

Document (A)

Les Piles atomiques
en France .

par Yvon
en 1957



Les piles atomiques en France

J. Yvon

► To cite this version:

J. Yvon. Les piles atomiques en France. J. Phys. Radium, 1957, 18 (10), pp.545-551.
<10.1051/jphysrad:019570018010054500>. <jpa-00235704>

HAL Id: jpa-00235704

<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00235704>

Submitted on 1 Jan 1957

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LE JOURNAL DE PHYSIQUE

ET

LE RADIUM

LES PILES ATOMIQUES EN FRANCE.

Par J. YVON,

Directeur du Département des Études de Piles au Commissariat à l'Énergie Atomique.

1. Récapitulation. — Voici la liste de nos piles construites, en construction ou dont le projet est déjà bien élaboré : 1° piles polyvalentes : Zoé, EL2 ; 2° pile laboratoire à haut flux : EL3 ; 3° piles laboratoires à flux moyen : Mélusine, Triton ; 4° piles à faible flux, métrologiques : Aquilon, Proserpine, Minerve ; 5° piles de puissance : G1, G2, G3, EDF1, pile de propulsion.

Les piles soulignées sont en service. Après les deux premières piles, Zoé et EL2, auxquelles on a demandé tout ce que pouvait donner la technique de l'époque, les piles se spécialisent. On compte sur 11 nouvelles piles, 6 piles d'étude contre 5 piles de production — plutonium ou énergie.

2. Études de réactivité. — Avant de construire un certain type de pile, on s'assure de ses qualités nucléaires par une expérimentation appropriée. Le procédé le plus sûr est de construire un modèle que l'on fait fonctionner à faible puissance. On effectue des mesures de criticalité, on détermine la répartition des neutrons avec des détecteurs, on essaie l'effet des dispositifs de réglage.

Aquilon (Saclay) sert à la mise au point des réseaux uranium-eau, qu'il s'agisse d'uranium et d'eau lourde ou d'uranium enrichi et d'eau légère. Il s'agit de déterminer au mieux les dimensions des barres d'uranium et leur équidistance. On peut faire varier la température au voisinage de l'ambiante et en déduire l'effet de la température sur la réactivité.

G1, pendant sa période d'étude neutronique — environ le premier semestre 56 — a joué pour les piles à graphite le même rôle qu'Aquilon pour les piles à eau. On ne pouvait naturellement agir sur l'équidistance, mais on a pu agir de bien des manières sur le chargement.

Quand on manque de matériaux, on se contente

de procéder à une expérience exponentielle. Des sources radium-béryllium alimentent en neutrons le réseau étudié. C'est ainsi que nous avons étudié le système uranium naturel-glucine (BeO).

La glucine destinée aux piles est une céramique de densité 3 qui se présente sous forme de briques de 50 à 100 mm de côté. Dans notre expérience, les barres d'uranium avaient 29,2 mm de diamètre. Les gaines en aluminium avaient 1 mm d'épaisseur. Le réseau était carré, avec un pas de 150 mm. Les barres étaient logées dans des canaux carrés de 50 mm de côté. On a déduit des mesures les tonnages d'uranium et de glucine nécessaire pour obtenir la divergence dans ces conditions (sans réflecteur) : uranium : 7,2 tonnes ; glucine : 33,4 tonnes.

Pour situer les qualités de la glucine vis-à-vis de l'eau lourde et du graphite, indiquons l'ordre de grandeur des tonnages d'uranium qui sont nécessaires pour faire diverger une pile de faible puissance avec l'un ou l'autre modérateur (avec un réflecteur en graphite) : eau lourde : 1,5 ; glucine : 3,5 (réseau ci-dessus) ; graphite : 19.

La glucine apparaît comme un succédané du graphite, à la fois plus coûteux et plus efficace. Nous étudions l'emploi de la glucine dans les piles de puissance.

Proserpine (Saclay) permettra de poursuivre des études de criticalité avec des solutions aqueuses de plutonium. Ce sera notre première pile homogène, fort modeste mais aussi fort délicate. Proserpine dispose de barres de sécurité mues par une arbalète : ses auteurs affirment que ce dispositif est le plus rapide du monde. Le réflecteur de Proserpine est en glucine. Proserpine divergera cet été.

L'emploi de quantités industrielles de matières nucléaires, combustibles, modérateurs, matériaux de structure, nécessite un contrôle de leur compo-

sition chimique ou de leur composition isotopique. Ce contrôle peut être demandé aux analystes de la spécialité, mais un contrôle dans les conditions d'emploi, c'est-à-dire dans un flux de neutrons, est indispensable. Zoé a servi pendant plusieurs années aux travaux de ce type. La tendance est maintenant d'employer deux méthodes différentes.

Les gros échantillons sont examinés fort simplement à l'aide d'une source de radium béryllium. En simplifiant, disons qu'il s'agit de mesures par transmission. Les petits échantillons nécessitent des moyens plus coûteux : on introduit l'échantillon dans une pile de faible puissance. Les mesures sont du type statique ou du type dynamique : ce dernier cas est celui de Zoé. La sensibilité est meilleure dans une petite pile à uranium enrichi. C'est ce programme que remplira Minerve (Fort de Châtillon, devenu maintenant le Centre d'Études Nucléaires de Fontenay-aux-Roses). Une tâche importante de Minerve sera l'examen des qualités résiduelles des combustibles usagés. Minerve entrera en service avant deux ans. Ce ne sera nullement une pile énergétique : Minerve sera un instrument de physique.

3. Piles à flux moyen. — Mélusine sera la fée du Centre d'Études Nucléaires de Grenoble. Ce sera une pile du type inventé à Oak Ridge sous le nom de pile piscine. Des cartouches d'uranium enrichi sont immergées dans une piscine pleine d'eau pure. L'eau sert de modérateur et de réfrigérant. Mélusine fournira des rayonnements pour des études diverses : on imagine des études de chimie sous radiation, des recherches sur le comportement de l'hydrogène dans une pile, des études du corps solide par diffraction de neutrons. Mélusine disposera de grand moyens intellectuels.

Triton (Fontenay-aux-Roses) est une pile piscine analogue à Mélusine, mais elle servira de source pour l'étude des écrans protecteurs. Il s'agit de la protection biologique, ou protection du personnel et de la protection du matériel, dite dans certains cas, protection thermique. Il faut contrôler les matériaux, par exemple l'acier boré, étudier la décroissance des rayonnements à travers les projets de massifs protecteurs, étudier les fuites par les canalisations, évaluer l'efficacité des chicanes qu'elles comportent afin de réduire ces fuites. On mesure les neutrons thermiques, les neutrons rapides, les γ . Les piles Mélusine et Triton seront achevées avant deux ans. Les cartouches seront de fabrication américaine.

4. EL2. — La première pile de Saclay, que nous appelons maintenant qu'il y en a d'autres, EL2, a fait l'objet d'une communication à la conférence de Genève, qui portait en sous-titre : « Expérience acquise en deux ans sur le transfert de chaleur par

gaz comprimé. » L'expérience a continué et je vais en indiquer les développements.

À Genève il avait été dit que les fuites de gaz étaient importantes. Depuis les fuites de la centrale anglaise de Calder Hall ont été évoquées dans la presse spécialisée. A Saclay, la principale cause des fuites a été identifiée : il existe trois soufflantes montées en parallèle pour faire circuler le gaz — explicitement du gaz carbonique. Deux de ces engins sont en service et le troisième sert de secours. L'étanchéité correctement assurée quand la soufflante est en service, devient médiocre quand elle est stoppée. C'est par la soufflante de secours et ses vannes que se produisent les fuites.

Il est arrivé que des injections d'huile pénètrent dans le réseau de gaz carbonique. On a sorti de la pile des cartouches recouvertes d'une pellicule d'huile polymérisée. Une telle pellicule est peu favorable à la transmission de la chaleur et fort désagréable si on pense à quel point on essaie d'éviter une surchauffe de la cartouche, qu'il s'agisse de la gaine en magnésium ou du cœur en uranium. Désormais, pour arrêter cette huile et toutes les poussières en général, on oblige le gaz, dans sa totalité, à traverser à chaque tour des filtres en bronze fritté. Étant donné qu'il fallait limiter les pertes de charge provoquées par ces filtres, ceux-ci ont reçu une grande étendue. La section droite des filtres atteint 25 m². Cette filtration, totale ou en dérivation, quel que soit le fluide employé, devient une règle générale des circuits de piles.

Lors de la conférence de Genève, la question suivante nous avait été posée : Que faites-vous s'il y a une rupture de gaine ? Nous avions pu répondre fièrement que nous n'avions pas l'expérience d'un tel ennui. Ce qui prouvait que nos cartouches étaient d'une bonne fabrication. Mais, il faut l'avouer aussi, qu'elles n'avaient pas atteint un âge avancé.

L'année passée notre expérience s'est améliorée à cet égard. Un jeu neuf est entré en service le 19 octobre 1955. D'autre part l'eau lourde, qui primitivement était stagnante, a été mise en circulation continue. Un échangeur eau lourde-eau industrielle permet de maintenir l'eau lourde à une température inférieure à 50°. On y trouve deux avantages : d'une part une amélioration de la réactivité, d'autre part la possibilité de purifier l'eau lourde d'une manière continue. L'amélioration de la réactivité a permis de combattre l'empoisonnement du combustible par les produits de fission, du moins l'empoisonnement rapide dû au xénon 135 et de porter la puissance de 1 500 à plus de 2 000 kW. L'expérience acquise par les exploitants aidant, la pile a pu fonctionner assez régulièrement. Au 16 juillet 1956 elle avait développé 8 368 000 kWh, ou, si on préfère, 350 mégawatt jour (MWJ). Cette unité est commode par ce que la combustion de 1 g

d'uranium dégage environ 1 MWJ. Comme la pile contient une charge d'uranium de 3 tonnes, on avait extrait de chaque tonne d'uranium 115 MWJ.

Le cœur de la pile est trois fois plus actif que la moyenne. Il en résulte que dans le cœur, notre expérience, en matière d'irradiation d'uranium, a atteint le taux de 350 MWJ/T.

A la date indiquée il n'a pas été possible d'aller plus loin à la suite d'incidents qui avaient commencé à se manifester dès le 1^{er} juin. Le 9 juin la température de sortie d'une cellule, appelons la C1, s'est élevée de manière anormale. Simultanément une activité anormale est décelée au voisinage des soufflantes. La pile est arrêtée. Le gaz carbonique est évacué progressivement par la cheminée : il présente une certaine activité, qui n'est toutefois pas dangereuse. Les dalles qui constituent le toit de la pile sont enlevées, certaines têtes de cellule montrent une activité élevée, particulièrement la tête de la cellule C1. Le 14 juin les cellules suspectes, sauf C1, sont extraites par du personnel muni de combinaisons étanches : après l'opération une certaine contamination apparaît sur les gants et les outils. Les barres extraites sont examinées aux rayons X par télévision.

Le lendemain 15 juin, la barre C1 est extraite à son tour sous atmosphère d'argon après rinçage par une huile fluide peu combustible qui se rassemble au fond du plongeur correspondant. L'extraction a lieu sans incident. L'examen aux rayons X montre un fort gonflement de la gaine de la 3^e cartouche (en partant du haut). On peut supposer que la gaine est rompue, sans que l'observation permette de le prouver.

Le 16 juin la barre C1 est remplacée par une barre neuve et la pile est remise en service. Des mesures d'activité diverses, le Service de Protection contre les Radiations a déduit que 25 g environ d'uranium avaient brûlé, que seuls les produits de fission gazeux avaient été entraînés avec le gaz carbonique. L'oxyde d'uranium et les produits solides formés par les transformations de l'uranium s'étaient sans doute fixés sur les canalisations, celles-ci étant un peu huileuses. La cartouche incriminée était une cartouche périphérique, donc peu irradiée. Mais, voisine d'une plaque de réglage, elle a dû subir de nombreux cyclages thermiques.

Le 14 juillet une activité nettement anormale et due à des produits de fission se manifeste à nouveau dans le gaz carbonique. Le 16 juillet on décide d'arrêter la pile et remplacer en totalité le jeu des cartouches en service par un jeu neuf. Cette fois la cartouche coupable était une cartouche relativement centrale : à l'observation la gaine manifestait une véritable déchirure. Mais la pile a été arrêtée assez rapidement pour qu'une nouvelle contamination puisse être évitée. Avant de remettre la pile en marche, d'importants travaux ont été nécessaires : nettoyage des canalisations conta-

minées, installation des filtres déjà signalés sur le circuit de gaz carbonique, installation de filtres à la base de la cheminée.

En outre a été mise en service une installation qui était seulement en préparation lors de l'accident : à la sortie de chaque cellule une fine canalisation prélève une petite quantité de fluide qui est envoyée devant des compteurs de rayonnement : si la gaine se rompt ou présente une fêlure, des produits de fission se répandent dans le gaz ; afin d'assurer une certaine sélectivité le compteur est protégé de manière à ne compter que les β durs caractéristiques des produits de fission gazeux (krypton et xénon). Une telle installation a été imaginée et réalisée par le Service des Constructions Électriques. Lorsqu'une cellule s'avère défectueuse, il ne reste plus qu'à arrêter la pile et à décharger la file de cartouches incriminée. La détection de rupture de gaine permet d'intervenir avant que la fêlure ne soit franche de même que le thermocouple, moins spécifique, permet d'intervenir si une grosse déformation précède une fêlure.

L'uranium utilisé dans EL2 est de l'uranium obtenu par coulée. Il est à gros grains et présente une structure macroscopique isotrope. En service, sous l'effet des fissions qui se produisent dans son sein, les barres d'uranium se courbent comme le montre l'examen aux rayons X. Si une rupture de gaine s'amorce, l'uranium gonfle, ce qui entraîne une rupture franche. Mais même l'existence d'une courbure est gênante : l'uranium se décentre par rapport à la canalisation, la veine de gaz s'étrangle dans certaines régions, il en résulte des surchauffes qui risquent d'accélérer les phénomènes de déformation.

D'autre part l'uranium devient très cassant. Une étude américaine a été communiquée sur ce sujet, sous le n° 13, à la récente conférence de Philadelphie. La fragilité apparaît aux plus faibles irradiations étudiées, soit 200 MWJ/T et quelle que soit la température. Les auteurs pensent que les produits de fission tels que césium, baryum, strontium, rubidium, xénon et krypton qui ont des diamètres atomiques supérieurs à ceux de l'uranium, sont dégorgés dans de petites craquelures qui se produisent dans le métal.

Quelle que soit l'explication, l'existence de fêlures a été observée par nos métallurgistes. Je désire n'anticiper ici que le moins possible sur leurs futures publications. Je dirait seulement que l'uranium extrait en juillet dernier de EL2 après un repos de plusieurs mois qui l'a rendu moins actif, a été soumis à des observations micrographiques. Les observations montrent l'apparition de petites fentes atteignant 1 mm. On peut se demander ce qui advient si ces fentes se multiplient et se relient les unes aux autres.

Pour le moment, munie d'un nouveau jeu de fabrication identique au précédent, EL2 fonctionne

régulièrement et sans incidents à 2 200 KW avec arrêt les lundis pour le déchargement des radio-isotopes.

L'exposé a sans doute largement montré comment le fonctionnement de la pile EL2 a été riche d'enseignement. De plus les rayonnements délivrés par EL2 sont utilisés par de nombreux expérimentateurs. Vous en aurez la preuve par la liste de travaux qui était en cours à bord de cette pile dans la semaine du 29 avril au 6 mai 1957 :

Canal E1. — Étude de structures cristallines par diffraction de neutrons, 24 heures sur 24.

Canal E3. — Ce canal pourvoit en permanence à l'alimentation en neutrons d'un spectromètre à temps de vol.

Canal E2. — Ce canal, mal situé, n'a jamais été utilisé.

Canaux S4 à S8. — Fabrication de radioéléments artificiels.

Canal S2. — Ce canal débite des neutrons en vue de la mesure du libre parcours moyen des neutrons dans le graphite.

Canaux S1 et S3. — Études de corrosion en présence d'eau stagnante.

Canal N1. — Mesure du module d'élasticité d'un alliage de magnésium sous rayonnement.

Canal N2. — Essai de petites cartouches gainées de zirconium à 400° en atmosphère de gaz carbonique. En cas d'incident la pile est stoppée automatiquement.

Canal N3. — Irradiation d'uranium fortement enrichi — afin d'activer les phénomènes. Circulation de thermofluide.

Canal N4. — Mesure de la résistivité du niobium et du tantale irradié. Circulation d'azote liquide.

Canal N5. — Irradiation de rats vivants.

Canal N6. — Irradiation de graphite dans une boucle de gaz carbonique. Température : 450°, pression : 15 HPZ.

Canal N7. — Irradiation de magnésium en atmosphère de gaz carbonique sous 15 HPZ.

Canal N8. — Étude de détection de rupture de gaine en milieu aqueux (application future à EL3).

Canal N9. — En attente pour une étude de corrosion de métal de gainage en atmosphère humide.

Canal N10. — Irradiation de graphite et de métaux de structure.

Ces canaux sont des canaux horizontaux. On utilise aussi des canaux verticaux qui pénètrent dans le cœur même de la pile :

Canal central. — Une douzaine de containers où on irradie des produits divers.

CV1 et CV2. — Irradiation de quartz et de graphite.

Dans un certain nombre de canaux, le travail a lieu à l'intérieur de convertisseurs : ce sont des

tubes d'uranium qui doivent être refroidis sans défaillance et qui assurent la transformation des neutrons thermiques incidents en neutrons rapides. Tels sont : S1, S3, N6, N7, N10, CV1 et CV2. Pendant la même semaine la colonne thermique a servi à des essais de chambre d'ionisation. Enfin dans 4 cellules de la pile étaient en essai des cartouches nouvelles destinées à remplacer le modèle actuel.

5. **EL3.** — La pile EL3 est en achèvement à Saclay à côté de EL2. Nous espérons qu'elle pourra diverger en juillet prochain. L'expérience de EL2 nous a montré notamment qu'il était désirable de disposer d'un engin susceptible de délivrer des rayonnements intenses à de nombreux expérimentateurs simultanément. Le flux de EL2 en neutrons thermiques, au centre, est de 10^{13} n/cm⁻²/sec⁻¹. EL3 doit atteindre à pleine puissance un flux dix fois plus élevé. Une telle pile, à la fois engin de laboratoire et pile de flux élevé, est ce qu'on appelle une pile à haut flux. Pour chiffrer sommairement l'avantage d'une pile à haut flux, disons que les mêmes expériences demanderont dix fois moins de temps dans EL3 que dans EL2. Il y a actuellement en service une pile à haut flux au Canada, la plus ancienne, deux ou trois aux États-Unis, une en Angleterre, mais il en est projeté d'autres un peu partout.

Les piles à haut flux sont toutes des piles froides : on évite d'élever la température du fluide primaire et, autant que possible, d'avoir à se poser des problèmes de contrainte thermique et de corrosion. Dans EL3 le modérateur et le fluide primaire sont l'eau lourde. Le combustible est de l'uranium légèrement enrichi. La pile EL3 sera caractérisée par d'incomparables commodités expérimentales. Comme toute expérience sous flux élevé entraîne l'activation de toutes sortes de substances qu'il faut ensuite extraire ou qui circulent dans des canalisations, les espaces réservés, les massifs de bétons sont impressionnants. Le gros œuvre a un aspect babylonien. Il sera sans doute utile de vous reparler de cette pile lorsqu'elle aura acquis des états de service.

L'efficacité de EL3 suppose la possibilité d'examiner les matériaux et les combustibles irradiés après leur sortie de la pile. Un laboratoire spécialisé dans l'observation des substances très actives est pour cette raison en construction dans son voisinage.

6. **Piles à graphite et à uranium naturel.** — Le Centre de Marcoule sera doté de trois piles à graphite et à uranium naturel. La première, G1, a divergé fin 56, début 57. G2, divergera au début de 1958 et G3 quelques mois plus tard. Ce sont des piles plutonigènes. À ce titre, ce qui compte surtout c'est la puissance thermique, 40 MW pour G1, 150 pour les deux autres.

Dans G1, le fluide primaire est de l'air qui est puisé dans l'atmosphère puis rejeté par une haute cheminée. L'air qui sort de la pile est assez chaud pour animer une petite centrale électrique qui a été installée par l'Électricité de France. Cette centrale a une puissance nominale de 5 000 KW alors que les soufflantes en consomment 8 000. Cette centrale a fonctionné pour la première fois le 25 septembre dernier. Les gaz chauds sortaient de la pile à une température juste suffisante, un peu plus de 150°. Cette température était inférieure à la température prévue qui était 180° environ et évidemment assez peu favorable. La limitation de la température est imposée dans une pile avant tout par la résistance des cartouches et dans le cas présent par la tenue des gaines de magnésium dans l'air : on évite de laisser le magnésium dépasser en quelque endroit que ce soit une certaine température limite. Disons par exemple 300°.

Les cartouches portent 6 ailettes longitudinales qui facilitent le transfert de la chaleur : l'efficacité de ces dispositifs a donc été un peu inférieure à ce qu'avaient prévu le calcul et les essais de laboratoire hors pile. Pour profiter au mieux de la température tolérée, il existe des boisseaux qui permettent de régler le débit d'air cellule par cellule, cependant que des thermocouples mesurent sa température. Il y a 2 674 cellules, donc 2 674 thermocouples à lire et 2 674 boisseaux à régler pour amener la pile au régime optimum.

Un bon réglage suppose évidemment un certain entraînement du personnel. La pile a été conçue de manière que le réglage puisse s'effectuer pile en marche, à cet égard le matériel a donné satisfaction. Maintenant que la pile est en service, on peut espérer améliorer la situation de deux manières : d'une part en recherchant si la température de 280° n'est pas une limite exagérément prudente. On peut tolérer quelques ruptures de gaines pourvu qu'elles soient peu fréquentes et il faudra monter peu à peu la température jusqu'à atteindre un tel régime. On compte, bien entendu, sur le dispositif de détection de ruptures de gaines pour alerter les opérateurs avant que toute rupture ne devienne sérieuse. D'autre part on améliorera le type de cartouche, par exemple du point de vue de la résistance du magnésium à la corrosion. Pour le moment G1 fonctionne régulièrement à 32 MW. Comme EL2, G1 nous apprendra beaucoup de choses sur les aspects de la vie d'une pile. C'est un sujet sur lequel les publications officielles sont généralement pudiques ou tardives et où rien ne remplace l'expérience personnelle. G2 et sa sœur G3 n'utiliseront plus l'air comme fluide primaire, mais comme EL2, du gaz carbonique comprimé en circuit fermé.

Voici quelques caractéristiques de ces piles qui vous permettront de vous faire une image de ces engins. Une publication préliminaire en a été pré-

sentée à la conférence de Genève (volume III, p. 99) : L'empilement de graphite est constitué par des briques d'une longueur de 1 m à 1 m 50 et d'une section carrée 200 × 200 mm. Il y aura 1 300 tonnes de graphite dans la pile. Les briques sont disposées horizontalement. Elles comportent des chanfreins et elles sont juxtaposées de manière à réserver les canaux où sera déposé l'uranium. Le nombre de canaux sera de 1 200. Leur diamètre 70 mm. Le diamètre de la région occupée par l'uranium atteindra 7,85 m. Les dimensions extérieures de l'empilement sont les suivantes : hauteur : 9,40 m ; longueur : 9,05 m ; largeur : 9,53 m.

Le graphite aura une densité de 1,70 et une section efficace de capture pour les neutrons inférieure à 3,9 millibarn.

Les cartouches ont 300 mm de longueur. Il y en a 28 par canal. Elles présentent 16 ailettes dont 4 ailettes porteuses qui centrent l'uranium dans le canal et 12 ailettes plus courtes servant uniquement au transfert de la chaleur. Dans les canaux centraux le diamètre de l'uranium sera de 28 mm. Dans les canaux périphériques, où le problème d'évacuer la chaleur est moins exigeant, le diamètre atteindra 31 mm. L'excès de réactivité sera absorbé par du thorium.

L'empilement est entouré par une protection thermique, puis par une enveloppe résistante qui permettra de tenir le gaz carbonique à une pression de 15 hectopièzes. L'originalité de la solution est que cette enveloppe n'est pas en acier soudé mais en béton précontraint. Le béton réalise à la fois l'enveloppe résistante et la protection biologique. Il semble qu'il y ait là une tentative pleine de promesse. Le béton est doublé intérieurement d'une peau d'étanchéité en acier de 30 mm d'épaisseur. Le système des barres de contrôle est analogue à celui de G1. Il travaille dans l'enceinte étanche. Il est possible de laisser évoluer le gaz à une température plus élevée dans les canaux périphériques que dans les canaux centraux. On a voulu profiter de cette possibilité pour améliorer le rendement de la centrale adjacente, mais il en résulte quelques complications de structure.

La pile est borgne : le caisson ou l'enveloppe étanche comporte une ouverture devant chaque canal de la pile, mais seulement sur une face. Le chargement s'effectue par cette face, le déchargement s'effectue automatiquement par des glissières appropriées disposées devant la face opposée de l'empilement. Le chargement et le déchargement s'effectueront en marche. L'appareil de chargement pèsera 200 tonnes.

Le débit dans le circuit primaire atteint environ 700 kg par seconde. Dans le gaz carbonique on admet de porter le magnésium à 400°. On s'est fixé de plus de ne dépasser nulle part 550° dans l'uranium. Les températures d'entrée et de sortie

du gaz carbonique primaires sont les suivantes :

	ENTRÉE	SORTIE
— centre	80	310
— périphérie.....	150	350

Le gaz carbonique primaire est mis en mouvement par deux soufflantes centrifuges entraînées directement par des turbines à vapeur. La puissance totale de soufflage (primaire + secondaire destiné à protéger l'enveloppe contre l'échauffement) atteindra 5 300 KW. Le gaz carbonique vaporise l'eau industrielle dans les échangeurs. La vapeur restera à une pression inférieure à celle du gaz : 10,5 HPZ au maximum. On évite ainsi le risque de rentrée d'eau dans la pile : on craint en effet son contact avec le magnésium. L'eau surchauffée atteindra 335°.

On escompte obtenir 35 MW aux bornes de l'alternateur.

7. Centrales atomiques. — Si G2 est une pile plutonigène, c'est donc en même temps la source de chaleur d'une véritable centrale de production d'énergie électrique. Il est probable que la centrale G2 n'est que le premier exemplaire de tout une série d'engins du même type. Ce sera tout au moins le cas de EDF1 et de EDF2. La construction d'une série d'engins construits sur le même principe est une étape marquante du développement de l'énergie atomique. Le fonctionnement de la pile EL2 a été puissamment instructif et il en est résulté d'abord de nombreux perfectionnements qui ont été apportés à cet engin lui-même : il s'est trouvé en effet que cette pile était assez souple — et aussi assez modeste — pour admettre de nombreuses modifications. Mais on conçoit que la sortie de nouveaux engins copiés successivement les uns sur les autres, et toutefois progressivement améliorés, permette de dépasser le stade d'une conception théorique et de parvenir à des réalisations d'un emploi pratique et d'une bonne efficacité. La cadence à laquelle nos piles sont projetées ne permet malheureusement pas de profiter, lors du dessin de l'engin n , des connaissances acquises par le fonctionnement de l'engin $n - 1$ ni même peut-être par celui de l'engin $n - 2$. Le développement des connaissances générales, les progrès de nos méditations, le rodage des études et des procédés constructifs assurent néanmoins que chaque étape puisse comporter plusieurs pas en avant.

Les grands problèmes sont : la tenue du graphite et celle des cartouches. Le graphite gonfle sous l'effet des chocs neutroniques, c'est l'effet Wigner. Les lois du phénomène, la « guérison » qui est apportée par un réchauffage, sont maintenant convenablement connues mais c'est une chose de connaître les lois et une autre de réaliser un empiement complexe qui en évite les inconvénients.

Plus sérieuse encore est la question des car-

touches. Dans une pile plutonigène comme G1 ou G2 les cartouches sont renouvelées assez fréquemment, mais dans une pile à objectif énergétique, ce procédé n'est pas économique. Il faut allonger la vie des cartouches. Les facteurs par lesquels on espère agir sont les suivants :

- 1° affinement du grain de l'uranium,
- 2° isotropie de l'uranium,
- 3° effet stabilisateur de quelques impuretés,
- 4° réduction des efforts mécaniques demandés à l'uranium,
- 5° régularité du régime d'exploitation.

Les impuretés sont des additions minimales qui ne doivent pas perturber la réaction en chaîne. La régularité de fonctionnement réduit le nombre des cyclages thermiques.

Il est regrettable qu'EL3 ne nous ait pas encore permis d'étudier systématiquement les cartouches destinées aux piles de puissance.

Une amélioration des températures obtenues dans une pile à gaz comprimé est favorable au rendement. On ne peut espérer des progrès rapides dans ce domaine en se contentant d'améliorer peu à peu les grandes piles à graphite. Nous nous proposons d'examiner à part le problème des hautes températures en construisant une pile de puissance modeste et de dimensions limitées dont l'objectif principal sera de fonctionner à température très élevée. Dans ce petit engin on pourra prendre des risques. Le combustible sera de l'uranium enrichi. Cette pile pourra servir aussi de prototype pour des moteurs de propulsion.

8. Le sodium fondu. — Quel que soit leur mode d'utilisation, nos piles à graphite fourniront d'importantes quantités de plutonium. Le plutonium sera utilisé à son tour comme combustible peut-être pour « doper » les piles même qui auront servi à le produire. Mais, du point de vue de l'économie des combustibles nucléaires, la meilleure manière de l'utiliser est d'en charger un breeder. La vocation du breeder est de ne consommer que de la matière fertile et de produire de la matière fissile.

La construction d'un breeder suppose de nombreuses études préliminaires. Parmi celles-ci il en est une qui a été attaquée anciennement : c'est l'emploi du sodium liquide comme fluide primaire. Un circuit à sodium fondu a fonctionné pour la première fois au Fort de Châtillon à la fin de 1955. Maintenant, entre autres, un circuit qui débite 600 KW est en service. Ces circuits fonctionnent à 500°. Ce sont des circuits « hors pile ». Il faudra étudier le comportement du matériel en question sous radiation : un circuit au sodium sera installé dans un canal expérimental de EL3. Avant de l'appliquer aux breeders, nous envisageons d'apprendre à nous servir du sodium dans une pile en construisant un engin moins original à neutrons thermiques.

9. Pile de propulsion. — Des communiqués officiels ont annoncé que des études relatives à un propulseur atomique marin étaient en cours. La pile envisagée est une pile à eau lourde et à uranium naturel. L'eau lourde est à la fois le modérateur et le fluide primaire. Elle est maintenue liquide à la température d'emploi grâce à une pression convenable : la pile est du type pressurisé. Il ne fait aucun doute que l'engin est lourd et encombrant. Les solutions futures utiliseront un combustible plus réactif que l'uranium naturel. En même temps on éliminera l'eau lourde.

Quoi qu'il en soit l'étude est instructive. Elle comporte de nombreux problèmes spécifiques de la propulsion : protection allégée, fonctionnement à allures variables par exemple. Mais d'autre part elle nous instruit sur des problèmes qui intéressent aussi la construction de centrales à eau pressurisée, qu'il s'agisse d'eau lourde ou d'eau ordinaire, le combustible étant de l'uranium naturel ou de l'uranium enrichi suivant le cas.

La tendance présente est de renoncer à l'uranium métallique et d'utiliser l'uranium sous forme d'oxyde UO_2 . C'est un réfractaire qui ne conduit pas trop mal la chaleur. Le réseau est moins compact que celui du métal. Même s'il fond localement ou s'il se fendille, il ne semble pas qu'il mette la gaine en péril. De plus il n'est pas combustible. On imagine des cartouches qui pourraient résister à des irradiations de 10 000 MWJ/T. Avec l'uranium naturel, cela veut dire qu'on a consommé une grande partie de l'uranium 235 qu'il contient et aussi une partie du plutonium qui s'est formé progressivement. 1 % de l'uranium mis en œuvre est ainsi épuisé d'une seule traite.

Cette technique est séduisante. Elle est moins satisfaisante avec l'uranium franchement enrichi par ce qu'alors le combustible s'épuise sans se renouveler aussi complètement. Dans le cas de l'uranium enrichi la meilleure manière de procéder est sans doute de le diluer dans du thorium. Un taux d'enrichissement très élevé est alors nécessaire.

Conclusion. — Pour me limiter j'ai décrit l'essentiel de nos constructions sans faire référence à ce

qui se passe dans d'autres pays. Il est clair que le développement d'une industrie aussi vaste que l'industrie atomique ne s'effectue pas sans échanges internationaux. Malgré le secret qui l'entoure, d'origine militaire au départ, et maintenant de nature industrielle, une foule d'idées et de connaissances, dont certaines fondamentales, nous sont venues d'outre-mer et quelques autres de régions plus continentales. Les échanges de matières premières atomiques par contre ont été longtemps impossibles. Nos premières réalisations n'ont profité que d'une importation : celle de l'eau lourde norvégienne. Les quantités disponibles étaient d'ailleurs limitées. Nos piles à graphite utilisent de l'uranium et du graphite français. Notre programme était imposé par ces ressources. Leur restriction nous a peut être évité de divaguer ; il n'y a pas lieu de la regretter beaucoup. La pile EL3a marque une étape dans les facilités d'importation, car l'uranium enrichi est anglais et l'eau lourde américaine. Il est un peu démoralisant d'importer sans exporter, aussi ajouterai-je sans préciser qu'il nous arrive également d'exporter des matériaux d'intérêt atomique. D'ici quelques années, en France et aussi en Europe, il s'agit de faire face à ce qui nous paraît aujourd'hui une impressionnante demande d'énergie. J'ai essayé de vous faire connaître les moyens, les connaissances, l'expérience qui ont été accumulés en France en matière de piles, pour répondre à cette demande.

Beaucoup de travail a été effectué. Je ne crois pas qu'on aurait pu nous en demander beaucoup plus. Je crois aussi que le moment n'est pas venu de se reposer et qu'il ne reste qu'à continuer.

Les travaux qui ont donné la matière de cette conférence ont été l'œuvre d'innombrables personnes de rang élevé et de rang moins élevé appartenant au Commissariat à l'Énergie Atomique, à d'autres Corps de l'État et à l'Industrie privée. Je ne risque pas d'oublier personne en les remerciant collectivement. Je remercie aussi la Société Française de Physique de m'avoir donné l'occasion de faire le point sur un sujet qui est certainement d'actualité.

Manuscrit reçu le 18 juin 1957.