des codes et logiciels. Il passe d'un stade artisanal à un stade industriel organisé en grands projets, avec des plateformes de développement intégrant tous les aspects du cycle de vie. Il débouche ainsi sur des chaînes de calcul associées aux logiciels applicatifs (CAO, maillage, visualisation...) du bureau de l'ingénieur-chercheur.

En 50 ans, la simulation numérique a connu une évolution extraordinaire dans tous les domaines et des calculs, jadis héroïques, deviennent courants. Le développement des codes et des logiciels de la DAM a permis de disposer aujourd'hui d'un véritable "simulateur des armes" garantissant les armes nucléaires en l'absence d'essai.

Toujours en alerte

Dès la fin des années 1940, au sein du Laboratoire de physique de l'École normale supérieure, le professeur Yves Rocard émet les premières idées concernant la détection des explosions nucléaires.

En 1954, une première mission à Tahiti évalue la possibilité de détecter par des méthodes électromagnétiques et par prélèvement de poussières radioactives des expérimentations alors effectuées par les États-Unis.



Station radionucléides aérosols sur les îles Kerguelen. Sur le toit, le préleveur aspire l'air ambiant afin de détecter les isotopes radioactifs marqueurs d'un éventuel essai nucléaire.

En 1956 et 1957, les premiers essais de détection par micrographes et sismomètres sont effectués à partir de la métropole. Les années 1958 et 1959 voient les premières implantations permanentes de réseaux sismiques et micro-barographiques, en métropole et en Polynésie respectivement.

En 1957 est créée la Section détection, rattachée au CEA, qui devient, le 1^{er} janvier 1961, le Laboratoire de détection et de géophysique (LDG). Il est rattaché administrativement à la DAM en 1962 et s'installe à Brétigny-sur-Orge en 1963.

Au cours des années 1960 et 1970, les réseaux sismiques métropolitain et polynésien s'étendent progressivement ; les premières stations sont installées à l'étranger. En parallèle se poursuit le développement des méthodes de détection optique, électromagnétique et par sondage ionosphérique.

Après le départ du professeur Rocard en 1974, le LDG devient une unité opérationnelle de la DAM et rejoint le centre de Bruyères-le-Châtel. À partir de 1981, le LDG se voit confier une mission d'alerte aux forts séismes en France, en plus de sa mission traditionnelle de détection des explosions nucléaires.

Le LDG regroupe aujourd'hui des ingénieurs-chercheurs et des techniciens, dont les compétences vont des études appliquées dans le domaine des risques naturels (séismes, tsunamis...) jusqu'à la surveillance opérationnelle et la gestion de l'alerte 24h/24, en passant par la phénoménologie et les effets des explosions, le traitement du signal et de l'image, et la simulation numérique intensive.

Ses missions, notamment celles liées à la vérification du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires, à la surveillance d'activités potentiellement proliférantes et à la surveillance des risques sismiques, ne cessent de se renforcer. Pôle de compétence en aléa sismique du CEA, il vient de se voir confier très récemment la mise en place d'un Centre régional et national d'alerte aux tsunamis en Atlantique nord-est et en méditerranée occidentale (CRATANEM), conjointement avec l'Institut national des sciences de l'Univers et le Service hydrographique et océanique de la Marine.



Stations d'enregistrement et d'analyse des données du réseau mondial de surveillance.

Ont contribué à la réalisation de cet article : G. Assailit, J. Authesserre, E. Berthier, M. Boivineau, J.-P. Borgoltz, R. Crusem, M. Decroisette, P. Eyl, M. Fourgoux, H. Goutte, D. Juraszek, F. Llorca, P. Loubeyre, B. Scheurer.

Remerciements

La rédaction remercie Céline Jandaureck pour la recherche des photographies et Emmanuelle Volant pour la relecture du document.

chocs avancées

Avancées scientifiques et techniques
de la Direction des applications militaires
Commissariat à l'Énergie Atomique

Directeur de la publication :
Thierry Massard

Comité scientifique :

Olivier Acher
Rémy Besnard
Daniel Bouche
Jean-Paul Deffain
Philippe Duvignac
Francis Hardouin
Jean-Pierre Leyrat

Rédacteur en chef :
Michel Boivineau

Création et réalisation :
Peter Van Iler
Imprimerie Le Bon Caractère
61190 Tourouvre

Secrétariat - Diffusion - Abonnement :
Régis Vizet

chocs CEA-DAM- Île de France
Bruyères-le-Châtel
91297 Arpajon Cedex
Tél : 33(0)1 69 26 76 98
Fax : 33(0)1 69 26 70 80
Email : chocs@cea.fr