



**Installation
PHEBUS com-
portant au pre-
mier plan la
partie nouvelle
à laquelle s'ac-
cole l'ancien
bâtiment.**

G. Unoste-IPSN/DRS/COM

PHÉBUS PF, DES ESSAIS POUR PLUS DE SÛRETÉ

La sûreté nucléaire est vivante, elle se nourrit des progrès scientifiques et techniques ainsi que des enseignements tirés du fonctionnement des réacteurs. Les accidents survenus, en particulier celui de Three Mile Island, ont apporté de nombreuses informations. Ils ont notamment amené à prendre en compte l'éventualité d'une défaillance partielle ou totale des systèmes de protection et de sauvegarde des réacteurs pouvant conduire à la fusion du cœur. Au plan international, une des priorités de la recherche sur la sûreté porte sur l'étude du relâchement de produits de fission et autres matières radioactives dans l'atmosphère, qui résulterait d'un tel accident et d'un éventuel défaut d'étanchéité de l'enceinte.

Depuis l'accident de Three Mile Island aux Etats-Unis, en 1979, et celui de Tchernobyl en Ukraine, en 1986, la notion de sûreté des installations nucléaires a beaucoup évolué. Cette sûreté repose d'abord sur des dispositions relatives à la construction élaborées lors de la conception. Elles constituent des "lignes de défense", appelées aussi barrières, destinées à se prémunir contre les incidents et accidents pouvant mettre en cause la sûreté des installations et, si ces accidents survenaient malgré tout, à éviter ou limiter le relâchement de produits de fission dans l'environnement. Les réacteurs à eau sous pression (REP) présentent trois barrières successives de confinement : la gaine métallique contenant les pastilles de combustible, la cuve en acier abritant le cœur du réacteur et le circuit de refroidissement associé, et une enceinte en béton.

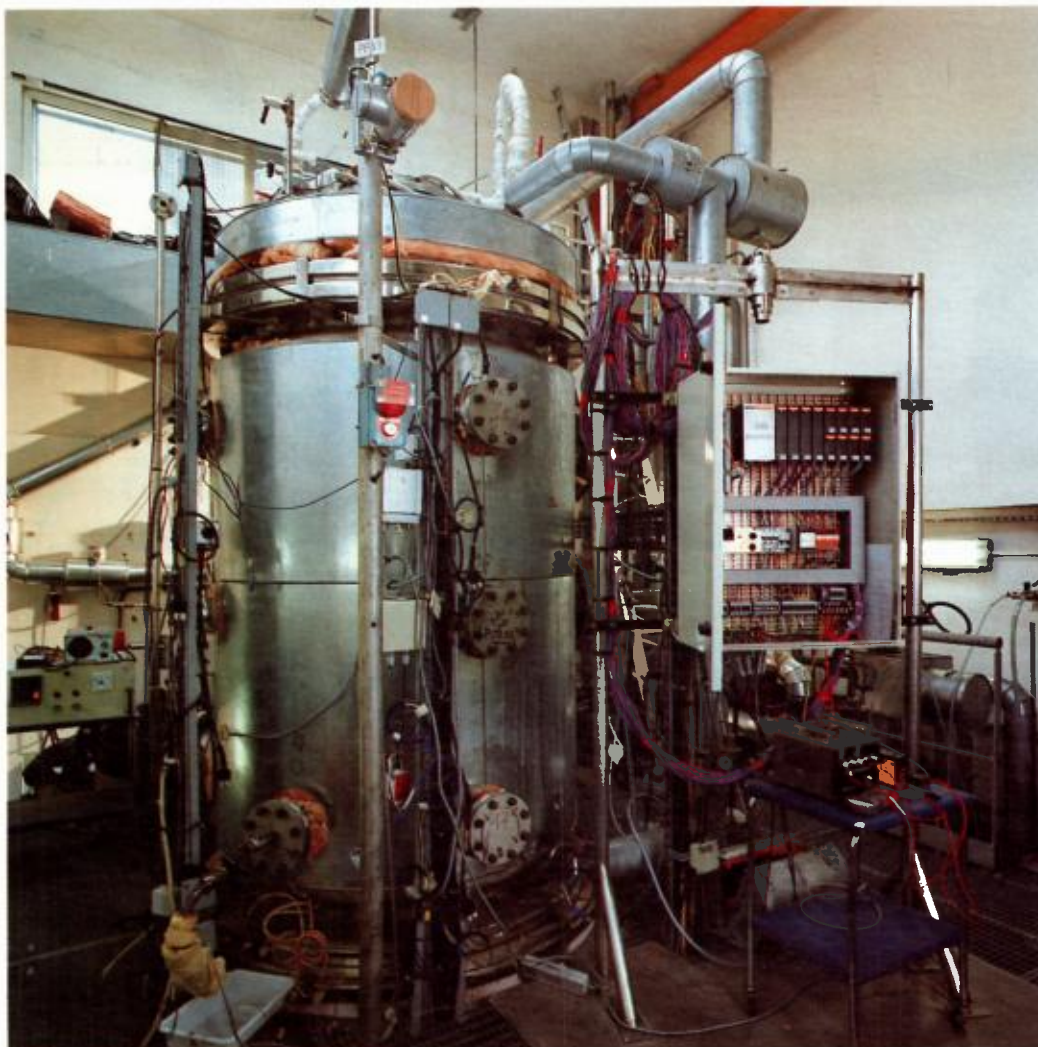
L'approche actuelle de la sûreté ajoute une ligne de défense supplémentaire en prenant en compte les accidents "graves", c'est-à-dire ceux qui, susceptibles de dégénérer à cause d'un éventuel dysfonctionnement des circuits de secours devant intervenir automatiquement, peuvent conduire à la fusion du cœur. Cette fusion du cœur peut entraîner un rejet de produits radioactifs dans l'atmosphère en

cas de défaut d'étanchéité de l'enceinte constituant la troisième et ultime barrière, les deux autres ayant été franchies. Une bonne connaissance des phénomènes qui gouvernent le niveau de ce rejet est indispensable afin, si possible, d'initier les actions destinées à le minimiser et d'optimiser les dispositions éventuelles à prendre autour de la centrale pour la protection des populations.

En collaboration avec Electricité de France, la Commission des communautés européennes et plusieurs organismes étrangers (encadré 1), l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN) a lancé le programme PHEBUS PF, dans lequel les principaux phénomènes qui régissent de tels accidents sont simulés.

Les progrès de la recherche

Depuis plus d'une décennie, de nombreuses équipes de recherche s'attachent à mieux comprendre les conséquences d'une fusion du cœur d'un réacteur nucléaire. Les premiers programmes de laboratoire ont porté sur la caractérisation des produits de



Cuve de l'installation PITEAS destinée à l'étude du comportement des aérosols dans une enceinte de réacteur.

Goujet - IPSN/DRS/COM

fission (encadré 2), pendant et après la dégradation du combustible. Le devenir de ces produits de fission dans le circuit primaire et dans l'enceinte a fait ensuite l'objet de nombreuses études en France et à l'étranger.

Codes de calcul et simulation

Une approche purement expérimentale, même à échelle réduite, est évidemment exclue à cause du nombre d'essais à réaliser étant donné la complexité des phénomènes se déroulant dans un réacteur nucléaire et du coût de tels essais. L'évaluation des conséquences d'un accident passe donc nécessairement par la mise au point de codes de calcul permettant d'extrapoler les connaissances acquises lors d'analyses ou d'expé-

La coopération internationale

1

Le programme expérimental PHEBUS PF se déroulera sur une durée de dix ans (1988-1998). Il disposera d'un budget global qui devrait atteindre un milliard de francs, cofinancé par différents partenaires. Par son caractère intégral et son importance en matière de recherche, il a suscité l'intérêt de plusieurs pays utilisateurs d'énergie nucléaire. Outre l'IPSN, PHEBUS PF regroupe Electricité de France, la Commission des communautés européennes, le Japon, les Etats-Unis, la Corée et le Canada.

Représentée par le Centre commun de recherches d'Ispra,

en Italie, la Commission des communautés européennes a été le premier partenaire de l'IPSN et s'est engagée dans le programme dès 1988. Les deux organismes fournissent des moyens équivalents et financent chacun 30 % du coût total du projet. Electricité de France participe à hauteur de 25 %. Enfin, en 1990, le Japon et les Etats-Unis ont signé un accord pour s'associer au programme. Ils ont été suivis, en 1991, de la Corée et, en 1992, du Canada. Ces quatre pays financent 15 % du projet ; ils participent au comité de programme, aux groupes de travail et ont accès aux résultats.

**Salle de
commande
du réacteur
PHEBUS.**



G. Lhoste-IPSN/DRS/COM

Les produits de fission

2

La fission d'un noyau lourd s'accompagne de la production d'éléments plus légers, appelés *produits de fission*, eux-mêmes radioactifs. Ces produits de fission sont normalement confinés dans la gaine des crayons de combustible. Dans l'hypothèse d'un accident grave du réacteur, entraînant la rupture des différentes barrières, leur dispersion dans l'atmosphère constitue un risque pour l'environnement.

Quatre paramètres principaux caractérisent les produits de fission : le *type de rayonnement* qu'ils émettent (alpha, bêta, gamma) ; leur *période*, qui définit la décroissance de leur activité en fonction du temps, par exemple, l'iode 131 décroît d'un facteur 2 en huit jours et le césium 137 en trente ans ; leur *taux de relâchement*, lié à leur température de fu-

sion ou à celle du composé chimique auquel ils sont associés (CsI, CsOH) ; leur *nocivité radiobiologique*. Celle-ci dépend du rayonnement émis par les produits de fission et, en cas d'ingestion ou d'inhalation, de leur nature chimique, de leur temps de séjour et de leur distribution dans le corps humain.

De façon très schématique, les produits les plus dangereux pour l'environnement sont ceux dont la volatilité entraîne un relâchement important en cas de fusion du combustible nucléaire, c'est-à-dire l'iode et le césium. Le premier présente, à court terme, un risque de toxicité pour la thyroïde et le second, à long terme, un risque de transfert dans la chaîne alimentaire (végétaux, animaux, êtres humains), à cause de sa longue période radioactive.

riences. C'est dans ce but qu'a été développé, en France, le code de calcul ESCADRE, pour l'étude des accidents impliquant une fusion du cœur du réacteur (figure 1).

La mise au point et la validation des modèles utilisés dans les codes de calcul reposent sur des expériences dites analytiques, ou à effets séparés, et sur des expériences globales. Ces deux types d'expériences peuvent mettre en œuvre des produits de fission simulés, ce qui est le plus souvent le cas pour les essais analytiques, ou utiliser en cellule chaude une faible quantité de combustible préalablement irradié (essais "hors pile"), ou être réalisés directement en réacteur (essais "en pile").

Les essais hors pile

Moins coûteux *a priori* que les essais en pile, en particulier quand ils sont réalisés à petite échelle et mettent en œuvre des simulateurs non radioactifs, les essais hors pile ont permis d'accu-

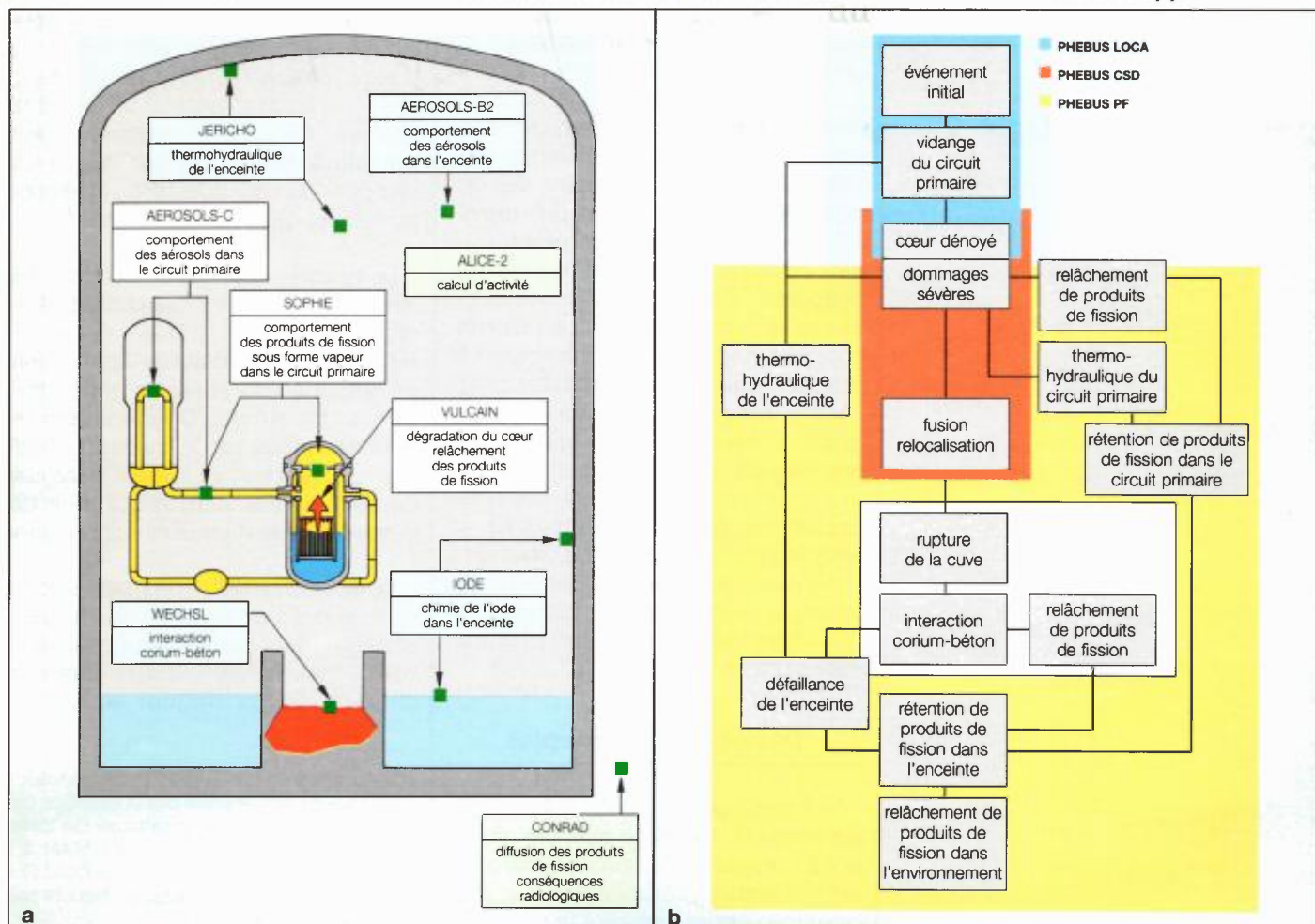
muler un grand nombre de données utilisées pour valider les modèles de base des codes de calcul. De multiples expériences de ce type ont été effectuées tant en thermohydraulique avec, par exemple, les programmes OMEGA et ERSEC menés au Centre d'études de Grenoble, que sur l'émission et le transfert des produits de fission. Dans ce dernier domaine, il faut citer le programme HEVA-VERCORS (Centre d'études de Grenoble) où sont étudiées les lois de relâchement des différents produits de fission par le combustible porté à haute température, et les programmes PITEAS et TUBA (Centre d'études de Cadarache) qui étudient le comportement des aérosols⁽¹⁾ dans des enceintes ou des tuyauteries.

(1) Les aérosols sont des particules très fines dont le diamètre est compris entre 0,1 et 50 μm . Ils sont issus des différents corps (produits de fission, combustible, gainage oxydé, matériau des barres de contrôle...) présents dans le cœur.

Les essais en pile

Il est cependant indispensable de réaliser un certain nombre d'expériences mettant en jeu du combustible nucléaire. L'étude de la thermomécanique d'un crayon combustible irradié ne peut en effet se faire de façon complète qu'en réacteur, en effectuant des essais sur le crayon combustible lui-même ; la thermique dépendant des caractéristiques du combustible et du jeu entre le combustible et la gaine, deux grandeurs qui évoluent de manière importante avec l'irradiation. Par ailleurs, si l'étude des propriétés mécaniques du gainage en fonction de l'irradiation peut être menée hors pile, par contre la détermination du seuil de rupture dépend des propriétés de la gaine, mais aussi de celles du combustible ; des recalages en réacteur sont nécessaires pour valider les travaux réalisés hors réacteur. Enfin, le chauffage neutronique est irrempla-

Figure 1.
Le système **ESCADRE** est un outil de calcul et de modélisation relativement simple. Il permet d'obtenir rapidement la valeur du rejet potentiel correspondant à différents scénarios accidentels. Il est composé de divers modules utilisables séparément ou de façon couplée (a), qui modélisent les différentes phases de l'accident (b).



cable dans le cas de géométries dégradées que nous retrouverons dans les expériences PHEBUS PF. Les autres moyens de chauffage (par effet Joule, par induction, par réaction chimique exothermique) sont soit fortement perturbés à des températures élevées, soit disparaissent lors d'une variation de géométrie (chauffage électrique), soit n'autorisent que des expériences de courte durée (chauffage chimique). Les essais en pile sont donc un moyen incontournable pour étudier le comportement du combustible et des produits de fission dans un réacteur au cours d'un accident.

Le programme

PHEBUS PF

Le programme expérimental PHEBUS PF est destiné à valider les codes de calcul mis en œuvre pour prévoir le relâchement des produits de fission par les éléments combustibles du cœur et leur comportement dans le circuit primaire et l'enceinte de confinement. L'intérêt de ce programme est de réaliser des expériences globales. Elles sont menées dans des installations offrant les conditions représentatives de celles d'un réacteur à eau sous pression, tant en ce qui concerne la source des produits de fission que les conditions qu'ils rencontrent dans leur cheminement et l'enchaînement des phénomènes successifs survenant dans un accident grave. C'est la première fois que cet enchaînement de phénomènes est reproduit expérimentalement. Les nombreuses autres expériences ne se sont, le plus souvent, intéressées qu'à une phase de l'accident dont, en particulier, la dégradation du combustible (programmes PBF aux Etats-Unis et PHEBUS CSD en France).

Des objectifs multiples

L'objectif de PHEBUS PF est de valider les codes de calcul de manière globale en comparant les pré-calculs avec les résultats expérimentaux. Ce programme servira à étudier le piégeage

des produits de fission dans les composants du circuit primaire d'un réacteur à eau sous pression et à étudier leur évolution dans l'enceinte de confinement. Il permettra d'identifier les marges d'incertitude dans l'évaluation du comportement de ces produits de fission.

Le programme prévoit six essais. Le premier (FPT0) utilise du combustible non irradié. Les cinq autres (FPT1 à FPT5) mettront en œuvre du combustible irradié en provenance du Centre d'études nucléaires de Mol en Belgique. Ces essais permettront d'étudier, avec des conditions aux limites bien définies, les phénomènes physiques majeurs d'un scénario accidentel pouvant intervenir dans un réacteur à eau sous pression.

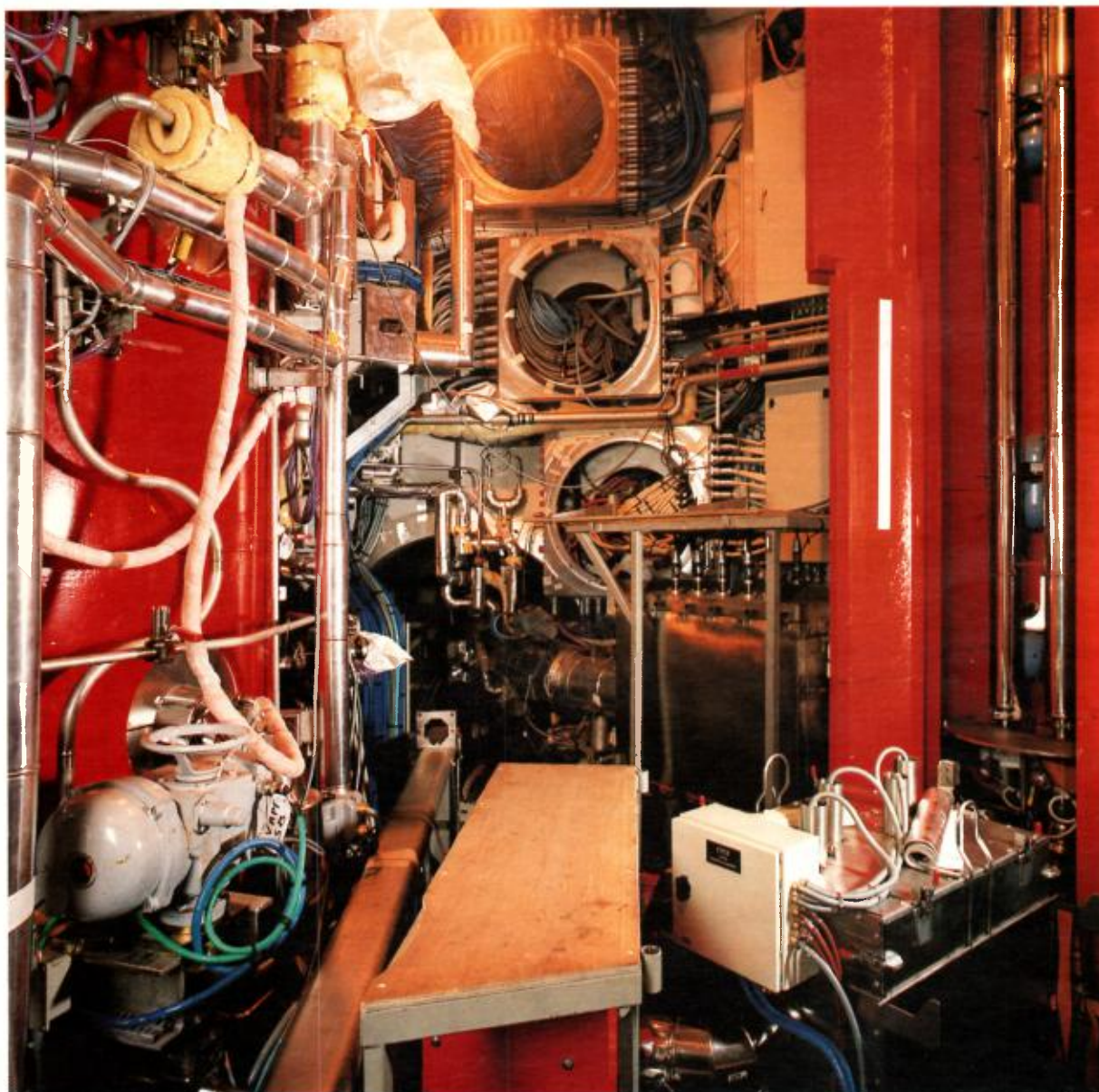
Des essais variés

L'essai FPT0 (*Fission Product Test No 0*), qui a été réalisé le 2 décembre, simule les conditions thermohydrauliques résultant d'une rupture sur la branche froide (entrée d'eau) d'un réacteur à eau sous pression. Il sert essentiellement à vérifier les performances de l'instrumentation et le comportement global de l'installation.

Le premier essai avec combustible irradié, FPT1, permettra d'étudier en milieu vapeur d'eau le dépôt des aérosols et des produits de fission dans un circuit comprenant un générateur de vapeur simulé. Il améliorera les connaissances sur la quantité d'iode gazeux qui peut se libérer dans une enceinte de confinement et sur les dépôts de césium dans le circuit primaire.

Le deuxième essai, FPT2, sera similaire au précédent du point de vue de la configuration, mais il sera réalisé en milieu hydrogéné⁽²⁾. Il sera ainsi possible de mieux simuler les phéno-

(2) Au cours d'un accident de réacteur, l'hydrogène est produit par la réaction chimique entre le Zircaloy (alliage de zirconium) et l'eau et vient donc s'ajouter à la vapeur d'eau qui entoure (et refroidit) le combustible, ceci notamment dans la partie supérieure du cœur.



Vue des différents éléments du caisson PHEBUS. Nous distinguons au fond l'extrémité de la ligne reliant le réacteur au circuit expérimental, sur la droite le générateur de vapeur, sur la gauche le réservoir simulant l'enceinte et entre ces composants les fours contenant l'instrumentation.

G. Lhoste-IPSN/DRS/COM

mènes observés lors de la fusion de la partie centrale du cœur de Three Mile Island, notamment une forte oxydation des gaines du combustible et un appauvrissement important en oxygène du milieu environnant.

Ces deux derniers essais se rapportent également à des phénomènes associés à un accident de type grosse brèche sur une tuyauterie d'alimentation d'un réacteur à eau sous pression, accident conduisant à une baisse de pression importante.

Les caractéristiques des trois essais ultérieurs, en cours de discussion, dépendront nécessairement des résul-

tats des essais précédents. A l'heure actuelle, il est envisagé d'étudier les phénomènes liés à un scénario accidentel où les conditions de dégradation du combustible d'essai atteintes sont telles qu'elles permettent l'étude des produits de fission peu volatils comme, par exemple, le strontium ou le ruthénium. L'étude d'un scénario entraînant une entrée d'air dans le cœur est également projetée.

Outre l'importance de l'instrumentation associée à tous ces essais, laquelle, dans certains cas, nécessite des développements spécifiques, il faut souligner que le programme PHEBUS PF ne prend tout son sens qu'accompa-

gné d'un vaste programme d'essais analytiques permettant de valider les modèles introduits dans les codes de calcul d'accident.

Une installation transformée

Situé à Cadarache, le réacteur expérimental PHEBUS a déjà servi à mener différentes recherches sur la sûreté des installations nucléaires. De 1978 à 1984, le programme LOCA (*Loss Of Coolant Accident*) s'y est déroulé. Il était destiné à l'étude du comportement du combustible d'un réacteur à eau sous pression lors d'un accident

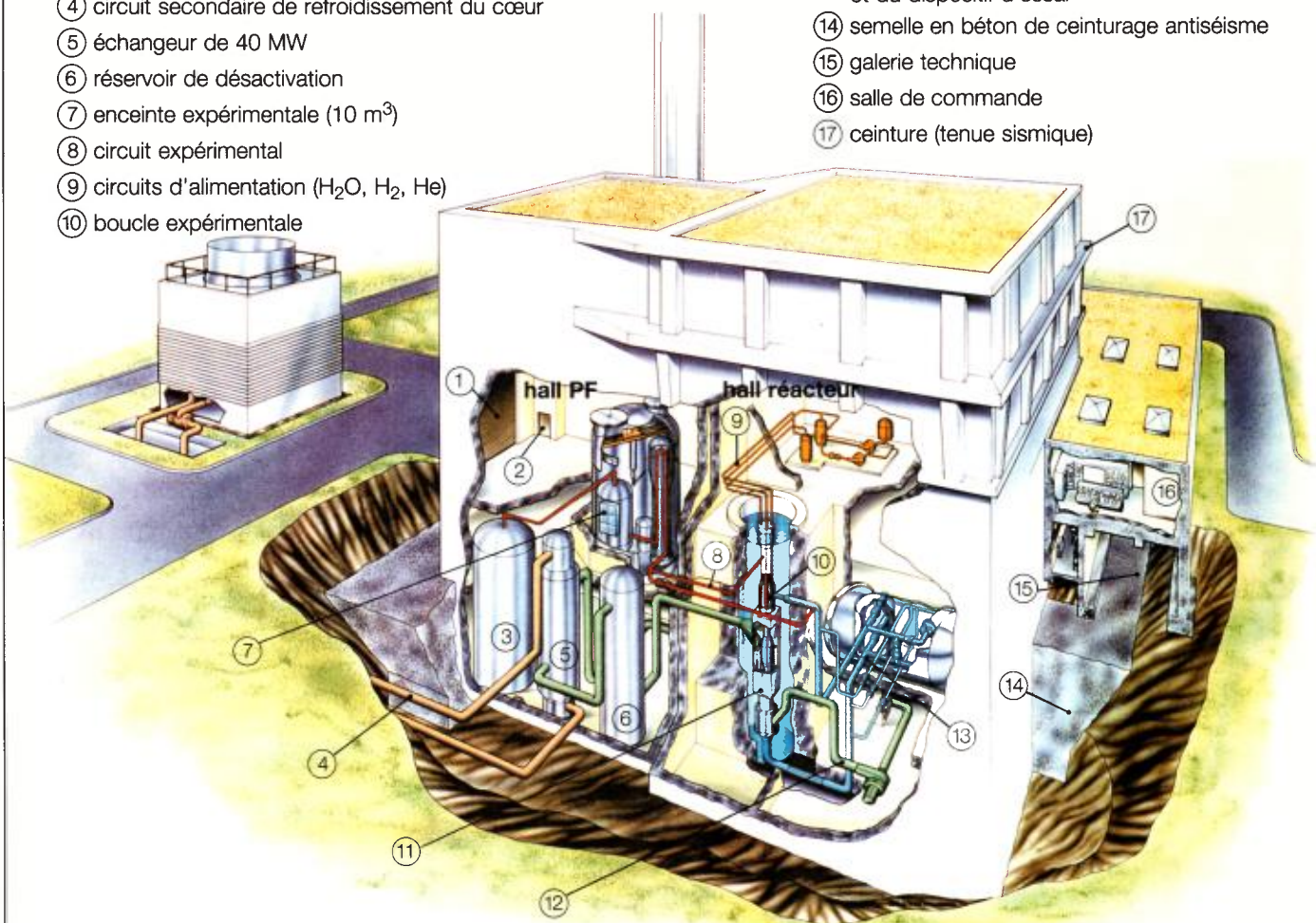
de perte de refroidissement primaire suite à la rupture franche d'une grosse tuyauterie du circuit primaire. Entre 1986 et 1989, le réacteur a hébergé le programme CSD (Cœur sévèrement dégradé) consacré à l'étude, dans des conditions représentatives de différents types d'accidents, de la dégradation d'un cœur.

Pour assurer le bon déroulement du programme PHEBUS PF, il a été nécessaire de réaliser un certain nombre de modifications importantes sur l'installation, dont en particulier un renforcement des bâtiments existants pour prendre en compte les évaluations actuelles des sollicitations sismiques sur le site (figure 2). Afin que les caractéristiques physico-chimiques du com-

Figure 2.
L'installation PHEBUS.
L'implantation des différents matériels indispensables au programme PHEBUS PF a nécessité la construction d'un nouveau bâtiment dit "extension PF" accolé au bâtiment réacteur ancien.

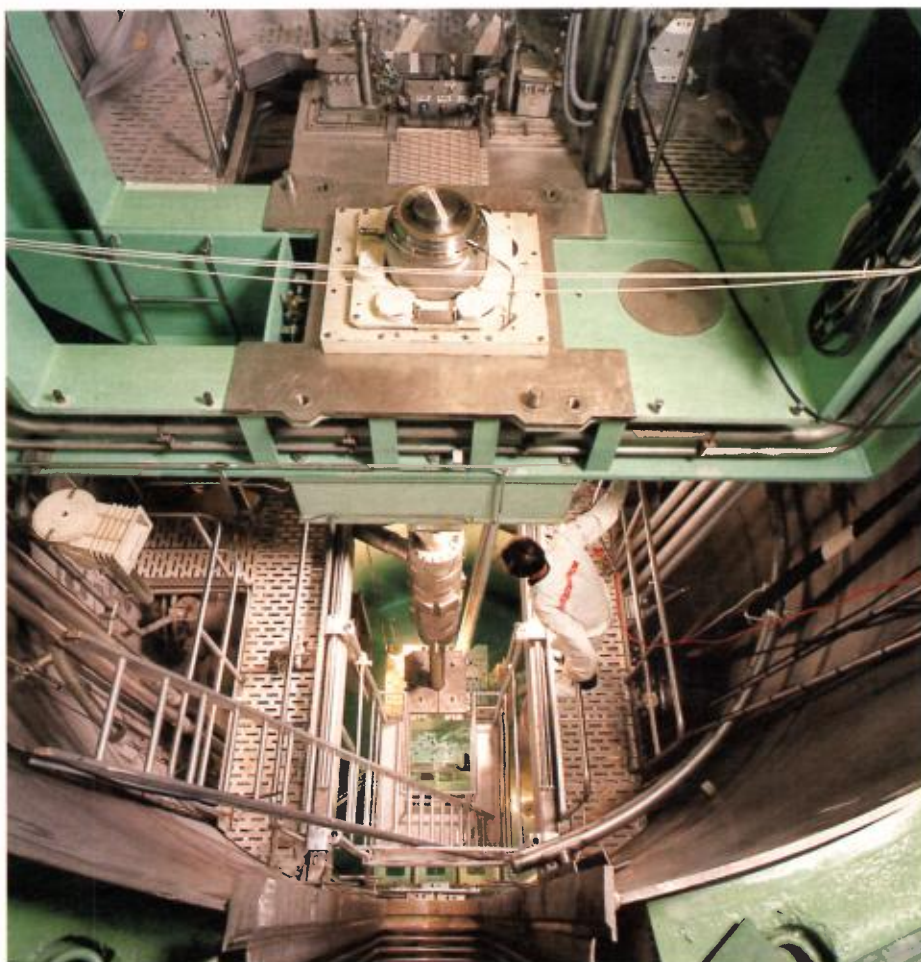
- ① sas pour camion
- ② sas d'accès à l'avant du caisson
- ③ stockage et désactivation des gaz de fission (100 m³)
- ④ circuit secondaire de refroidissement du cœur
- ⑤ échangeur de 40 MW
- ⑥ réservoir de désactivation
- ⑦ enceinte expérimentale (10 m³)
- ⑧ circuit expérimental
- ⑨ circuits d'alimentation (H₂O, H₂, He)
- ⑩ boucle expérimentale

- ⑪ cœur
- ⑫ circuit primaire de refroidissement du cœur
- ⑬ circuit de refroidissement du combustible et du dispositif d'essai
- ⑭ semelle en béton de ceinturage antiséisme
- ⑮ galerie technique
- ⑯ salle de commande
- ⑰ ceinture (tenue sismique)



bustible d'essai soient proches de celles d'un combustible de réacteur en service, le combustible, préalablement irradié dans le réacteur de puissance de Mol en Belgique, doit être ré-irradié durant deux à trois semaines dans le réacteur PHEBUS pour recréer les produits de fission à vie courte, disparus entre-temps. Le système de refroidissement du cœur a été modifié pour pouvoir fonctionner en continu. Les essais, qui prévoient une dégradation importante du combustible irradié, s'accompagneront d'une émission de produits de fission d'environ 10^{15} Bq. De plus, l'implantation des circuits à simuler nécessite une place importante. C'est pourquoi un caisson métallique, renfermant les circuits et un réservoir de 10 m³ simulant l'en- ceinte de confinement d'un réacteur, a été installé dans un nouveau bâtiment construit à côté de celui contenant le réacteur PHEBUS. Des murs en béton assurent la protection biologique de ce qui peut être considéré comme une cellule chaude.

L'expérience s'appuie sur trois composants majeurs. Une *grappe combustible* simule le cœur du réacteur nucléaire. Elle comporte 20 crayons de



Goulet-IPSN/DRS/COM

Vue du cœur du réacteur PHEBUS avant son chargement. Au centre, la boucle expérimentale qui contient la grappe combustible soumise à essai.

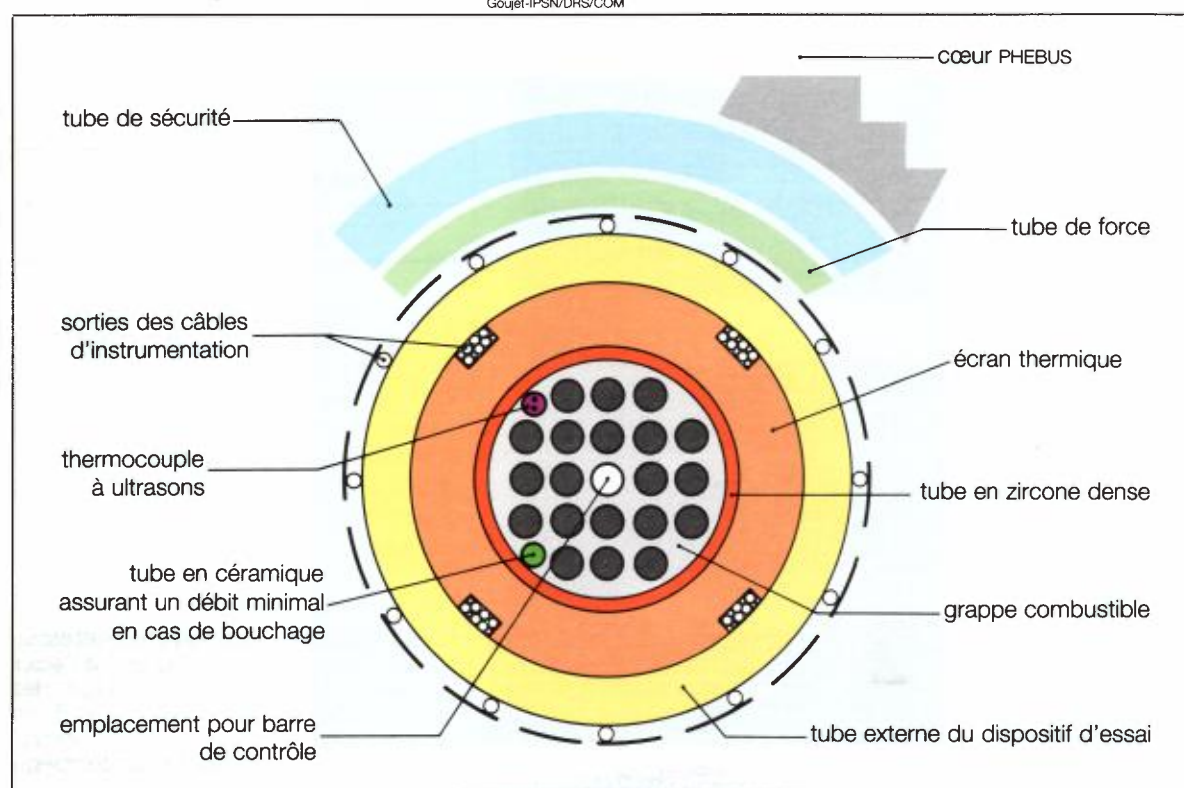


Figure 3. Coupe axiale de la grappe combustible et du dispositif d'essai.

80 cm de hauteur. Elle est contenue dans un dispositif d'essai équipé d'une importante instrumentation afin de suivre l'évolution des différents paramètres de l'essai comme la température, le débit, la pression ou le flux neutronique (figure 3). Ce dispositif d'essai est placé dans une boucle expérimentale située au centre du cœur du réacteur PHEBUS qui l'alimente en neutrons.

Le circuit expérimental simule les composants d'un réacteur à eau sous pression parcourus par des produits de fission lors d'un accident grave. Sa configuration variera selon les essais. L'instrumentation de ce circuit permet d'identifier et de mesurer l'activité des produits de fission qui le traversent et qui s'y déposent.

Le réservoir de 10 m³, qui sera utilisé pour l'ensemble des essais, simule l'enceinte du réacteur. Son volume,

défini à partir du rapport entre la quantité de combustible de la grappe et celle d'un réacteur, représente 1/5 000^e du volume d'une enceinte étanche d'un réacteur à eau sous pression. Le rapport entre la surface et le volume étant nettement différent de celui d'un réacteur, les parois du réservoir ont été rendues aussi neutres que possible pour les phénomènes étudiés. L'interaction entre l'atmosphère et la paroi sera étudiée sur un "condenseur" situé au centre du réservoir.

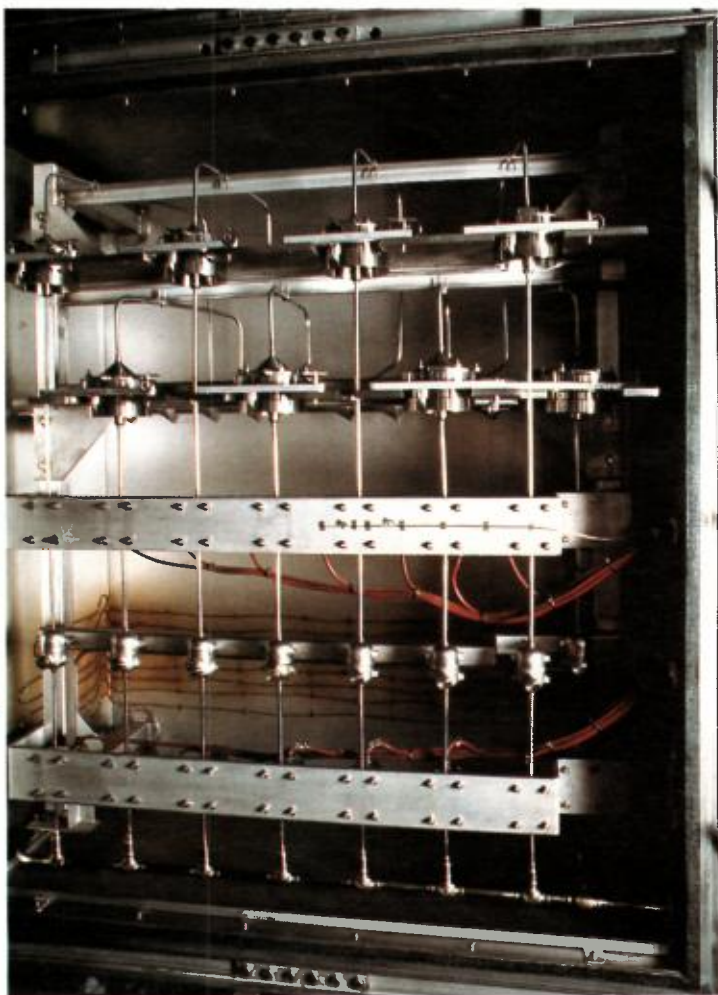
Outre ces trois composants essentiels, l'installation comporte une ligne de 5 m environ reliant le dispositif d'essai en pile au circuit expérimental. Nécessaire vu la géométrie de l'installation, cette ligne a été réalisée en Inconel⁽³⁾. Ce matériau de structure est porté à 700 °C au cours de l'essai, afin d'éviter qu'il ne piège de façon importante les produits de fission. Une ligne de dépressurisation, comprenant un réservoir de 100 m³, permet enfin de simuler une dépressurisation accidentelle de l'enceinte au cours d'un essai, puis de stocker les gaz rares après l'essai, avant rejet à l'atmosphère après décroissance radioactive. Différents capteurs, destinés à des mesures d'humidité, de pH..., sont implantés dans l'installation.

Le déroulement d'un essai

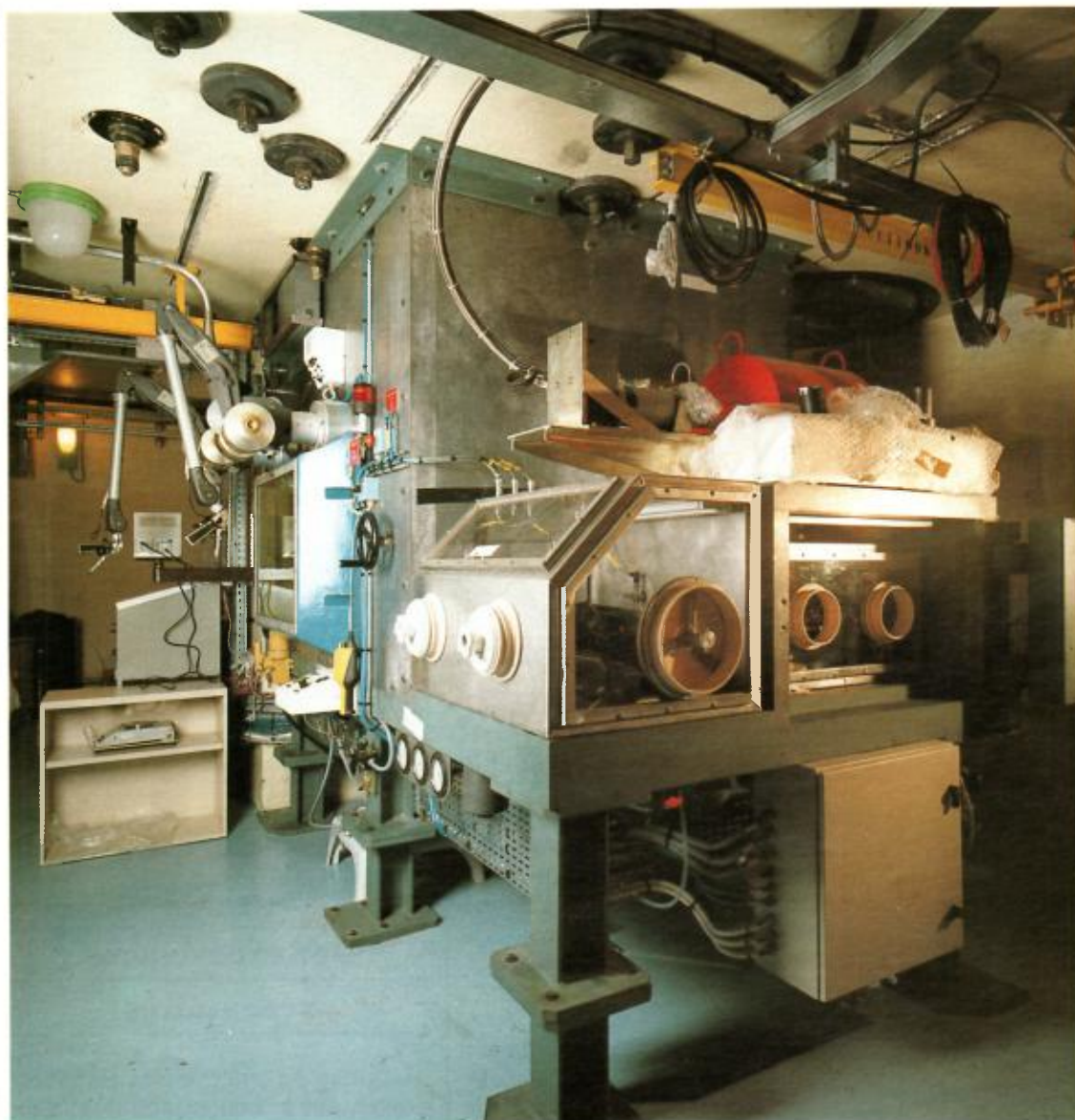
Selon le type d'essai, la définition des objectifs démarre environ trois ans avant la date de l'expérience. Entièrement conçu dix-huit mois avant sa réalisation, chaque essai donne lieu à la fabrication des matériels nécessaires et à l'élaboration d'un scénario, finalisé trois mois avant la date de l'expérience.

(3) Alliage à base de nickel, l'Inconel est un matériau présentant, par rapport à l'acier inoxydable utilisé dans les réacteurs, des caractéristiques mécaniques meilleures ainsi qu'une bonne résistance à la corrosion par la vapeur d'eau à haute température.

Instrumentation de l'enceinte de confinement. Four contenant des filtres suivis de capsules pour capter les aérosols et échantillonner les gaz.



G. Lhoste-IPSN/DRS/COM



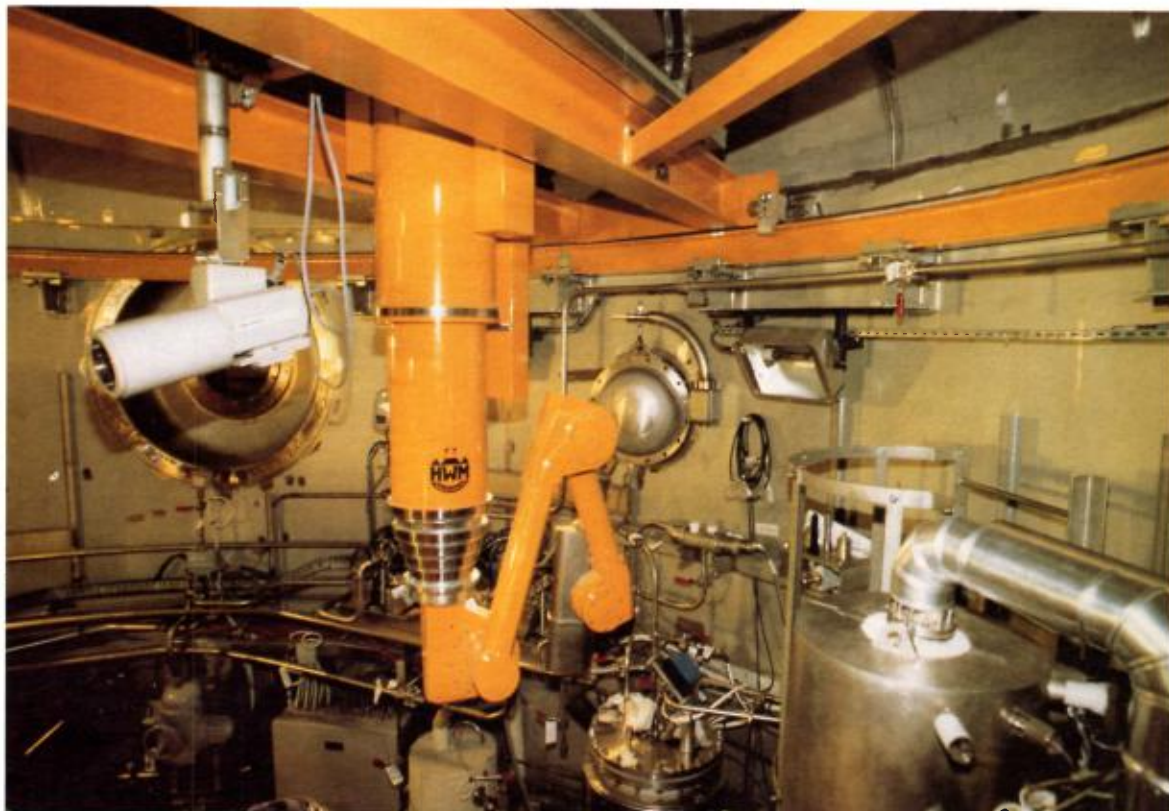
Cellule CECILE
destinée à la
mesure de
l'activité des
prélèvements
réalisés durant
l'essai PHEBUS
et à leur condi-
tionnement pour
examens en
cellule chaude.

G. Lhoste-IPSN/DRS/COM

Chaque essai met en jeu une dizaine de kilogrammes de combustible irradié. L'essai débute par une réirradiation, qui se déroule pendant une quinzaine de jours environ. Puis, le combustible est porté progressivement à une température allant jusqu'à la température de fusion (2 840 °C) afin de provoquer l'émission de produits de fission sous forme de gaz ou d'aérosols. Cette phase de dégradation du cœur et de relâchement des produits de fission dure quelques heures. Après l'essai, le combustible redescend à sa température normale. Ensuite, pendant plusieurs jours, des mesures sont effectuées sur le circuit expérimental et sur le réservoir simulant l'enceinte.

Puis vient la phase de récupération des instruments de mesure. Des comptages sont réalisés sur le site à l'aide d'un spectromètre gamma. Les instruments sont ensuite envoyés dans des laboratoires spécialisés qui, grâce à des mesures plus fines, déterminent les espèces chimiques présentes. Le dispositif d'essai fait lui-même l'objet d'une série de mesures par spectrométrie gamma, de radiographies et de tomographies afin d'évaluer sa dégradation. Puis il est envoyé en laboratoire chaud où la grappe combustible est découpée pour compléter ces examens. Cette phase d'acquisition des résultats expérimentaux dure environ six mois. Lorsque les instruments ont été récupérés, les circuits sont décon-

Dispositif servant à démonter les appareils de prélèvement et à démanteler les circuits après essai. Il comporte un bras télémanipulateur lourd porté par un pont tournant.



G. Lhoste-IPSN/DRS/COM

taminés et démantelés afin de permettre le montage de l'expérience suivante. Il faut compter près de quatre mois. Ce travail de démontage et d'analyse nécessitant beaucoup de temps, les essais ont été planifiés à raison d'un par an.

Un premier rapport est réalisé six à huit mois après l'essai. Il est complété, douze à quinze mois après la date de l'expérience, par les résultats des examens de la grappe et les mesures sur échantillons. L'interprétation globale ne sera terminée que deux ans et demi après l'essai. Il se déroulera donc environ cinq ans entre la définition des objectifs et l'introduction des enseignements tirés de l'expérience dans les modèles utilisés pour l'analyse de sûreté d'un réacteur. C'est pourquoi l'interprétation de l'ensemble des résultats du programme PHEBUS PF ne sera complète que vers l'an 2000.

Les déchets résultant de ces différentes opérations sont soit stockés, dans l'installation CASCAD de Cadarache quant au combustible, soit rentrent dans le traitement normal des déchets des réacteurs de puissance,

dans les installations de Marcoule en ce qui concerne les effluents liquides.

Des expériences nécessaires

La prise en compte des accidents graves dès la conception des réacteurs nucléaires permettra certainement de réduire les risques et les conséquences d'un tel accident. Par ailleurs, une bonne connaissance des phénomènes qui gouvernent le niveau de relâchement des produits de fission est indispensable pour optimiser les actions qui seraient mises en œuvre en cas d'accident sur un réacteur existant. Les résultats du programme PHEBUS PF amélioreront sensiblement les connaissances actuelles et contribueront à atteindre ces objectifs. ■

Alain Tattegrain
Département de recherches
en sécurité
Institut de protection
et de sûreté nucléaire
Centre d'études de Cadarache