

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](#))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

NOTICE DE LA REVUE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Auteur collectif - Revue
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1949-2003
Collation	167 vol.
Nombre de volumes	167
Cote	INDNAT
Sujet(s)	Industrie
Note	Numérisation effectuée grâce au prêt de la collection complète accordé par la Société d'encouragement pour l'industrie nationale (S.E.I.N.)
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039224155
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT
LISTE DES VOLUMES	
	1949, n° 1 (janv.-mars)
	1949, n° 2 (avril-juin)
	1949, n° 3 (juil.-sept.)
	1949, n° 4 (oct.-déc.)
	1949, n° 4 bis
	1950, n° 1 (janv.-mars)
	1950, n° 2 (avril-juin)
	1950, n° 3 (juil.-sept.)
	1950, n° 4 bis
	1951, n° 1 (janv.-mars)
	1951, n° 2 (avril-juin)
	1951, n° 3 (juil.-sept.)
	1951, n° 4 (oct.-déc.)
	1952, n° 1 (janv.-mars)
	1952, n° 2 (avril-juin)
	1952, n° 3 (juil.-sept.)
	1952, n° 4 (oct.-déc.)
	1952, n° spécial
	1953, n° 1 (janv.-mars)
	1953, n° 2 (avril-juin)
	1953, n° 3 (juil.-sept.)
	1953, n° 4 (oct.-déc.)
	1953, n° spécial
	1954, n° 1 (janv.-mars)
	1954, n° 2 (avril-juin)
	1954, n° 3 (juil.-sept.)
	1954, n° 4 (oct.-déc.)
	1955, n° 1 (janv.-mars)

	1955, n° 2 (avril-juin)
	1955, n° 3 (juil.-sept.)
	1955, n° 4 (oct.-déc.)
	1956, n° 1 (janv.-mars)
	1956, n° 2 (avril-juin)
	1956, n° 3 (juil.-sept.)
	1956, n° 4 (oct.-déc.)
	1957, n° 2 (avril-juin)
	1957, n° 3 (juil.-sept.)
	1957, n° 4 (oct.-déc.)
	1957, n° spécial (1956-1957)
	1958, n° 1 (janv.-mars)
	1958, n° 2 (avril-juin)
	1958 n° 3 (juil.-sept.)
	1958, n° 4 (oct.-déc.)
	1959, n° 1 (janv.-mars)
	1959, n° 2 (avril-juin)
	1959 n° 3 (juil.-sept.)
	1959, n° 4 (oct.-déc.)
	1960, n° 1 (janv.-mars)
	1960, n° 2 (avril-juin)
	1960, n° 3 (juil.-sept.)
	1960, n° 4 (oct.-déc.)
	1961, n° 1 (janv.-mars)
	1961, n° 2 (avril-juin)
	1961, n° 3 (juil.-sept.)
	1961, n° 4 (oct.-déc.)
	1962, n° 1 (janv.-mars)
	1962, n° 2 (avril-juin)
	1962, n° 3 (juil.-sept.)
	1962, n° 4 (oct.-déc.)
	1963, n° 1 (janv.-mars)
	1963, n° 2 (avril-juin)
	1963, n° 3 (juil.-sept.)
	1963, n° 4 (oct.-déc.)
	1964, n° 1 (janv.-mars)
	1964, n° 2 (avril-juin)
	1964, n° 3 (juil.-sept.)
	1964, n° 4 (oct.-déc.)
	1965, n° 1 (janv.-mars)
	1965, n° 2 (avril-juin)
	1965, n° 3 (juil.-sept.)
	1965, n° 4 (oct.-déc.)
	1966, n° 1 (janv.-mars)
	1966, n° 2 (avril-juin)
	1966, n° 3 (juil.-sept.)
	1966, n° 4 (oct.-déc.)
	1967, n° 1 (janv.-mars)
	1967, n° 2 (avril-juin)
	1967, n° 3 (juil.-sept.)

	1967, n° 4 (oct.-déc.)
	1968, n° 1
	1968, n° 2
	1968, n° 3
	1968, n° 4
	1969, n° 1 (janv.-mars)
	1969, n° 2
	1969, n° 3
	1969, n° 4
	1970, n° 1
	1970, n° 2
	1970, n° 3
	1970, n° 4
	1971, n° 1
	1971, n° 2
	1971, n° 4
	1972, n° 1
	1972, n° 2
	1972, n° 3
	1972, n° 4
	1973, n° 1
	1973, n° 2
	1973, n° 3
	1973, n° 4
	1974, n° 1
	1974, n° 2
	1974, n° 3
	1974, n° 4
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	1975, n° 1
	1975, n° 2
	1975, n° 3
	1975, n° 4
	1976, n° 1
	1976, n° 2
	1976, n° 3
	1976, n° 4
	1977, n° 1
	1977, n° 2
	1977, n° 3
	1977, n° 4
	1978, n° 1
	1978, n° 2
	1978, n° 3
	1978, n° 4
	1979, n° 1
	1979, n° 2
	1979, n° 3
	1979, n° 4
	1980, n° 1
	1982, n° spécial

	1983, n° 1
	1983, n° 3-4
	1983, n° 3-4
	1984, n° 1 (1er semestre)
	1984, n° 2
	1985, n° 1
	1985, n° 2
	1986, n° 1
	1986, n° 2
	1987, n° 1
	1987, n° 2
	1988, n° 1
	1988, n° 2
	1989
	1990
	1991
	1992
	1993, n° 1 (1er semestre)
	1993, n° 2 (2eme semestre)
	1994, n° 1 (1er semestre)
	1994, n° 2 (2eme semestre)
	1995, n° 1 (1er semestre)
	1995, n° 2 (2eme semestre)
	1996, n° 1 (1er semestre)
	1997, n° 1 (1er semestre)
	1997, n°2 (2e semestre) + 1998, n°1 (1er semestre)
	1998, n° 4 (4e trimestre)
	1999, n° 2 (2e trimestre)
	1999, n° 3 (3e trimestre)
	1999, n° 4 (4e trimestre)
	2000, n° 1 (1er trimestre)
	2000, n° 2 (2e trimestre)
	2000, n° 3 (3e trimestre)
	2000, n° 4 (4e trimestre)
	2001, n° 1 (1er trimestre)
	2001, n° 2-3 (2e et 3e trimestres)
	2001, n°4 (4e trimestre) et 2002, n°1 (1er trimestre)
	2002, n° 2 (décembre)
	2003 (décembre)

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Titre	L'Industrie nationale : comptes rendus et conférences de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale
Volume	1975, n° 1
Adresse	Paris : Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1975

Collation	1 vol. (64 p.) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	68
Cote	INDNAT (110)
Sujet(s)	Industrie
Thématique(s)	Généralités scientifiques et vulgarisation
Typologie	Revue
Langue	Français
Date de mise en ligne	03/09/2025
Date de génération du PDF	08/09/2025
Recherche plein texte	Non disponible
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?INDNAT.110

Note d'introduction à [l'Industrie nationale \(1947-2003\)](#)

[L'Industrie nationale](#) prend, de 1947 à 2003, la suite du [Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#), publié de 1802 à 1943 et que l'on trouve également numérisé sur le CNUM. Cette notice est destinée à donner un éclairage sur sa création et son évolution ; pour la présentation générale de la Société d'encouragement, on se reportera à la [notice publiée en 2012 : « Pour en savoir plus »](#)

[Une publication indispensable pour une société savante](#)

La Société, aux lendemains du conflit, fait paraître dans un premier temps, en 1948, des [Comptes rendus de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#), publication trimestrielle de petit format résumant ses activités durant l'année sociale 1947-1948. À partir du premier trimestre 1949, elle lance une publication plus complète sous le titre de [L'Industrie nationale. Mémoires et comptes rendus de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale](#).

Cette publication est différente de l'ancien [Bulletin](#) par son format, sa disposition et sa périodicité, trimestrielle là où ce dernier était publié en cahiers mensuels (sauf dans ses dernières années). Elle est surtout moins diversifiée, se limitant à des textes de conférences et à des rapports plus ou moins développés sur les remises de récompenses de la Société.

[Une publication qui reflète les ambitions comme les aléas de la Société d'encouragement](#)

À partir de sa création et jusqu'au début des années 1980, [L'Industrie nationale](#) ambitionne d'être une revue de référence abordant, dans une sélection des conférences qu'elle organise — entre 8 et 10 publiées annuellement —, des thèmes extrêmement divers, allant de la mécanique à la biologie et aux questions commerciales, en passant par la chimie, les différents domaines de la physique ou l'agriculture, mettant l'accent sur de grandes avancées ou de grandes réalisations. Elle bénéficie d'ailleurs entre 1954 et 1966 d'une subvention du CNRS qui témoigne de son importance.

À partir du début des années 1980, pour diverses raisons associées, problèmes financiers, perte de son rayonnement, fin des conférences, remise en question du modèle industriel sur lequel se fondait l'activité de la Société, [L'Industrie nationale](#) devient un organe de communication interne, rendant compte des réunions, publiant les rapports sur les récompenses ainsi que quelques articles à caractère rétrospectif ou historique.

La publication disparaît logiquement en 2003 pour être remplacée par un site Internet de même nom, complété par la suite par une lettre d'information.

Commission d'histoire de la Société d'Encouragement,

Juillet 2025.

Bibliographie

Daniel Blouin, Gérard Emptoz, [« 220 ans de la Société d'encouragement »](#), Histoire et Innovation, le carnet de recherche de la commission d'histoire de la Société d'encouragement, en ligne le 25 octobre 2023.

Gérard EMPTOZ, [« Les parcours des présidents de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale des années 1920 à nos jours. Deuxième partie : de la Libération à nos jours »](#), Histoire et Innovation, carnet de recherche de la commission d'histoire de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, en ligne le 26 octobre 2024.

S. E. I. N.
Bibliothèque

L'INDUSTRIE NATIONALE

*Comptes rendus et Conférences
de la Société d'Encouragement
pour l'Industrie Nationale*

*fondée en 1801
reconnue d'utilité publique*

•

Revue trimestrielle
1975 - N° 1

•

SOMMAIRE

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

— La naissance de l'Hélicoptère,

par M. J.-P. OEMICHEN, p. 5

— Le programme français des Réacteurs à Neutrons Rapides,

par M. Jean VILLENEUVE, p. 21

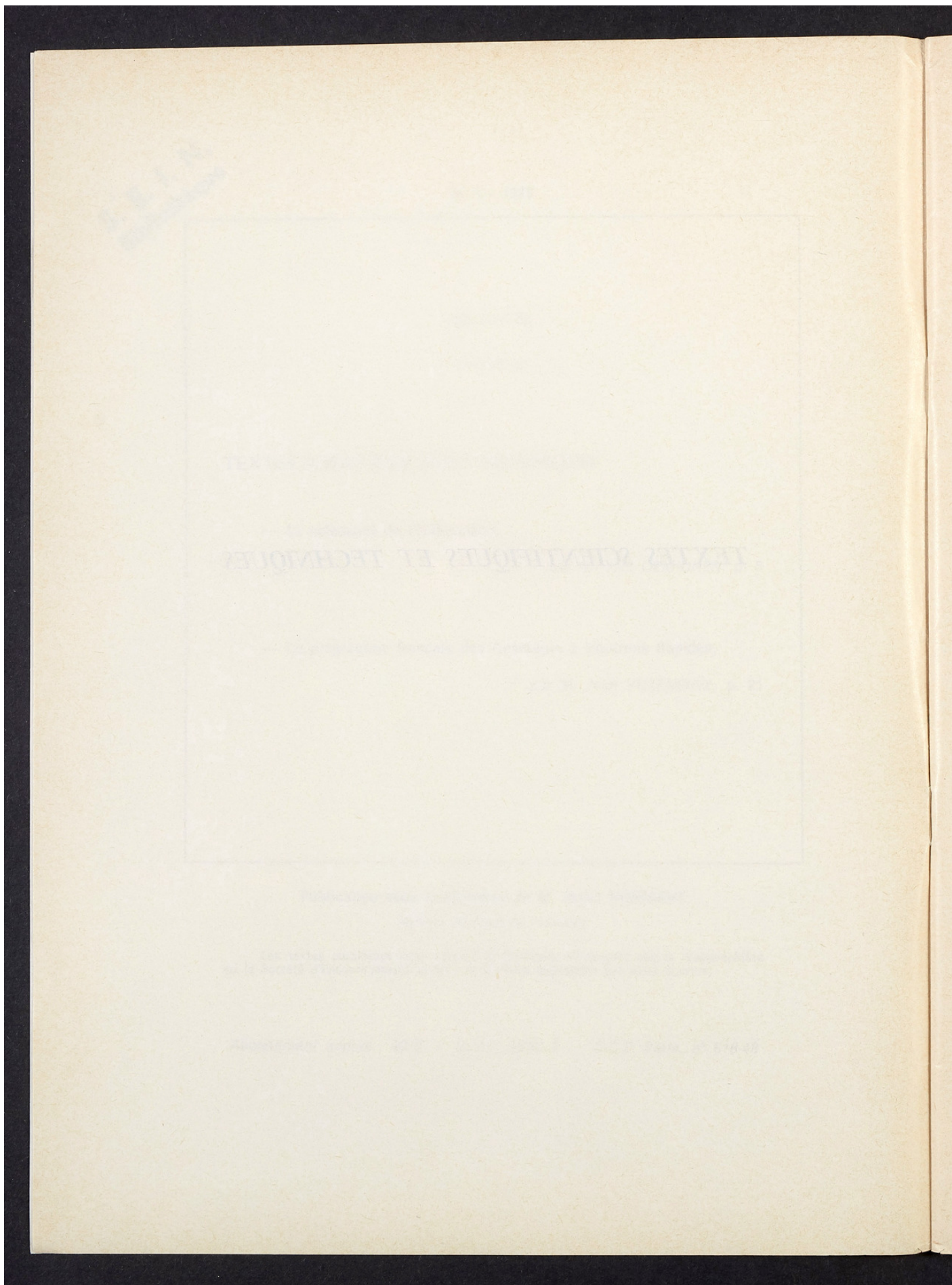
Publication sous la direction de M. Henri NORMANT

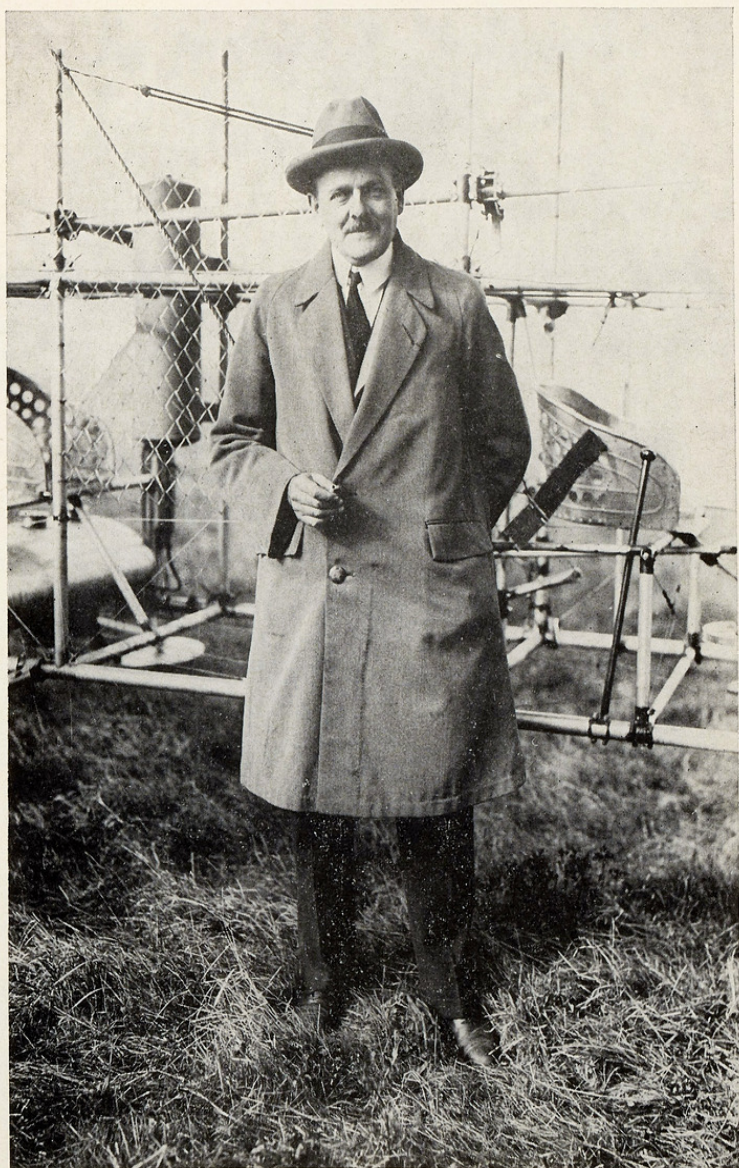
Membre de l'Institut, Président

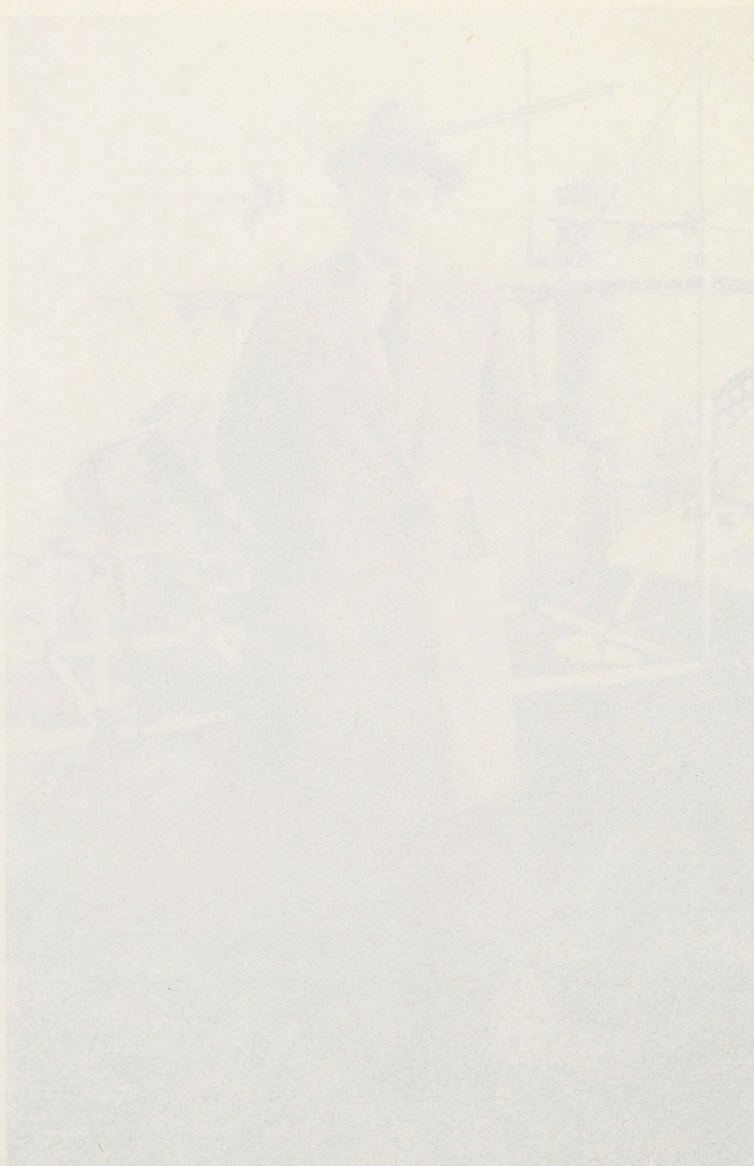
Les textes paraissant dans *L'Industrie Nationale* n'engagent pas la responsabilité de la Société d'Encouragement quant aux opinions exprimées par leurs auteurs.

Abonnement annuel : 40 F le n° : 20,00 F C.C.P. Paris, n° 618-48

TEXTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES







La naissance de l'hélicoptère^()*

par J.-P. OEHMICHEN,
fils de l'Inventeur
Etienne OEHMICHEN

Reportons-nous par la pensée à un jour qui date d'un peu plus de cinquante ans. Nous sommes le 4 mai 1924, et, dans la plaine d'Arbouans (un petit village à huit kilomètres de la frontière Suisse,

près de Montbéliard), dans l'air froid du petit matin, quelqu'un vole dans « une drôle de machine » comme dit le film qui parle des pionniers de l'aviation.

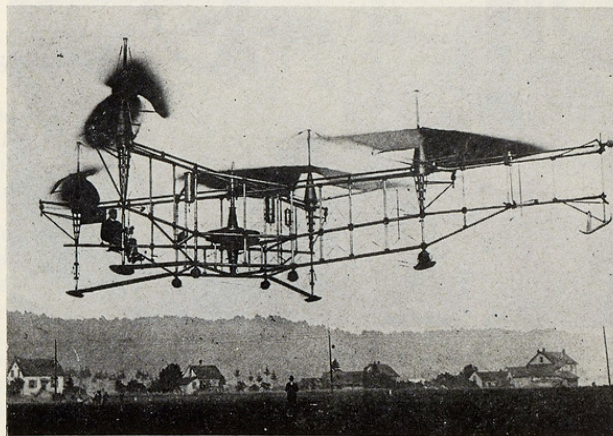


PHOTO B. — L'hélicoptère n° 2 en vol (cet appareil boucla le premier kilomètre en circuit fermé, le 4 mai 1924).

Cet homme, c'est mon père, Etienne Oehmichen. Il vole à bord de son hélicoptère n° 2 et il est en train de boucler, le premier au monde, un kilomètre en circuit fermé.

Oh, il n'est pas le premier à avoir essayé des hélicoptères, il y a eu, dans

cette voie, des pionniers intéressants, et nous y reviendrons plus tard. Mais il est le premier de tous à faire ce kilomètre, en un parcours bouclé sur lui-même, un cercle de plus de 300 m de diamètre, avec retour au point de départ, matérialisé par un piquet planté dans le sol, sur lequel s'agite un petit drapeau blanc.

(*) Conférence prononcée dans l'Hôtel de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, le 9 janvier 1975.

Pourquoi est-ce donc si important de faire ainsi un kilomètre en circuit fermé ? Parce que c'est la preuve que l'on contrôle l'appareil, que l'on peut le manier, le piloter, qu'il répond aux commandes, qu'il fait plus que de quitter le sol et de s'y reposer.

Et pourtant, comme cela est difficile de suivre la route indiquée. L'appareil est vraiment rudimentaire, il est rétif, difficile à piloter, nécessitant une attention constante pour compenser les irrégulari-

tés de traction des hélices. Voici qu'une des courroies qui commande une hélice s'est mise à glisser et l'appareil, déséquilibré, penche de côté. Par bonheur, la courroie qui commande une autre hélice se met à en faire autant, ce qui rétablit partiellement l'équilibre. L'air siffle dans les grandes hélices entoilées et le pilote doit certainement penser à ces vers de Virgile qu'il aimait tant, parlant du vol d'Icare :

« Carpebat aera tenerum stridentibus
[aliis] »

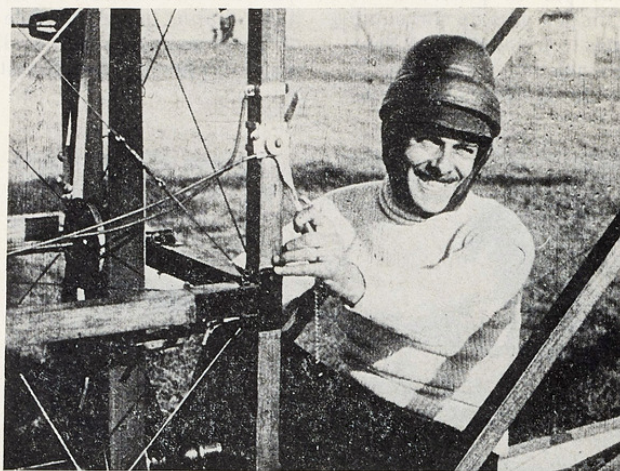


PHOTO E. — Etienne Oehmichen aux commandes l'hélicoptère n° 2.

L'hélicoptère ne vole pas haut, entre deux et cinq mètres du sol, juste assez pour échapper partiellement aux remous traîtres de l'« effet de sol », si pernecieux pour l'équilibre de la machine. Mètre après mètre, il grignote la distance à parcourir, et, déjà, le pilote peut voir le petit drapeau devant lui, le point d'arrivée.

Ce drapeau se rapproche, finit par arriver tout près. L'appareil se place juste au-dessus, le petit lambeau blanc est violemment rabattu vers le sol par le vent des hélices, au point de se confondre avec le piquet, et l'hélicoptère descend,

arrivant jusqu'au sol et écrasant le piquet sous un de ses patins d'atterrissage. La performance est accomplie !

C'est vraiment un jour historique, c'est aussi une belle réussite pour la France, pour le pays qui vit le premier vol en avion (bien ignoré, hélas) sous la commande de Clément Ader.

Nous avons précisé qu'il s'agissait de l'hélicoptère n° 2 d'Etienne Oehmichen. Il y avait eu, en effet, un n° 1, muni d'un ballonnet gonflé d'hydrogène, servant essentiellement à la stabilisation, car son pouvoir ascensionnel pouvait juste équilibrer un poids de 70 kg.

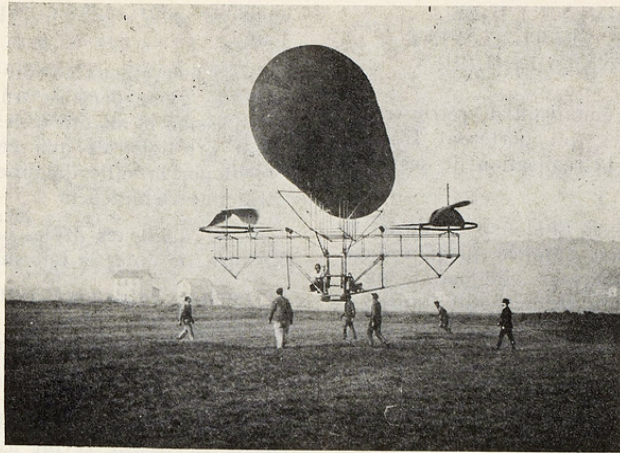


PHOTO A. — Vol de l'hélicoptère n° 1 (1921).

LES PRECURSEURS

Nous allons revenir un moment sur le point de vue historique et rappeler l'œuvre des précurseurs de l'hélicoptère, car il est important de leur rendre hommage.

Il y eut d'abord des modèles réduits, qui volèrent pour de vrai, et le plus étonnant est sans doute que le premier vol de modèle date de cent quatre-vingt-dix ans ! On a de la peine à le croire, et cependant c'est vrai : un modèle dû à Launoy et Bienvenu a volé en 1784 (nous disons bien mil *sept* cent quatre-vingt-quatre, sous le règne de Louis XVI !), ainsi que l'atteste un rapport déposé le 1^{er} mai 1784 à l'Académie des Sciences par la commission composée de Cousin, Meusnier, Jeaurat et Legendre.

Il faut attendre presque cent ans ensuite pour voir voler de nouveaux modèles, en particulier ceux de Penaud et Tatin en 1870.

Le résultat qui fut peut-être le plus intéressant comme dernier essai sans pilote fut l'hélicoptère de Enrico Forlanini, qui pesait 4 kg et vola à Milan en 1877 avec un moteur à vapeur. Il atteignit l'altitude de 15 m.

Il faut également signaler le modèle de Ponton d'Amécourt, dont le moteur était tout à fait remarquable, et qui put s'alléger notablement, mais sans toutefois arriver à quitter complètement le sol.

Nous réserverons une place à part à Paul Cornu, qui, à bord d'un hélicoptère à deux hélices de sa construction, put quitter le sol en 1907, mais la machine chavira et fut gravement endommagée, si bien que les essais furent abandonnés.

Nous citerons aussi les réalisations de Bréguet-Richet qui permirent un décollage, avec des appareils toujours maintenus par des cordes, en raison de la terrible instabilité des hélicoptères, sur laquelle nous reviendrons.

Il y a également un nom important à citer, celui de Pateras Pescara, qui réalisa plusieurs essais entre 1921 et 1925 avec un hélicoptère comportant plusieurs hélices à arbres coaxiaux. Ce qui est important, dans son cas, c'est l'utilisation, sans doute pour la première fois, de la variation de l'incidence des pales des hélices pendant leur rotation, ancêtre du « pas cyclique » qui est la clef du pilotage des hélicoptères contemporains.

COMMENT L'IDEE
DU VOL VERTICAL VINT
A ETIENNE OEHMICHEN

Il est assez émouvant de retrouver la suite des idées qui portèrent Etienne Oehmichen à la réalisation de ses hélicoptères.

Né en 1884 à Châlons-sur-Marne, il avait passé son enfance jusqu'à l'âge de huit ans dans sa ville natale qu'il aimait beaucoup et qu'il dut quitter à la mort de son père, pour aller, avec sa mère, rejoindre de lointains cousins à Lyon.

Complètement perdu dans cette ville nouvelle où les cousins en question le regardaient, pour la plupart, du haut de leur compte en banque, le jeune Etienne cherchait surtout à fuir le présent, aussi bien dans le temps que dans l'espace, et c'est de là que lui vinrent ses deux passions, qu'il garda toute sa vie, pour ce qui lui faisait quitter le lieu, à savoir l'astronomie et pour ce qui lui faisait fuir le temps présent : la paléontologie.

Il y avait, dans les collines de Lyon, des fossiles, des bélemnites, pour être plus précis, qu'il découvrit avec enthousiasme, car c'étaient les mêmes fossiles que l'on aurait pu trouver dans la région de son cher Châlons.

C'est vers la fin du siècle dernier qu'eut lieu, à Lyon, une foire tout à fait grandiose, où l'une des attractions était une ascension en ballon captif. L'enfant était passionné à l'idée de cette ascension, et un de ses oncles, bien plus généreux que les autres, lui offrit une ascension, ce qui était très cher car il en coûtait un louis d'or à l'époque.

Dès que l'enfant fut monté à quelques centaines de mètres, il découvrit la ville qu'il redoutait tant sous un aspect tout à fait nouveau : la grisaille du sol disparaissait et un soleil dorait les collines de Fourvières, transformant entièrement l'aspect du tout.

Une fois redescendu, il déclara : « Quand je serai grand, je ferai une

machine pour monter comme cela en l'air ! »

Il est merveilleux de voir comment un rêve de gosse peut se transformer en une passion et aboutir à des réalisations aussi prestigieuses que celles qui devaient par la suite, jalonner la carrière d'Etienne Oehmichen.

Il est d'ailleurs drôle, pour la petite histoire, de noter le fait suivant.

Quelques jours après cette mémorable ascension, mon père eut à faire un devoir de Français où on lui demandait ce qu'il avait remarqué à la Foire, et comme on s'en doute bien, il remit une copie où le ballon occupait la première place. Le devoir revint avec une note minable et l'appréciation suivante : « Totalelement dépourvu du moindre sens d'observation et d'esprit pratique »... il y a de temps en temps des gens qui ont des remarques malheureuses !

Comment ce rêve devait-il se concrétiser ? Cela fut assez long. Il travailla à la Société Alsacienne, au service électrique, puis chez Peugeot, où il crée le premier démarreur électrique et la première dynamo d'éclairage automobile, à une époque où toutes les automobiles en service s'éclairaient à l'acétylène.

On le voit, dès l'âge de 18 ans, se passionner pour les problèmes du vol ; il commence à étudier les oiseaux, persuadé qu'il y a là une clef qui permet de résoudre les nombreux problèmes relatifs au vol. Il réalise un petit modèle d'hélicoptère propulsé par caoutchouc, il essaie même de descendre en « parachute » (avec un grand parasol) d'une fenêtre. Heureusement, la fenêtre était peu haute, il s'en tire avec une simple foulure !

Son esprit curieux s'exerçait dans l'observation des oiseaux et des insectes, car il était persuadé qu'en étudiant le vol de ces animaux, il serait possible d'en tirer des enseignements pour la réalisation du vol mécanique.

Arrive l'année 1914. Il est mobilisé et sa conduite pendant la guerre lui vau-

dra la légion d'honneur et la croix de guerre. En 1918, il est affecté comme adjoint technique du général Estienne et participe à la mise au point des premiers chars d'assaut. A cette occasion, pour observer la rotation des moteurs de chars, il imagine d'éclairer ceux-ci par une étincelle se produisant une fois par tour d'axe, ou avec un léger décalage de fréquence par rapport à cette rotation : le stroboscope électrique est né.

Après la guerre, il travaille encore chez Peugeot, puis rachète à cette société deux moteurs de 25 CV, ayant équipé une « Demoiselle » de Santos-Dumont et il s'installe à Valentigney où il crée sa petite équipe, qui commence modestement la construction des hélicoptères.

LES PROBLEMES DE L'HELICOPTERE

Il se préoccupe avant tout du problème majeur de l'hélicoptère ; la stabilité. En effet, il s'agit là d'une machine dont la stabilité est tout à fait précaire. On ne le dirait pas, maintenant, quand on voit passer dans le ciel des « Alouettes » ou autres modèles, qui paraissent si parfaitement stables, à tel point qu'on en vient à penser (bien à tort !) que leur pilotage doit être très facile.

Mais, ce que l'on ne voit pas quand ces machines volent au-dessus de nos têtes, c'est la prodigieuse somme de recherches qu'il a fallu dépenser pour amener cet appareil essentiellement rétif à cette docilité (au moins apparente).

Pourquoi un hélicoptère est-il donc instable par nature ? Tout simplement parce que, dès que l'appareil se penche, même légèrement, dans une direction, la composante horizontale de la force portante de son hélice (ou de ses hélices) le fait aller dans cette direction. La vitesse de translation peut être assez élevée, ce qui fait que la pale de l'hélice qui va dans le sens de la translation a une vitesse augmentée par rapport à l'air, tandis que celle qui se déplace dans le

sens opposé a une vitesse réduite par rapport à l'air. L'efficacité de la pale « allante » est donc supérieure à celle de la pale « revenante », ce qui donne un effet de couple. Ce couple fait incliner l'appareil dans une direction perpendiculaire à son mouvement initial, ce qui, s'ajoutant à l'effet de précession gyroscopique de l'hélice, va augmenter l'effet de déséquilibre.

Une première conséquence de cette réaction est que l'on doit compenser l'effet du déplacement par une action qui s'exercera à angle droit avec le déplacement. C'est ce que l'on appelle le « pilotage à angle droit », une des premières découvertes de mon père.

Pour assurer la stabilité, mon père fit appel pour commencer à un ballon rempli d'hydrogène. La force ascensionnelle créait un couple tendant à ramener le ballon bien au-dessus du reste de l'appareil. Ce fut donc l'hélicoptère n° 1.

Mais la présence d'un gaz inflammable est une sujétion gênante. Etienne Oehmichen travailla donc à l'éliminer, et il y arriva en découvrant et en appliquant le principe de la « stabilisation par l'air ».

Voici les faits sous leur aspect paradoxal :

Si l'on fixe par rapport à un engin mobile dans l'air un ballon simplement rempli d'air, situé à la partie supérieure de l'ensemble, le tout va devenir parfaitement stable dans ses évolutions.

Une telle affirmation choque énormément, mais on peut la transformer facilement en une démonstration pratique de l'efficacité de cette stabilisation.

Elle choque parce que l'on objecte immédiatement que le ballon, apportant en effet une poussée de l'air sur la partie supérieure de l'appareil, apporte aussi son propre poids, égal à la poussée, même légèrement supérieur à cette dernière, si l'on tient compte du poids de l'enveloppe et du fait que l'air que celle-ci contient est à une pression légèrement supérieure à celle du milieu ambiant.

Donc, on a tendance à dire, utilisant un « principe » bien connu : « On ne va pas jouer sur la stabilité de la machine par ce ballon, car ne change pas l'état de repos ou de mouvement d'un corps en lui appliquant au même point deux forces égales et directement opposées. »

Oh, comme ce principe est dangereux et destructeur ! Il en va là comme pour beaucoup de règles trop strictes qui ont souvent freiné les inventeurs. Ce principe n'est exact que si l'on prend soin d'ajouter qu'il s'agit de deux forces de même nature.

Donnons un exemple qui montre comment il faut se méfier de ce principe.

Supposons (fig. 1) que nous disposons d'un petit chariot sur roues, d'une masse de 1 kg, tiré d'un côté par une corde

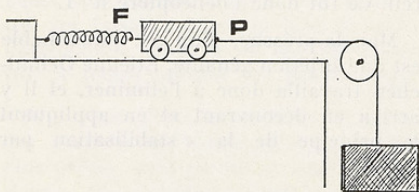


FIG. 1. — Un chariot de 1 kg est tiré entre un poids P (produit par une masse de 100 kg) et une force F . Suivant que l'on coupe le fil à droite ou à gauche du chariot, l'accélération est très différente.

attachée à un poids dont la masse est 100 kg, et de l'autre par un ressort très long qui équilibre par sa force de traction F le poids P de la masse de 100 kg.

Le chariot est en équilibre sous l'action de ces deux forces égales et directement opposées.

Maintenant, coupons la corde du côté du ressort : le tout va se mettre en marche du côté où l'entraîne le poids. Comme ce dernier correspond à celui d'une masse de 100 kg et qu'il doit accélérer cette masse elle-même, plus une masse de 1 kg (le chariot), soit en tout 101 kg, l'accélération, dans ce mouve-

ment, sera les 100/101^e de g (accélération de la pesanteur), soit environ 0,99 g .

Si nous coupons la corde du côté du poids, le chariot sera tiré par une force représentant le poids de 100 kg. Cette force ne devra accélérer qu'une masse de 1 kg. Donc, dans ce cas, l'accélération sera de 100 g .

Autrement dit, suivant le côté où l'on coupe la corde, le chariot part d'un côté avec une accélération pratiquement égale à g , ou de l'autre avec une accélération cent fois plus élevée. Cela tient au fait que le poids ou la force du ressort ne sont pas de même nature.

LA DEMONSTRATION SUR MODELES DE LA STABILISATION PAR L'AIR

Etienne Oehmichen fit une série d'expériences montrant jusqu'à l'évidence l'efficacité de cette stabilisation par l'air. Il utilisait pour cela un ensemble volant tel que le représente la figure 2 : deux tubes en aluminium, contenant chacun un moteur à caoutchouc torsadé et actionnant une hélice. Les deux tubes étaient maintenus parallèles par des pièces formant avec les tubes un rectangle, et les deux hélices

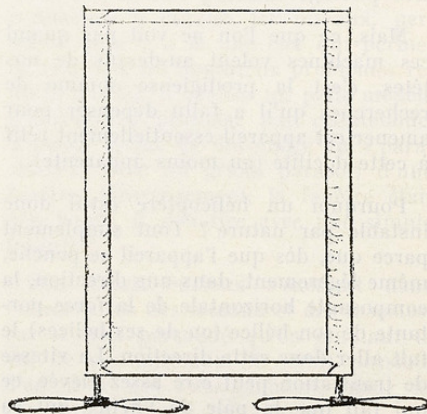


FIG. 2. — Cadre muni de deux tubes avec des moteurs à élastiques tordus pour des expériences de stabilisation par l'air.

étaient à pas opposés, pour annuler les effets de réaction lors de la rotation des hélices.

Pour lancer le tout, il fallait une table spéciale que représente la figure 3. Elle était inclinable, permettait de tenir l'ensemble volant par quatre bras, en même temps que deux bras pouvaient immobiliser les hélices, une fois les moteurs à caoutchouc remontés.

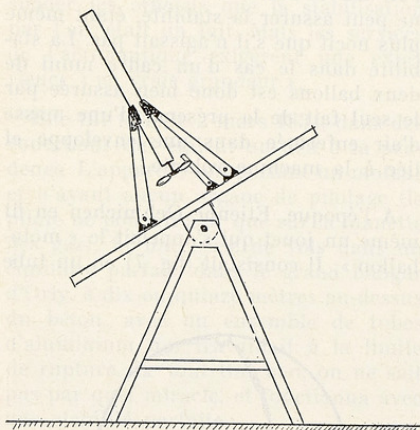


FIG. 3. — Table permettant de lancer sans impulsion initiale le cadre de la figure 2.

Il était alors possible de lâcher les hélices, puis, une fraction de seconde après, de libérer l'appareil volant, par brusque rabattement en arrière des quatre bras maintenant les tubes. Le tout était fait sans communiquer la moindre impulsion initiale à l'ensemble.

Si on fait l'expérience avec un ensemble tel que celui de la figure 2, l'appareil s'élève un peu, puis capote presque instantanément et tombe. C'est assez normal, d'ailleurs, la propulsion étant faite par en dessous, la stabilité est la même que celle d'un crayon qui repose-rait sur sa pointe.

Il suffit de munir l'ensemble de deux petits ballons gonflés d'air, tels qu'on les voit sur la figure 4, les ballons étant liés aussi rigidement que possible au

cadre, pour que le tout, même lancé en biais, se redresse et monte verticalement comme un ascenseur, avec une stabilité parfaite.

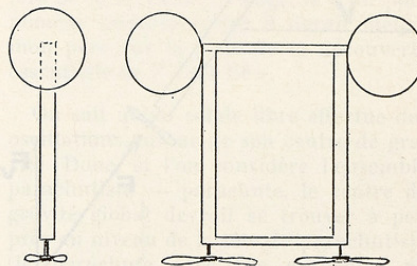


FIG. 4. — Le cadre de la figure 2 est maintenant muni de deux ballons et le tout est parfaitement stable.

Il est à noter, et cela va être très utile pour la suite, que l'on peut remplacer les ballons par des simples « cloches » en armatures de rotin tendues de papier de soie, largement ouvertes vers le bas : la stabilité est encore bonne et le tout se tient bien. Il est même possible de lacérer en plusieurs points le papier : on n'arrive à compromettre la stabilité que si l'on a enlevé une part vraiment importante de la surface latérale.

Généralement, ceux qui voient cette expérience assez paradoxale pensent que la stabilisation est due à la réaction de l'air sur le maître couple des ballons ou des cloches. Ils font le raisonnement suivant :

« Quand le cadre s'incline, la force F des hélices peut se décomposer en une « composante verticale F_v et une horizontale F_H . Cette dernière met le tout « en route avec une vitesse V (fig. 5). La « réaction des forces de pression P de « l'air sur le maître couple des ballons « se traduit par une force R qui, avec « F_H , constitue un couple qui redresse « l'appareil. »

Ce raisonnement n'est pas faux. Le couple en question existe, et son action devrait permettre de redresser l'appareil,

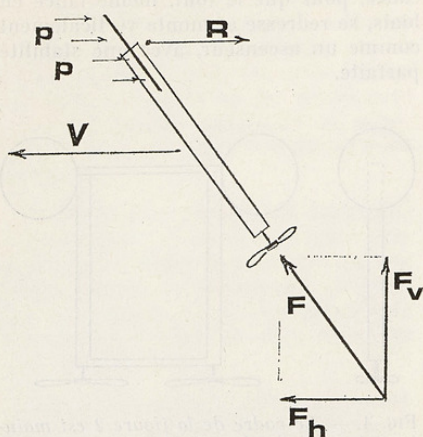


FIG. 5. — Explication inexacte de la stabilité : la force portante F ayant une composante horizontale F_h entraîne le tout à la vitesse V , d'où une force R due à la pression P de l'air.

mais il agit trop tard et trop violemment, parce que la force de résistance de l'air varie comme le carré de la vitesse.

Aussi, si l'on remplace les ballons (fig. 6) par deux rondelles présentant le même maître couple (en ce qui concerne la résistance à l'air) et qu'on lance l'appareil ainsi équipé en position biaise, on le voit en effet partir de côté et

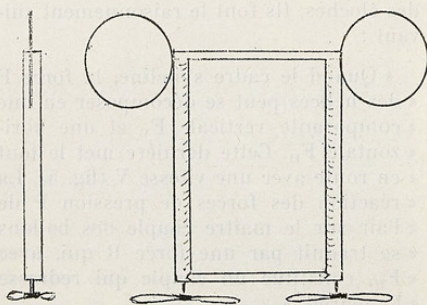


FIG. 6. — Cadre de la figure 2 muni seulement de deux ronds plats, montrant que l'explication de la figure 5 ne suffit pas à assurer la stabilité.

amorcer un mouvement de redressement. Mais l'action de redressement est beaucoup trop forte, et, après une autre oscillation, ou tout de suite, l'ensemble capote et tombe. Les oscillations d'un tel ensemble volant sont, comme on dit, résonnantes, alors que celles d'un ensemble muni de ballons sont amorties.

Ce dernier essai montre bien que l'effet de stabilisation par résistance de l'air sur le ballon lors de la translation ne peut assurer la stabilité, étant même plus nocif que s'il n'agissait pas. La stabilité dans le cas d'un cadre muni de deux ballons est donc bien assurée par le seul fait de la présence d'une masse d'air enfermée dans une enveloppe et liée à la machine volante.

A l'époque, Etienne Oehmichen en fit même un jouet qui s'appelait le « moto-ballon ». Il consistait (fig. 7) en un tube

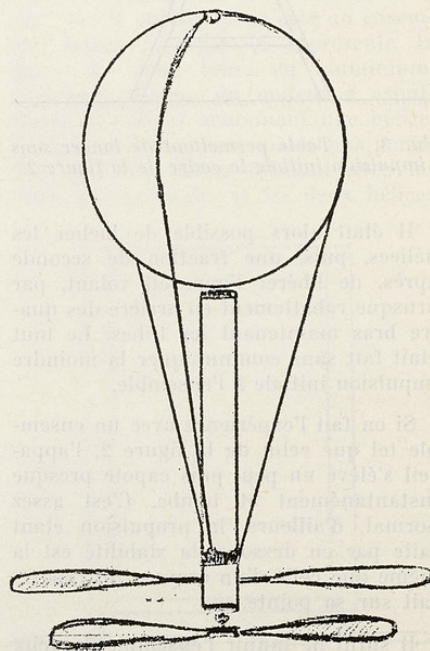


FIG. 7. — Jouet, nommé « moto-ballon », montrant la stabilité d'un système comportant un ballon gonflé d'air.

contenant un moteur en caoutchouc tordu avec une hélice. La contre-rotation du tube était utilisée grâce à une autre hélice à pas opposé et un ballon gonflé d'air était fixé au-dessus du tube par trois suspentes se rejoignant au sommet du ballon en un petit anneau. Le tout, quand on le lâchait, après avoir remonté le moteur à élastique, montait à la verticale avec une stabilité parfaite.

Tout cela aurait dû suffire pour persuader les officiels que la stabilisation par l'air était un fait. Mais les services de l'aéronautique exigèrent une expérience « en vraie grandeur ».

Elle fut faite le 2 mars 1934, dans des conditions qui étaient un défi à la prudence. L'appareil, comportant un moteur et n'ayant aucun organe de pilotage (le pilote ne pouvait agir que sur la manette des gaz), fit une série de vols dans un équilibre parfait, dans le grand hangar d'Orly, à dix ou quinze mètres au-dessus du béton, avec un ensemble de tubes d'aluminium qui travaillait à la limite de rupture. Le tout tint bon, on ne sait pas par quel miracle, et fonctionna avec une stabilité parfaite.

L'AIR LIÉ

Donc, la preuve expérimentale de la stabilisation par l'air est faite, on peut recommencer l'expérience quand on veut. La raison profonde de cette stabilisation est loin d'être évidente. On peut dire que la présence du ballon modifie fort peu la position du centre de gravité de l'ensemble, le remontant de moins d'un mètre (la masse du ballon est faible par rapport à celle de la partie métallique de l'appareil), alors qu'elle modifie beaucoup la position du centre de poussée (le volume du ballon est énorme par rapport à celui de la partie métallique).

Comme on l'a vu dans l'expérience citée en remplaçant les ballons sur le cadre par des cloches, il n'est pas nécessaire que l'air prévu pour la stabilisation soit étroitement enfermé pour jouer son rôle.

Or, dès qu'il y a mouvement, l'air a tendance à « coller » aux surfaces mobiles, surtout si ces dernières présentent des concavités. On en voit un exemple dans les oscillations d'un parachutiste lors de la descente. Il s'agit là d'un phénomène important, car il devait mettre mon père sur la piste de la découverte essentielle de l'« air lié ».

On sait qu'un solide libre effectue des oscillations autour de son centre de gravité. Donc, si l'on considère l'ensemble parachutiste — parachute, le centre de gravité global devrait se trouver à peu près au niveau de la tête du parachutiste (le parachute avec ses suspentes ne représente qu'une masse très faible). Or, l'expérience montre qu'un parachutiste, pendant la descente, ne se balance pas autour d'un point situé au niveau de sa tête (ce qui serait bien meilleur pour lui), mais, malheureusement, autour d'un point situé beaucoup plus haut, juste en dessous de la corolle du parachute, ce qui correspond à des oscillations d'une amplitude bien plus grande et nettement plus désagréables pour l'homme.

Il faut donc admettre que le centre de gravité de l'ensemble parachutiste-parachute est très haut, donc qu'il y a, au niveau de la corolle du parachute, une masse importante que l'on doit considérer comme faisant partie de l'ensemble.

On est donc amené à tenir compte de toute la masse de l'air enfermé dans cette corolle, imparfaitement certes, mais cependant liée à elle. A raison de $1,3 \text{ kg/m}^3$, on arrive vite à une masse qui explique très bien le relèvement du centre de gravité de l'ensemble.

C'est là le secret de la stabilisation du vol des insectes et des oiseaux : le mouvement des ailes entraîne un « ballon fictif » d'air, lié aux ailes et assurant la stabilisation. Dans le cas des coléoptères, comme les hannetons, on voit le rôle joué par les élytres. Leur mouvement n'est pas du tout « ramé », comme l'est celui des ailes, il consiste en une légère oscillation, essentiellement desti-

née à lier aux élytres, déjà concaves, un volume d'air de stabilisation.

Dans le cas de la cétoine, qui vole avec les élytres presque contre le corps, on peut voir que les élytres ne sont pas totalement collées au corps, mais s'en éloignent de quelques millimètres, laissant ainsi un volume d'air enfermé dans la cavité formée. Là aussi, la stabilisation par l'air convient.

On retrouve ici tout le rôle joué par les études de vol des insectes dans les travaux d'Etienne Oehmichen. Grâce au stroboscope électrique qu'il avait inventé, il put filmer au ralenti des mouvements d'ailes d'insectes et en tirer des conséquences. Il y avait aussi, près de l'aile de l'insecte, un petit témoin fait d'une barbe de plume, montrant l'appel d'air dans un certain rayon autour de l'aile, délimitant la zone d'air lié.

CE QUE DOIT ETRE UN PROFESSEUR ET UN CHERCHEUR

C'est à la suite de toutes ses études sur le vol d'abord, sur la marche et la nage ensuite, que mon père pensa, lors de l'abandon du programme d'études de l'hélicoptère par le gouvernement en 1937 (on pensait alors que l'hélicoptère « était une machine sans intérêt pratique et sans avenir... » !), qu'il y avait une possibilité pour lui d'enseigner ce qu'il avait appris en étudiant les insectes et les oiseaux, un peu comme on étudierait une machine, pour voir « comment cela marche ».

C'est ainsi qu'il présenta sa candidature au Collège de France, dans la chaire de Marey et de Magnan, et qu'il y fut élu au premier tour.

Il avait une très haute idée de l'enseignement, et je pense que le mieux que je puisse faire pour vous le faire sentir est de vous faire entendre une bande magnétique enregistrée lors de son dernier cours au Collège de France, en juin 1955.

« En règle générale, lorsque l'on veut enseigner, il est normal que cet enseignement se fasse dans une impartialité objective totale, que le professeur, autant que faire se peut, se tienne aussi éloigné que possible de toute conclusion, où il engagerait ses vues personnelles. Ceci est absolument normal quand il s'agit de l'enseignement donné à des jeunes, à des élèves que l'on forme et dont toute la vie dépendra de l'enseignement reçu. On marque une empreinte, extrêmement vive, sur ces jeunes esprits, et il est interdit d'intervenir, dans un sens, comme dans l'autre. Cette loi, généralement, n'est pas respectée, mais elle devrait l'être : il faut qu'elle le soit.

« Il n'en va pas tout à fait de même s'il s'agit des cours que nous donnons ici, dans la maison de Renan, dans la maison d'Ampère, dans la maison de Berthelot et de tant d'autres. Ici, nous ne nous adressons pas à des élèves, mais à des auditeurs. En tant qu'homme de science — si homme de science il y a — nous avons, bien entendu, gardé le droit de penser. En tant qu'homme libre, nous avons le droit d'exprimer notre opinion, quitte à vous la voir partager, ou à vous la voir, au contraire, combattre, comme c'est votre droit le plus strict.

« Donc, lorsque, au cours d'un longue carrière entièrement consacrée à la Science, il nous vient des idées (dont nous gardons l'entière et pleine responsabilité, sans prétendre la vouloir faire peser sur qui ce soit d'autre que nous), ces idées-là, j'estime que nous avons, non seulement le droit, mais le devoir de vous les donner. Oui, de vous les donner parce que c'est quelque chose, en réalité, que l'on vous offre : ce que l'on offre ne plaît pas toujours, par conséquent, vous êtes parfaitement fondés à ne les point accepter ; ce que l'on offre, on doit le faire en toute bonne volonté, car là est le secret de toute chose. »

Ces idées, dont parlait Etienne Oehmichen, il en a reçu une grande part

dans le grand livre de la nature. Il voulait, avant tout, se mettre à l'école des réalisations naturelles, et le titre de son premier livre le montre : il se nomme « Nos maîtres, les oiseaux ».

Nous verrons plus loin comment l'étude des mécanismes naturels le conduisit à une philosophie très haute. Pour le moment, il s'agit surtout des enseignements pratiques qu'il tira pour la technique humaine de l'examen des « machines animales ».

Il fut frappé, entre autres, par l'extraordinaire solidité du bassin des oiseaux, une construction en « treillis » comme disent les mécaniciens. Un simple bassin de poule, placé sur deux cales, peut supporter en son centre le poids d'un homme sans se briser. Pourquoi ? Parce que c'est là le « train d'atterrissage » de l'oiseau, et que ce train doit supporter des chocs d'une violence incroyable lors de l'arrivée au sol à grande vitesse.

Toujours en étudiant les squelettes des oiseaux, mon père fut frappé par le fait que le bassin du canard n'avait aucune solidité : on le casse facilement entre deux doigts. Comment peut-on concilier cela avec la notion de train d'atterrissage ? Tout simplement parce que le canard n'est pas un « avion » mais un « hydravion ». Si vous lancez en l'air un canard domestique, il vole assez bien (sur une distance relativement courte, il est vrai), mais on le voit capoter à l'atterrissage de la façon la plus ridicule : il ne se pose pas sur les pattes, mais sur le ventre, et il fait plusieurs tours sur lui-même avant de retrouver une position normale, ce qui n'est pas le cas pour une poule volant encore plus mal que le canard, mais atterrissant parfaitement.

En revanche, lancez le canard en direction d'un plan d'eau : vous le verrez arriver la poitrine en avant, toucher l'eau parfaitement et se mettre à nager après un amerrissage exemplaire. D'ailleurs, si vous découpez un canard, on ne trouve pas, en enlevant les filets, la zone de muscle épais (les « blancs » des au-

tres oiseaux non aquatiques, mais des moteurs d'aviation (disons plutôt des muscles) plats, dans lequel on coupe des « aiguillettes ». Le flotteur de notre « hydravion » est dur, compact, pour résister au choc de l'arrivée sur l'eau. Les pattes ne servent qu'à la propulsion et un peu à la marche, elles n'ont pas à supporter de chocs.

L'HUMILITE SCIENTIFIQUE

Toutes ces études des moyens utilisés par la Nature pour réaliser le vol, la marche, la nage, ont amené rapidement Etienne Oehmichen à faire preuve de la plus grande humilité devant les découvertes, devant la puissance de la Science, et il le disait lui-même, dans une autre partie de cette leçon terminale au Collège de France. Laissons-lui de nouveau la parole :

« A l'heure actuelle, prenez garde également à quelque chose.

« Il est bien joli, ce petit microphone qui enregistre sur des bandes magnétiques les choses que je vous dis, il représente un travail de techniciens à l'échelle mondiale, de la part de gens qui ont consacré des efforts énormes à la mise au point d'engins stupéfiants.

« Oh ! Ce n'est pas si récent que cela, c'est la vieille ficelle de Poulsen, quand j'étais un enfant, c'était déjà connu. On a simplement rendu cela possible en superposant de la haute fréquence au courant magnétisant, tandis que dans l'enregistreur de Poulsen on enregistrait directement sur fil de fer. Mais il fallait y penser : c'est l'œuf de Christophe Colomb.

« Mais regardez autour de vous le vertige du perfectionnement technique moderne, regardez à quel point il est presque même difficile pour un homme de métier de se tenir simplement au courant de ces progrès stupéfiants qui se succèdent les uns aux autres...

« Au fur et à mesure que nous avons vu se développer ces choses, d'autres

« ont surgi. A tout instant c'est un pro-
« grès nouveau, à tout instant, tout est
« renversé, culbuté, par une notion nou-
« velle, par une acquisition nouvelle, on
« dirait que le monde est frénétiquement
« pris du désir d'acquiescer, de saisir de
« plus en plus. Et il acquiesce, et il saisit,
« en effet ; car c'est exact, les acqui-
« sitions se précipitent, elles sont légions,
« elles sont effarantes, elles donnent le
« vertige...

« Alors, je constate très souvent chez
« les jeunes une sorte de vertige, de ver-
« tige dangereux, qui les amène, en cer-
« tains cas, à se croire un peu des
« dieux : tentation redoutable !

« Oui, la technique marche, elle mar-
« che à pas de géants, à pas foudroyants,
« à pas effrayants, mais, cette marche,
« prenez-y bien garde : qu'elle ne vous
« trompe pas. Restez simples !

« Des enfants peuvent trouver une
« grenade et s'en servir !

« Je vous ai déjà dit bien des fois, et
« je vous le répète encore : supposez un
« court instant qu'ici même soit assis
« Ampère et qu'on lui dise : " Dans un
« espace de un mètre cube, ou moins
« encore, je puis vous placer un instru-
« ment qui vous montrera des images
« de ce qui se passe à cent, à mille kilo-
« mètres d'ici, il vous fera entendre
« vingt-cinq langues... ", mais qu'aurait
« répondu Ampère, s'il vous plaît ?

« Il a fallu attendre le génie de
« Maxwell pour qu'il voie la petite cor-
« rection à apporter au théorème d'Am-
« père permettant de pressentir l'exis-
« tence des ondes électromagnétiques.
« C'est Maxwell qui l'a vu, c'est Hertz
« qui l'a appliqué et... voyez ce que l'on
« en a fait !

« Face à cet inconnu, à toutes ces cho-
« ses que nous avons devant nous et au
« milieu desquelles passent des actions
« que tout autre, à l'époque de ceux
« dont je vous parle, eût niées, en s'ap-
« puyant sur une argumentation valable
« et solide, comment voulez-vous que

« l'on puisse prendre la moindre con-
« fiance dans ce que nous émettons à
« l'heure actuelle ? »

LA MACHINE ANIMALE NOUS PARLE DU FOND DES SIECLES

Mon père s'était intéressé depuis sa
plus petite enfance à la paléontologie. Il
avait commencé à huit ans, et il devait,
bien des années après, faire une série de
découvertes de très grand intérêt.

Fouillant dans un gisement riche en
fossiles secondaires, il trouva des restes
d'ichtyosaure, dont un crâne de taille
gigantesque (il avait en quelque sorte
l'« habitude » de trouver des fossiles
exceptionnels). Il y avait aussi, parmi
les différents ossements, des pattes d'ich-
tyosaure, de taille stupéfiante elles aussi,
qui étaient, par un heureux hasard, cas-
sée longitudinalement et transversale-
ment.

En les examinant, Etienne Oehmichen
vit que les os fort nombreux constituant
les pattes allaient en s'écartant de plus
en plus les uns des autres du haut de la
patte vers le bas, et aussi de l'intérieur
de la patte vers l'extérieur. En outre, la
disposition de ces os était telle que, vers
le haut de la patte, ils étaient bord à
bord dans une structure qui ne leur lais-
sait que peu de liberté mutuelle, alors
que, en allant vers le bord, les positions
respectives des os laissent une possibi-
lité croissante de flexion entre eux.

Evidemment, la fossilisation ne laisse
subsister que les os, faisant disparaître
toute trace de cartilage, mais on peut
logiquement penser que ces derniers fai-
saient le lien entre les osselets. On a
donc affaire à une patte dans laquelle la
souplesse va en croissant du haut vers le
bas et de l'intérieur vers l'extérieur. La
variation de souplesse, comme celle que
l'on trouve de la tête vers la queue dans
un poisson, est destinée à augmenter
l'amplitude du mouvement de la patte
quand on va vers la région la plus sou-
ple. Donc, il a une augmentation de pro-

pulsion en allant du haut vers le bas, du centre vers le bord.

On retrouve donc, dans la patte de l'ichtyosaure, une « hélice inclinée », dans laquelle on peut trouver une composante propulsive et une composante de sustentation (l'ichtyosaure était un animal chassant en surface). De telle sorte que, dans ce fossile changé en pierre depuis des millions de siècles, on trouve déjà tous les enseignements de la technique de la Nature.

La technique de la nage, que ce soit pour l'ichtyosaure ou pour nos modernes poissons, est assez apparentée à celle du vol. Il s'agit seulement d'un milieu qui résiste beaucoup plus, dont la viscosité est nettement plus grande. La densité du milieu est aussi bien plus élevée que celle de l'air, près de huit cent fois plus grande : on tire avantage pour la stabilisation et les poissons n'ont pas à résoudre ce problème, capital pour les oiseaux et les insectes volants.

Les animaux qui volent utilisent la stabilisation par le nuage d'air lié à leurs ailes, mais ils ne font pas que cela.

Il est paradoxal de voir qu'un muscle ordinaire, pour exercer une force qui ne déplace pas son point d'application, donc qui ne « travaille » pas, au sens mécanique du terme, se fatigue quand même. Ce fait nous amène à penser que des oiseaux volant au point fixe doivent se fatiguer beaucoup, alors que l'expérience nous montre que cela ne doit pas être le cas.

Là encore, ce fut de son expérience des autres techniques que mon père tira l'explication.

Quand un oiseau bat des ailes, il entraîne des masses d'air, constituant cette fameuse « onde liée ». Ces masses, mises en mouvement, viennent frapper l'aile en fin de course, restituant à celle-ci une bonne partie de l'énergie qui avait été nécessaire pour les mettre en mouvement.

Il s'agit, en effet, de produire, une force pour sustenter l'oiseau au point

fixe, mais non un *travail*. La force suppose un mouvement important de l'air. Comment un tel mouvement peut-il se faire sans dépense énorme d'énergie ?

Il y a un équivalent bien connu dans le domaine de l'électricité. On sait en effet, faire passer un courant alternatif de très forte intensité dans un conducteur avec une dépense d'énergie minime, si ce courant ne passe pas par un maximum en même temps que la tension. On dit alors que le courant est « déwatté », un peu à la façon de l'oscillation de l'eau dans une cuvette, quand on provoque cette oscillation à une fréquence voisine de la résonance propre de l'eau.

L'oiseau produit donc un grand « courant alternatif déwatté » d'air autour de lui, assurant sa sustentation dans des conditions parfaites en ce qui concerne la consommation d'énergie.

Que ce serait tentant d'appliquer cela à nos hélicoptères ! Malheureusement, les systèmes à ailes battantes se sont toujours heurtés à des difficultés technologiques presque insurmontables. Là, l'oiseau nous bat, de très loin même !

UNE PHILOSOPHIE NEE DE L' « ECOLE DE L'OISEAU »

Je crois que, pour donner une idée exacte de la philosophie très spiritualiste qui orienta les travaux de mon père, surtout vers la fin de sa vie, le mieux est de vous indiquer son idée telle qu'elle se dégage d'une série de dessins hâtivement griffonnés sur un papier, jetée par mon père, mais que j'ai eu la chance de récupérer.

On y trouve le chercheur, celui qui veut apprendre tout d'abord tout ce qu'il peut dans les livres, qui veut réaliser une machine volante, et voit cette dernière capoter lamentablement et se briser au sol.

Mais alors, comment font les oiseaux ? Comment ont-ils cette merveilleuse stabilité qui leur permet des acrobaties aériennes dont le meilleur pilote serait

jaloux ? Il faut, par conséquent, les étudier. Il faut aussi étudier les insectes, les regarder à la loupe, au microscope, toujours plus près, en ralentissant leur mouvement au stroboscope, pour essayer de savoir comment ils procèdent.

L'inspiration jaillit ! L'insecte volant est analogue à l'antenne émettrice d'un transmetteur de radio : il y a un courant oscillant important dans cette antenne, mais sans que cela corresponde à une puissance démesurée. En outre, l'insecte et l'oiseau sont enveloppés dans une sorte de nuage d'air lié.

Réalisons donc un appareil qui comporte un ballon lié à lui : tout va bien, la stabilité est assurée.

Les dessins montrent ensuite le chercheur qui s'endort et il a l'impression qu'une forme mal définie l'entraîne loin de l'endroit où il sommeille. Cette forme est impressionnante ; elle semble couronnée par un mot en lettres grecques : mathemata (les mathématiques). Une telle devise n'était-elle pas celle des dieux dans l'Olympe, plus spécialement de Jupiter ?

Et voici que l'apparition entraîne le dormeur loin, qu'elle l'emmène dans une école, où il s'assied sur un banc.

Le professeur est un oiseau. Il montre sa structure, il enseigne comment ses jambes sont un train d'atterrissage, comment les os de renvoi au bout de ses ailes sont des évolueurs, comment son « moteur » est implanté.

Toute la classe est habitée d'oiseaux divers, l'élève regarde de tous ses yeux ses professeurs qui lui révèlent la vérité sur le vol, sur ses secrets.

Mais qu'est ceci ? Voici l'oiseau professeur qui grandit et devient flou, ses contours sont vagues, sa stature gigantesque.

Dans ce brouillard émerge une tête, entrevue parmi les déchirures du voile de nuages. C'est la tête du Sphinx, du Secret.



DESSIN A. — Entre les nuages, on entrevoit la figure du Sphinx.

Les nuées cachent presque tout ; il n'y a, dans les trous, que des morceaux de la face du Sphinx qui apparaissent. On voit aussi le bout de ses pattes et on peut y distinguer des noms presque griffonnés : Lamarck, Darwin, Cuvier et quelques autres. Ceux-là aussi ont pu s'approcher un peu du Sphinx, autrefois.

La Face entrevue n'est pas franchement découverte, trop de nuages la voilent. D'ailleurs voici que les trous entre ces floches de brouillard deviennent de plus en plus rares, de plus en plus petits, que le tout semble se résorber dans un seul nuage, dont les dimensions vont en se rapetissant.

Le chercheur-dormeur-élève ne peut supporter la perte de cette vue, et il va s'écrouler au sol.

Que va-t-il arriver derrière lui ? On voit une silhouette d'enfant, qui se dirige vers le Sphinx. Ce dernier est entièrement démasqué : des révélations comme celles qu'il peut faire ne sont accessibles (et supportables) que par un enfant, elles ne sont pas pour les « hommes sages et intelligents ».

Voilà donc, en une série de dessins, la pensée scientifique de mon père, bien plus nettement exprimée que par des mots.

QUI FUT TOUT, ET QUI NE FUT RIEN

Donc, instruit par les merveilleuses écoles de la Nature, Etienne Oehmichen travailla toute sa vie dans des directions très diverses. Pour beaucoup de gens,

son œuvre essentielle est l'hélicoptère, et il est juste de dire que cette machine était chère à son cœur.

Il en fit sept, la première comportant un ballonnet d'hydrogène, et ce n° 1 permit le premier envol entièrement libre d'un hélicoptère à partir du sol, mais certains contestent ce titre en raison de la présence du ballonnet.

Le n° 2 était celui dont nous avons parlé, sans aucun ballon, qui fit le pre-

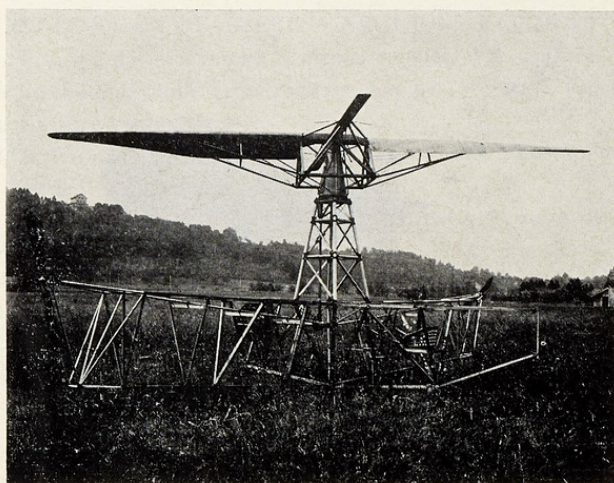


PHOTO C. — Appareil n° 3 au sol.

mier kilomètre en circuit fermé au monde, en 1924, et le premier vol de cinq minutes au point fixe dans le monde.

Le troisième fut un modèle plus complexe, sans ballon non plus, destiné à expérimenter des solutions diverses.

Le quatrième était l'« hélicostat », muni d'un grand ballon d'hydrogène, qui en supprimait la quasi-totalité du poids, extrêmement maniable.

Les trois derniers, dont le modèle de 1934 pour la démonstration dans le hangar d'Orly de la stabilisation par l'air,

furent des modèles destinés à des essais de solutions diverses, à des expériences, qui furent interrompues vers 1937 quand on décida en haut lieu que l'hélicoptère n'avait pas d'avenir, ce qui amena mon père à se tourner vers l'enseignement et la recherche, en entrant au Collège de France.

Quand il fit ses visites de candidature, il disait souvent :

« En ce qui concerne les mécanismes de la Nature, je ne peux vous apporter l'œil du maître, je me contenterai d'amener l'œil du contremaître ! ».

Il avait, en effet, toujours gardé le souci de la réalisation personnelle, de la solution d'ingénieur, mais, comme il le disait lui-même, de l'« ingénieur aux mains sales », entendant par là que, après avoir fait le dessin de quelque chose, il fallait prendre le tour, la fraiseuse et la lime pour réaliser ce que l'on avait projeté.

Il pensait même postuler pour le diplôme de premier ouvrier de France, la

maquette était faite, mais... cela ne se donne pas à titre posthume.

Aimant à écrire dans un style précis et prenant, aussi bien des ouvrages scientifiques que des contes et des nouvelles, il se passionnait pour tout, et craignait même que la diversité des sujets qu'il avait traités ne déroutent un peu ses auditeurs.

Il en fit même la conclusion du dernier cours qu'il faisait au Collège de

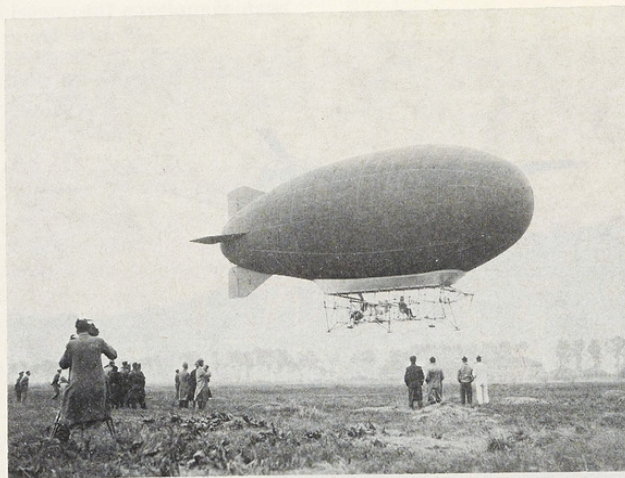


PHOTO D. — Appareil n° 4, nommé « hélicostat », muni d'un ballon d'hydrogène (photo Rol).

France, dont nous donnons ici la fin, toujours tirée de la même bande magnétique :

« Je vous demanderai, en dernière analyse, de ne pas vous effrayer de la variété des sujets traités, je voudrais que vous n'en fassiez pas un article de critique, voulez-vous ? »

« Quand j'étais un enfant, je pensais toujours avec une certaine émotion à cette épitaphe qu'avait composée pour lui-même Cyrano de Bergerac, au moment où, assassiné, ou peu s'en faut, il va mourir. C'est un peu théâtral, mais c'est bien beau :

Philosophe, physicien
Rimeur, bretteur, musicien
Et voyageur aérien
Grand riposteur du tac au tac
Amant aussi — pas pour son bien —
Ci-git Hercule Savinien
De Cyrano de Bergerac
Qui fut tout, et qui ne fut rien. »

Au cours de la discussion qui a suivi la Conférence, M. Morain, réalisateur du Djinn et M. Marchetti, réalisateur de l'Alouette, ont souligné que les brevets Oehmichen avaient permis d'échapper à des revendications étrangères de propriétés industrielles dans le domaine des hélicoptères.

Le programme Français des Réacteurs à Neutrons Rapides ()*

par Jean VILLENEUVE

Chef du Département des réacteurs à neutrons rapides au C.E.A.

- I. — INTRODUCTION :
 - I.1. Les besoins en énergie ;
 - I.2. L'énergie nucléaire de fission ;
 - I.3. Les réacteurs rapides dans le programme électronucléaire.
- II. — QU'EST-CE QU'UN REACTEUR A NEUTRONS RAPIDES ?
 - II.1. Principe des réacteurs à neutrons rapides et à neutrons thermiques ;
 - II.2. Le sodium, fluide de refroidissement des réacteurs rapides ;
 - II.3. La surrégénération ;
 - II.4. Pénétration des centrales à neutrons rapides dans le parc électronucléaire.
- III. — LA PROGRESSION DU PROGRAMME FRANÇAIS DES REACTEURS A NEUTRONS RAPIDES :
 - III.1. *Rapsodie* ;
 - III.2. *Phénix* ;
 - III.3. *Super-Phénix* ;
 - III.4. *Phénix 450*.
- IV. — LE PROGRAMME DE RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT :
 - IV.1. Physique et projet de cœur ;
 - IV.2. Combustible ;
 - IV.3. Technologie du sodium ;
 - IV.4. Composants ;
- V. — ENVIRONNEMENT ET SURETE :
 - V.1. Prévention des accidents ;
 - V.2. Risques d'accidents ;
 - V.3. Etudes de sûreté ;
- VI. — ORGANISATION INDUSTRIELLE ET COLLABORATION INTERNATIONALES.
- VII. — CONCLUSION.
- VIII. — REMERCIEMENTS.

* Conférence prononcée le 12 décembre 1974, devant la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

I. — INTRODUCTION

I.1. *Les besoins en énergie.*

Le problème des ressources énergétiques du monde se pose aujourd'hui surtout en termes de coûts d'approvisionnement et de répartition géographique de ces ressources.

Ce n'est pas cet aspect de la question qui fait l'objet de cet exposé : il se situera simplement dans son introduction sur le plan des réserves estimées comparées aux besoins prévisibles.

La loi du doublement de la demande d'énergie tous les dix ans continue à se vérifier dans les pays occidentaux, et on l'admet généralement comme valable jusqu'à la fin du siècle.

De toute manière, si la vitesse de la demande diminue, cela ne fera que décaler de quelques années un problème qui reste crucial.

En 1970, le monde a consommé $5 \cdot 10^9$ T.E.P. (tonnes d'équivalent pétrole). On peut prévoir que dans le contexte économique, social et politique actuel, la demande en l'an 2 000 sera de l'ordre de $20 \cdot 10^9$ T.E.P.

Les réserves actuellement inventoriées et exploitables dans les conditions économiques actuelles sont de $90 \cdot 10^9$ T.E.P. pour le pétrole et seule, une faible partie des $5 \cdot 000 \cdot 10^9$ T.E.P. de charbon sont exploitables dans ces conditions. Si l'on se base uniquement sur le pétrole, il faudra d'ici l'an 2 000 découvrir cinq fois, ce qui, à ce jour, a été extrait. Cela est peut-être possible, mais les coûts techniques iront croissants et des problèmes de relations entre pays producteurs et pays consommateurs vont devenir de plus en plus aigus, et de toute façon, le problème de la pénurie ne pourra être repoussé que de quelques années.

On s'accorde généralement pour dire

que la pénurie d'énergie sera résolue par l'avènement de la technologie des réacteurs à fusion : 1 ppm* de deutérium dans l'eau de mer correspond à $250 \cdot 000 \cdot 10^9$ T.E.P. ce qui correspond à des ressources d'énergie pour plusieurs siècles.

Un sérieux handicap apparaît cependant pour éviter la pénurie grâce au réacteur à fusion car il faudra encore au moins une trentaine d'années pour faire parvenir cette technique au stade industriel.

Il faut donc combler le « trou » pendant au minimum les 50 années à venir et il est certain que les combustibles fossiles ne pourront pas suffire.

On peut envisager d'autres sources d'énergie, telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie géothermique. Aucune de ces formes d'énergie n'est à l'échelle du problème posé ; seule, peut-être, l'énergie solaire peut économiquement être utilisée pour le chauffage domestique dans certains pays favorisés.

I.2. *L'énergie nucléaire de fission.*

Dans l'état actuel des connaissances technologiques, il est indiscutable que seule, l'énergie d'origine nucléaire de fission peut assurer pendant quelques décennies la demande d'énergie qui va croître à tel point, qu'un pays comme les U.S.A. vise $100 \cdot 000$ MWe** en l'an 2 000, soit à cette date, la mise en service d'un réacteur de $1 \cdot 000$ MWe tous les quatre jours.

L'utilisation de cette forme d'énergie présente en outre l'avantage d'être économiquement la meilleure. Une estimation récente des coûts donne 4,5 c/kWh pour une centrale utilisant un réacteur à eau légère et 8,1 c/kWh pour une centrale consommant du fuel à 2,5 c la thermie.

* L'eau contient naturellement 160 ppm de D_2O .

** Megawatt électrique.

Cependant, si on compare les besoins correspondant en uranium aux ressources actuellement recensées et en supposant un développement exclusif des types de réacteurs commercialisés à ce jour, c'est-à-dire essentiellement les réacteurs à eau, on se rend rapidement compte que des problèmes de pénurie, précédés de hausses insupportables de la matière de base, vont rapidement apparaître.

En illustration, on peut considérer la situation française. La demande cumulée en 1990 sera de 100 000 t d'uranium. Les réserves correspondantes de la France sont de 130 000 t dont 60 000 sur le territoire national si on se limite à extraire un minerai suffisamment riche dont le coût de production conduit aux 4,5 c/kWh précités.

On peut donc penser que les filières nucléaires actuellement commercialisées ne pourront pas toutes seules assurer la soudure avec l'énergie de fusion. En effet, ces filières utilisent l'uranium enrichi comme combustible, ce qui ne permet de « brûler » que un peu plus de 1 % des atomes lourds de l'uranium naturel, le reste devenant inutilisable dans ces réacteurs.

1.3. Nécessité des réacteurs à neutrons rapides.

Toujours dans l'état de développement de notre technologie, une seule possibilité est offerte : la surrégénération, c'est-à-dire, mettre au point des systèmes de centrales susceptibles de rentabiliser les rejets d'usine de séparations isotopiques en les transformant en combustible.

Le processus de ce phénomène sera développé dans le paragraphe suivant. Sachons simplement qu'il s'agit d'un procédé qui permet de multiplier par un facteur de 60 à 80 la quantité d'énergie susceptible d'être extraite de l'uranium naturel.

Les réacteurs à neutrons rapides cor-

respondent à cette description. Parmi ceux-ci, seuls les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium ont donné lieu à des réalisations électronucléaires industrielles.

Ils sont donc bien placés pour assurer la jonction entre les réacteurs à eau actuellement commercialisés et les futures installations énergétiques qui utiliseront la fusion des noyaux légers (deutérium) au cours du siècle prochain.

On notera cependant, et ceci sera développé au chapitre suivant, que la pénétration des réacteurs rapides dépend de la fourniture de plutonium par les réacteurs à neutrons thermiques.

Si l'on a pu envisager naguère d'utiliser l'uranium enrichi pour alimenter les premiers réacteurs rapides, et si cette solution a dû être partiellement retenue pour le premier cœur de *Phénix*, il est clair que la filière des réacteurs à neutrons rapides n'a d'intérêt que si elle utilise le plutonium.

Ce plutonium, au moins dans les quinze prochaines années où l'impact de la surrégénération sera négligeable, ne peut venir que des filières thermiques, c'est-à-dire essentiellement de la filière eau légère.

En conclusion, la filière des réacteurs surrégénérateurs ne peut être présentée aujourd'hui comme une concurrente de la filière à eau. Elle aura un rôle essentiel à jouer à la fin du siècle pour assurer dans des conditions économiques satisfaisantes la jonction avec les réacteurs à fusion.

Dans les chapitres qui vont suivre, après avoir décrit les principes généraux des réacteurs à neutrons rapides, on s'attachera à décrire la progression du programme français, à indiquer quels problèmes de recherche et développement se posent encore et à terminer par un examen rapide des problèmes de sûreté et une description de l'organisation industrielle mise en place.

II. — QU'EST-CE QU'UN REACTEUR A NEUTRONS RAPIDES ?

II.1. Principe et description d'un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium.

a) Tous les neutrons, à leur origine, sont rapides. On distingue cependant habituellement les réacteurs à neutrons rapides des autres réacteurs. L'utilisation de ce qualificatif « rapide » évoque dans beaucoup d'autres activités des notions de techniques perfectionnées, de machines à maniement délicat et surtout présentant un certain potentiel de danger.

Il s'agit-là, bien évidemment d'idées fausses en ce qui concerne les réacteurs rapides où ce qualificatif décrit tout simplement l'état dans lequel les neutrons sont utilisés.

Ils sont en effet utilisés à « l'état naissant », c'est-à-dire que la plupart des neutrons émis lors de la réaction fondamentale de fission sont à grande vitesse ou encore à grande énergie. Cette réaction élémentaire, base de l'énergie nucléaire de fission, est commune à tous les types de réacteurs.

La différence entre un « réacteur thermique », c'est-à-dire, en particulier, de la filière à eau (réacteurs pressurisés ou bouillants), et un réacteur rapide tient essentiellement aux conditions dans lesquelles sont réalisées les réactions de fission.

On dit qu'un réacteur est thermique lorsque ces réactions sont obtenues avec des neutrons dont la vitesse correspond à la vitesse d'agitation thermique, le réacteur étant qualifié de rapide lorsqu'il utilise les neutrons à des vitesses correspondant à leur vitesse d'émission.

Dans les réacteurs thermiques, on se sert, en outre, d'une propriété de la matière qui veut que la section efficace de l'uranium 235, c'est-à-dire la probabilité pour qu'un neutron vienne provoquer une réaction de fission dans un noyau fissile est d'autant plus grande que sa vitesse ou son énergie est faible (fig. 1).

Il faut donc dans ces conditions statistiquement moins de neutrons s'ils sont à faible vitesse pour provoquer des réactions de fission.

b) Cette propriété a été utilisée dans les premières filières. Il faut reconnaître

SECTIONS EFFICACES DE FISSIONS (en Barn)

eV	0,01	0,1	1	100	10^3	10^5	10^6	$10 \cdot 10^6$
U^{235}	1000	115	15	11	7	1,8	1,2	1,4
U^{238}	0	0	0	0	0	0	0,01	1
Pu^{239}	1000	350	-	300	4	1,7	1,8	-

DOMAINE DES REACTEURS
THERMIQUES

DOMAINE DES REACTEURS RAPIDES

* * *

FIG. 1. — Sections efficaces de fission U^{235} , U^{238} , Pu^{239}

que cette intéressante propriété physique s'accommodait fort bien des impératifs économiques et politiques du moment. En effet, l'inexistence d'approvisionnement en uranium enrichi et en plutonium en Europe et au Canada a conduit à développer dans ces pays des filières à uranium de composition isotopique naturelle. Ce fut les filières « gaz graphite » en Europe et « eau lourde » au Canada. L'utilisation d'uranium naturel ne permet pas d'obtenir une densité de neutrons suffisante pour entretenir la réaction de fission à l'aide de neutrons rapides.

On ralentit dans ce cas les neutrons dans un « modérateur » pour alors profiter de l'augmentation de la section efficace de fission lorsque les neutrons sont à faible vitesse.

Le modérateur est toujours un matériau léger faiblement absorbant, c'est le graphite dans le premier cas et l'eau lourde dans le second.

c) En ce qui concerne la filière dite américaine ou filière à eau qui est aussi une « filière thermique » ce sont d'autres considérations qui ont conduit à son développement.

En effet, ce ne fut pas seulement la matière première de base enrichie dont les U.S.A. disposaient grâce à leur programme militaire qui permit d'amener cette filière au stade de développement.

Ce fut surtout l'utilisation de l'eau naturelle dont la technologie était parfaitement connue qui, en simplifiant les problèmes de transfert thermique, a permis de développer rapidement la filière.

Malheureusement, l'eau naturelle dite légère ralentit mais aussi absorbe les neutrons ; on aura donc, dans ce cas, des réacteurs à neutrons thermiques et à combustible enrichi.

d) A l'opposé des principes de cette filière, il faut citer la filière à haute température (HTR) qui utilise un fluide de refroidissement peu absorbant et pas du tout modérateur : c'est l'hélium.

Le combustible est alors constitué de particules d'oxyde enrobées de graphite et noyées dans des matrices elles aussi en graphite.

L'existence de quantité importante de graphite dans le cœur va ralentir les neutrons. Dans ce cas le réacteur devient un réacteur thermique malgré lui : le graphite étant ici utilisé grâce à ses propriétés réfractaires.

On voit donc que pour des raisons différentes, les filières ayant atteint un stade industriel ou préindustriel sont des filières à neutrons thermiques. Pour amener les neutrons à des niveaux d'énergie correspondants, il faut, dans le cœur de ces réacteurs, disposer d'un modérateur qui ralentit les neutrons à grande vitesse émis lors des réactions de fission.

e) Il apparaît plus logique d'utiliser les neutrons dans l'état où ils sont produits. On se heurte alors à une difficulté liée à la faible section efficace de fission de l'Uranium pour ces neutrons de hautes énergies. La seule solution dans ces conditions consiste à accroître le nombre des neutrons entrant en jeu, c'est-à-dire la densité des noyaux fissionnés, ce qui peut être atteint en augmentant la teneur en noyaux fissibles du combustible, donc son enrichissement.

On vient de décrire le principe d'un réacteur à neutrons rapides qui, en résumé, se caractérise par :

- des neutrons à grande énergie (10^4 à 10^6 ev), soit des vitesses voisines de 20 000 km/s ;
- un haut flux de neutrons (5 à $7 \cdot 10^{15}$ n/cm²/s) ;
- une très forte densité de fission associée à un enrichissement élevé ;
- une absence de modérateur (ralentisseur de neutrons) ;
- une possibilité d'utiliser pour les structures du cœur des matériaux

absorbants tel que l'acier inoxydable.

D'un point de vue pratique, il en découle de très fortes puissances thermiques spécifiques à évacuer (de l'ordre de 0,5 à 1 MW/litre). C'est bien là la caractéristique technologique essentielle de cette filière. Il faut donc sélectionner un fluide caloporteur répondant aux caractéristiques suivantes :

- très hautes performances thermiques ;
- faible absorption et ralentissement des neutrons ;
- faible activation sous flux de neutrons.

Après inventaire des fluides de refroidissement connus, on en arrive à faire un choix entre :

- certains gaz à haute pression ;
- certains métaux liquides.

Parmi ces choix, en négligeant une tentative allemande d'utilisation de la vapeur d'eau, procédé actuellement abandonné, il reste en course deux filières. La première utilise l'hélium à haute pression (au moins 60 bars) et la seconde le sodium. Seule cette dernière filière a donné lieu à des réalisations de niveau industriel et c'est la filière que la France a retenu à l'instar de tous les autres pays qui ont des programmes de surré-générateurs.

II.2. Le sodium, fluide de refroidissement.

Le sodium, fluide exotique pour la plupart des industriels, n'est, certes pas, d'usage courant en tant que fluide de refroidissement, mais il est parfois utilisé dans les industries chimiques. Son affinité pour l'oxygène et, en conséquence, pour l'eau est très connue, et sa manipulation pose des problèmes certains.

On peut néanmoins affirmer que les nombreuses études qui ont été faites et

une longue pratique de ce fluide prouvent que son emploi ne pose pas plus de difficultés que celui de l'eau si l'on respecte quelques précautions élémentaires.

C'est ainsi que la mise en service de *Phénix* a nécessité le transvasement de 1 400 t de Na depuis les containers de transports vers les installations du réacteur sans poser de problèmes particuliers.

Une des précautions élémentaires est de couvrir constamment le sodium par un gaz inerte comme l'argon, et de suivre en permanence la teneur en hydrogène de ce gaz de couverture pour, éventuellement, détecter le début d'une réaction sodium-eau. Des bougies à rupture d'isolement permettent aussi de détecter des fuites vers l'extérieur des réservoirs et des tuyauteries.

Si le sodium nécessite certaines précautions ses avantages sont, à notre avis, fort intéressants, ses caractéristiques physiques en font un caloporteur de hautes performances (fig. 2). L'avantage principal du sodium n'est cependant pas entièrement là. En effet, le sodium est liquide à 98 °C et bout à 882 °C à la pression atmosphérique.

CARACTÉRISTIQUES COMPARÉES

	point de fusion °C	point d'ébullition °C	densité d'un	viscosité cinématique en centistokes	conductivité thermique dans un °C	résistivité électrique $\mu\Omega/\text{cm}$	chaleur spécifique $\text{cal/g}^\circ\text{C}$	viscosité apparente (P. Poiseuille)
Sodium (à 400°)	97,9	882	0,856	0,328	0,171	22,14	0,306	$2,781 \cdot 10^{-4}$
NaK à 44 % Na (à 200°)	5,7	785	0,857	0,418	0,059	47,5	0,246	$3,67 \cdot 10^{-4}$
Eau (à 100°)	0	100	0,96	0,282	0,0016	—	1,007	—
NaK à 44 % K	18,5	—	—	—	—	41	—	—
NaK à 56 % K	5,7	—	0,854	0,418	0,059	47,5	0,246	$3,67 \cdot 10^{-4}$
NaK à 78 % K	-12,5	785	0,828	0,387	0,059	51	0,218	$3,21 \cdot 10^{-4}$
NaK à 87 % K	18,5	—	—	—	—	—	—	—
K (100 %)	63,2	—	—	—	—	—	—	—

Il est remarquable de constater que les propriétés du sodium à 400°C en ce qui concerne la densité et la viscosité sont très voisines de celles de l'eau. Ces propriétés permettent des simulations hydrauliques dans des conditions particulièrement favorables.

FIG. 2. — Caractéristiques comparées de l'eau et de divers métaux liquides.

Comme la température maximum du sodium, dans le cœur du réacteur, n'est jamais, en fonctionnement normal, supérieure à 550 °C, il ne sera pas nécessaire de pressuriser les réservoirs et cuves contenant le sodium. Finis alors les caissons en béton précontraint, finies aussi les cuves un peu monstrueuses

des réacteurs à eau tenant à 140 bars, les cuves de réacteurs deviennent de simples réservoirs contenant du sodium, les tuyauteries auront tout loisir de se déformer et se déplacer dans leur charpente car elles ne seront plus rigidifiées par les épaisseurs de parois importantes. Elles auront seulement à supporter les surpressions nécessaires à la circulation du sodium qui, de toute façon, ne dépasseront pas quelques bars.

Autre conséquence, il n'y a plus théoriquement de limitation technologique à l'augmentation de la puissance du cœur alors que dans les réacteurs pressurisés l'augmentation de la puissance se traduit par une augmentation de l'épaisseur des parois de cuves corrélativement à l'augmentation des dimensions de la cuve des réacteurs. L'accroissement de ces dimensions bute très rapidement sur les possibilités techniques de réalisations et l'on peut penser qu'actuellement, et sauf progrès techniques importants, la butée en puissance des réacteurs à eau n'est pas loin d'être atteinte.

Comme dans tous les réacteurs nucléaires, une des limitations technologiques se trouve au niveau des températures admissibles sur la gaine du combustible. Le réacteur à neutrons rapides se caractérisant par sa forte puissance spécifique, si l'on veut évacuer la puissance fournie par le cœur sans dépasser la limite de température de gaine du combustible et en obtenant à la sortie du cœur un fluide à température suffisamment élevée, il importe d'utiliser un caloporteur dans des conditions de bon échange thermique.

Les remarquables propriétés thermiques du sodium permettent d'obtenir des températures de fluide élevées à la sortie du cœur : pour *Biblis*, réacteur à eau de 1 200 MW, la température de sortie du cœur est de 316 °C, alors que pour *Super-Phénix* 1 200 MW, le sodium sortira du cœur à 530 °C, donc à une température qui, par transfert de chaleur dans des générateurs de vapeur, permettra d'obtenir facilement des caractéristi-

ques de vapeur équivalentes aux qualités requises pour faire fonctionner des turbines modernes (condition de vapeur prévue pour *Super-Phénix* 490 °C, 184 bars).

Autrement dit, le rendement global d'un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium sera voisin de 0,40 alors qu'il est de 0,33 pour le réacteur *Biblis*.

Un autre avantage non négligeable du sodium est qu'il n'est pas directement corrosif. On peut même dire que son affinité pour les métalloïdes et, en particulier, l'oxygène protège bien les métaux de l'usure par corrosion. A Cadarache, une pompe de *Rapsodie* a été démontée après trois années de fonctionnement : elle pouvait être considérée comme matériel neuf.

Cette particularité du sodium n'est pas sans causer quelques soucis aux projecteurs. L'absence d'oxydes sur la surface des parties en contact a modifié les conditions de frottement et a obligé à entreprendre un programme d'études de technologie pour sélectionner les matériaux devant équiper des pièces métalliques en mouvement dans le sodium.

Il ne faut cependant pas conclure que l'utilisation du sodium permet d'éliminer tous les problèmes de corrosion. Un réacteur nucléaire est prévu pour fonctionner au moins 20 années avec des conditions très difficiles d'accessibilité des organes sous flux. On a, de ce fait, engagé de nombreuses études physico-chimiques et pour n'en citer qu'une : l'étude des phénomènes de transport par le sodium de carbone des aciers ferritiques vers les aciers austénitiques, phénomène qui, de façon indirecte, peut être considéré comme étant de la corrosion.

II.3. La surrégénération.

L'avantage considérable des réacteurs à neutrons rapides, qui est vraiment leur raison d'être, est qu'ils peuvent être surrégénérateurs, c'est-à-dire qu'ils peuvent

produire plus de combustible qu'ils n'en consomment.

Quel est ce paradoxe ?

Il n'y a, en fait, rien de mystérieux dans cette propriété. Parmi les neutrons émis lors de la fission d'un noyau de matière fissile (U_{235} ou Pu_{239}), certains vont être capturés par les noyaux d' U_{238} qui est non fissile pour donner du Pu_{239} qui est fissile.

Ce phénomène de capture n'est pas propre aux réacteurs rapides, il existe dans tous les réacteurs nucléaires. La seule différence entre les réacteurs dits surrégénérateurs et les autres est que dans les premiers les réactions de captures sont bénéficiaires, c'est-à-dire qu'il y a plus d'uranium 238 (fertile) transformé en Pu_{239} qu'il n'y a d' U_{235} ou de Pu_{239} (fissile) consommé pendant le même temps.

Pour favoriser cette fonction surrégénératrice le cœur d'un réacteur rapide est entouré sur toutes ses faces par une couverture d'uranium naturel ou appau-

vri (déchets d'usine de séparation isotopique) qui récupère les neutrons s'échappant du cœur.

On pourrait peut-être penser qu'il suffit alors de charger le réacteur une fois pour toutes et que, par régénération, on pourra consommer tout l'uranium.

Cela est malheureusement faux, car, d'une part, les réactions de fissions produisent des poisons qui absorbent inutilement des neutrons, et, d'autre part, l'excédent de plutonium est surtout produit dans les couvertures du réacteur, c'est-à-dire dans une zone où la réaction de fission ne peut pas s'entretenir, car la densité de matière fissile n'est pas suffisante. Enfin, les matériaux de gainage et de structure ont une vie limitée.

Il faut donc retraiter le combustible pour extraire le Plutonium et c'est là une fonction essentielle dans le cycle du combustible (fig. 3) car c'est de la qualité et la célérité de l'extraction du Plutonium que la filière surrégénératrice pourra être introduite plus ou moins rapidement.

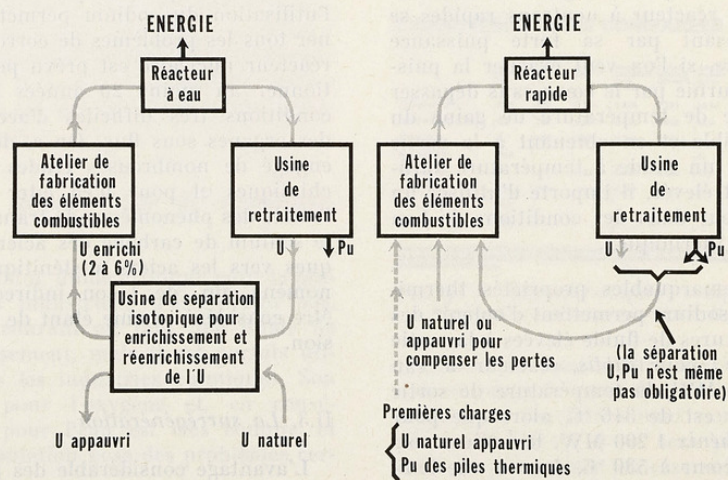


FIG. 3. — Cycles de combustible des réacteurs à neutrons thermiques et à neutrons rapides. (On remarque que, après la première charge, le cycle des réacteurs rapides est fermé et quasiment autonome)

II.4. Pénétration des centrales à neutrons rapides dans le parc électronucléaire.

La courbe n° 4 extraite d'un rapport de l'Unipède (Union des Producteurs et Distributeurs d'Electricité) de mars 1974 établit une prévision de pénétration de l'énergie d'origine nucléaire et de la part qu'en prendraient les réacteurs à neutrons rapides.

On a supposé pour les réacteurs à neutrons rapides des conditions autarciques, c'est-à-dire que le Plutonium provient exclusivement des réacteurs à eau de l'Europe des 9 et qu'il n'y a pas de recyclage Plutonium dans ces réacteurs.

Evidemment, au début, et pendant une assez longue période, la croissance des rapides sera tributaire du parc des réacteurs à eau légère. On pourra cependant construire d'autant plus de réacteurs rapides que chacun réclamera moins de Pu. Il s'agit non seulement du Pu en réacteur mais aussi du Pu immobilisé hors pile dans l'usine de fabrication d'assemblages, dans les stockages actifs et surtout dans l'usine de retraitement. On définit de cette façon un « cycle du combustible » (fig. 4) auquel correspond un investissement Plutonium.

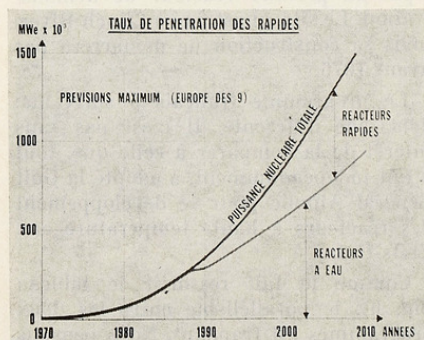


FIG. 4. — Prévisions de développement de la puissance nucléaire installée (origine Unipède, 1974)

Au fur et à mesure que le nombre des réacteurs rapides s'accroîtra, leur propre

production de Plutonium s'ajoutera à la production des réacteurs à eau légère. L'accélération de leur pénétration sera d'autant plus significative que leur temps de doublement sera plus court. On entend par temps de doublement le temps à partir duquel un réacteur rapide aura produit suffisamment de Plutonium pour alimenter un réacteur identique à lui-même sans apport extérieur de combustible. Ce temps de doublement dépend de la quantité de Plutonium dans le cycle et du taux de régénération. Il semble difficile avec le combustible à oxyde de descendre en dessous de 15 ans.

L'idéal serait évidemment d'avoir un temps de doublement au plus égal au temps de doublement de la demande d'énergie qui est actuellement de l'ordre de 10 ans.

Un autre possibilité s'offre alors aux réacteurs à neutrons rapides par l'utilisation du combustible carbure au lieu du combustible oxyde. Le carbure (UC,PuC) possède des propriétés intrinsèques (densité plus élevée des noyaux lourds, meilleure conductibilité thermique) qui pourraient lui permettre de réduire d'une part l'investissement en Plutonium dans le cycle et d'augmenter le taux de régénération.

On estime pouvoir atteindre, dans ces conditions, un temps de doublement de l'ordre de 10 ans avec ce combustible.

Un travail de recherche et développement déjà engagé devra être poursuivi pour promouvoir ce nouveau combustible et les réacteurs à neutrons rapides pourront prendre une part croissante de la puissance électrique installée et, le cas échéant, la totalité.

Cette éventualité serait une grande satisfaction sur le plan de l'utilisation optimum des ressources énergétiques de la planète car elle permettrait de multiplier par un facteur d'au moins 50 la possibilité d'utiliser l'énergie contenue dans l'uranium naturel.

III. — LA PROGRESSION DU PROGRAMME FRANÇAIS

Le développement d'une filière de réacteurs depuis les premières réalisations expérimentales jusqu'à la commercialisation de centrales nucléaires est une vaste entreprise. Il est, d'une part, soumis à une dynamique interne et doit faire face, d'autre part, à des contraintes externes.

La dynamique interne, c'est-à-dire la progression des connaissances, la mise au point de composants fiables et peu coûteux, l'accumulation progressive des expériences de conception, de construction et d'exploitation se déroule lentement et au prix de dépenses considérables, et avec des risques.

L'évolution des besoins en énergie, la concurrence avec les autres sources de production d'électricité et les autres filières, les disponibilités en matière fissile, les conditions économiques constituent des contraintes externes.

Le premier réacteur nucléaire électrogène fut un réacteur à neutrons rapides refroidi par du métal liquide, c'était en 1951 aux U.S.A., et ce réacteur s'appelait *EBR I*. Tout en continuant à développer le système de réacteur à neutrons rapides et le caloporteur métal liquide, les U.S.A. ralentirent leur effort et se concentrèrent sur la filière à eau légère et uranium enrichi. Les Britanniques et les Soviétiques commencèrent leur programme très tôt, mais utilisaient un combustible métallique.

La France commençait un peu plus tard que les précédents, mais choisissait, dès le départ, d'orienter les recherches vers le combustible oxyde-mixte d'uranium-plutonium et le réfrigérant sodium. Ce choix initial et le maintien permanent de cette option ont eu un effet important sur le développement rapide du système français.

Si l'on compare les calendriers de développement de la filière des réacteurs rapides dans les différents pays (fig. 5),

DATES DE MISE EN SERVICE

	U.R.S.S.	France	Grande-Bretagne	Allemagne Benelux	U.S.A.	Japon	Inde	Italie
réacteurs expérimentaux	BR I 1954 BR 5 1958	Rapsodie 1967	DFR 1959	KNK II 1974	Clémentine 1966 EBR I 1961 EBR II 1962 Sofor 1969 FFTF 1978	JOYO 1974	FETR 1978	PEC 1979
réacteurs de démonstration	BN 350 1972 BN 600 1975	Phénix 1973	PFR 1974	SNR 1978	DEMO 1980	MONJU 1980		
prototypes commerciaux		Super Phénix 1980	CFR 1980	1985	1985 -1990			

FIG. 5. — Dates de mise en service des réacteurs à neutrons rapides dans le monde

on constate que la France se trouve maintenant dans le peloton de tête avec l'U.R.S.S. et la Grande-Bretagne. La mise en sodium du *B.N. 350* soviétique, dont la construction a commencé en 1964, a eu lieu à la fin de novembre 1972. Celle de *Phénix*, dont la construction a commencé en 1968, a eu lieu en janvier 1973. Celle du *PFR* britannique, dont la construction a commencé en 1966, a eu lieu en 1973. La construction du *SNR* (Allemagne et Benelux) commencera en 1974.

Aux Etats-Unis, l'A.E.C. et les producteurs d'électricité associés (T.V.A. et Com. Edison) ont choisi récemment Westinghouse comme constructeur principal du premier réacteur de démonstration. Le site en est fixé à Clinch River, mais sa construction ne démarrera pas avant 1976.

Le programme français a suivi une démarche différente. Il n'est pas sans intérêt de la comparer à celle que, tout à fait indépendamment, a adopté la Gulf General Atomic pour le développement des réacteurs à haute température aux Etats-Unis.

Comme le fait ressortir le tableau (fig. 6), le parallélisme entre les deux programmes est frappant. Nous pensons qu'il y a là plus qu'une coïncidence, et que, malgré la différence profonde des techniques, certains impératifs conduisent à la définition d'une stratégie optimale dans le choix des étapes et de leur calendrier. Cette démarche peut paraître

DATES DE MISE EN SERVICE

	réacteur expérimental	réacteur de démonstration	prototype commercial
Développement HTR Gulf General Atomic	Peach Bottom 1966	Fort St-Vrain 300 MWe 1973	WILMINGTON (Philadelphia) 1160 MWe 1979/1981
Développement RNR France	Rapsodie 1967	Phénix 250 MWe 1973	Super Phénix 1200 MWe 1980

FIG. 6. — Evolution comparée du programme américain de réacteur à haute température et du programme français de réacteur rapide

hardie si l'on s'en tient à la comparaison avec le développement des réacteurs à eau légère. En fait, la politique de développement des réacteurs à neutrons rapides en France a été dictée par la prudence, et a suivi la progression des connaissances, les risques n'étant pris, lorsqu'il le fallait, qu'après avoir été bien calculés.

III.1. Le pionnier français, Rapsodie.

Rapsodie, dont une vue générale est donnée en figure 7 est le premier réacteur à neutrons rapides français, il est le premier réacteur à combustible entiè-

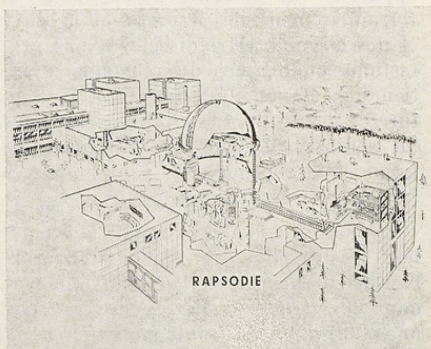


FIG. 7. — Rapsodie : premier réacteur à neutrons rapides français. Au centre, le bâtiment du réacteur ; à droite, le bâtiment des circuits d'évacuation de chaleur ; à gauche, la salle de contrôle ; au fond, le bâtiment de stockage et découpage des assemblages combustibles.

rement oxyde réfrigéré au sodium à avoir fonctionné dans le monde, aussi nous arrêterons-nous pour le décrire.

C'est le 2 juillet 1962 qu'un contrat d'association entre le commissariat à l'énergie atomique et l'Euratom était signé pour l'étude et la construction de *Rapsodie* en même temps que du réacteur source *Harmonie* et de l'expérience critique *Masurca*.

Ces trois installations fonctionnent au Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache.

Rapsodie a divergé le 28 janvier 1967 pour atteindre 20 MW le 17 mars. La puissance a été portée ensuite le 8 novembre de la même année à 24 MW thermiques. Cette puissance a été, jusqu'en 1970, la puissance normale de fonctionnement du réacteur. L'objectif majeur de *Rapsodie* était d'apporter dans un délai rapproché une connaissance suffisante du comportement des combustibles envisagés pour les réacteurs de la filière des réacteurs rapides. Cette connaissance a d'abord été recherchée dans « l'expérience statistique » de l'irradiation des premiers cœurs du réacteur.

En outre, l'exploitation du réacteur a apporté une expérience technologique qui est mise à profit tous les jours pour le développement de la filière.

Le matériau combustible de *Rapsodie* est un mélange d'oxyde de plutonium et d'oxyde d'uranium enrichi.

L'ensemble du cœur et des couvertures forme un cylindre à axe vertical, obtenu par la juxtaposition d'assemblages hexagonaux de dimensions identiques ; les matériaux fissile et fertile s'y trouvant contenus sous forme d'aiguilles assemblées en faisceaux. Au centre, le cœur, constitué par ces aiguilles de combustible, occupe un volume d'environ 50 litres. La densité volumique de puissance maximale est de 630 kW/l.

Un cuve cylindrique en acier inoxydable contient les assemblages supportés

par un sommier, ainsi que les écrans des protections neutronique et thermique. Le sodium y circule du bas vers le haut. Suspendue par sa bride supérieure, la cuve est placée à l'intérieur d'un massif de béton constituant la protection biologique latérale et inférieure. La fermeture supérieure est réalisée par un ensemble de bouchons tournants qui assurent la protection biologique vers le haut et à travers lesquels s'effectuent la manutention des assemblages, la manœuvre des barres de contrôle et la mesure des températures du sodium à la sortie des assemblages les plus chargés.

Le circuit primaire se compose de deux boucles (fig. 8). L'entrée du sodium dans la cuve, par le fond de celle-ci, constitue une partie commune à ces deux boucles tandis qu'à chaque boucle correspond un orifice de sortie ; les deux orifices de sorties sont situés latéralement à la partie haute de la cuve, diamétralement opposés. A chaque boucle

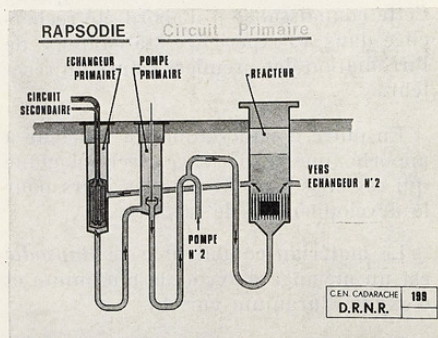


FIG. 8. — Schéma du circuit primaire de Rapsodie

primaire, est couplé, par échangeur intermédiaire, un circuit secondaire dans lequel circule du sodium inactif (fig. 9). L'énergie ainsi transférée est évacuée à l'atmosphère par un échangeur terminal sodium-air.

On a voulu, en effet, s'affranchir des difficultés apportées par une installation de production d'électricité qui aurait

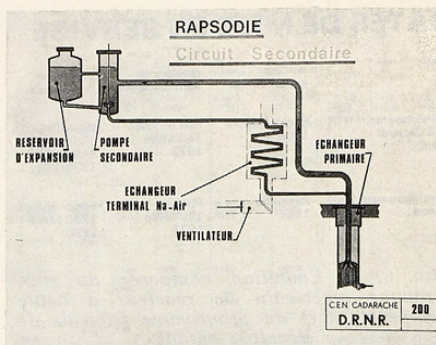


FIG. 9. — Schéma du circuit secondaire de Rapsodie

enlevé de la souplesse à l'exploitation du réacteur expérimental.

La circulation du sodium est assurée dans chaque boucle primaire, comme dans chaque circuit secondaire, par une pompe mécanique centrifuge.

La disposition des circuits permet d'évacuer la puissance résiduelle du réacteur par circulation naturelle.

Des circuits auxiliaires complètent l'installation. Leur existence tient à des nécessités d'ordres divers : purification continue du sodium, couverture d'argon des niveaux libres de la cuve et des appareils des circuits, préchauffage et refroidissement de secours de la cuve et des circuits, refroidissement des protections biologiques du réacteur, maintien des étanchéités, détection de rupture de gaine, etc. Ces circuits véhiculent du sodium, de l'argon, de l'azote ; le fréon et le thermofluide sont employés comme réfrigérants secondaires.

Le contrôle de la réactivité du réacteur se fait au moyen de barres absorbantes en carbure de bore qui plongent dans le cœur. Ces barres de contrôle, au nombre de 6 sont manœuvrées à l'aide de mécanismes supportés par les bouchons de la cuve du réacteur.

Selon le degré d'urgence de l'intervention, l'arrêt du réacteur est obtenu soit par descente à vitesse uniforme, soit par chute accélérée des barres de contrôle.

Les actions de sécurité sont commandées par l'opérateur, ou automatiquement par un ensemble de circuits logiques qui analyse en permanence les paramètres essentiels de la sécurité du réacteur.

Une rotation combinée des deux bouchons tournants permet d'amener le canal de manutention, qui traverse le petit bouchon tournant, à l'aplomb de n'importe quel logement d'assemblage ou de barre. Des machines mobiles extérieures au bloc-pile, les hottes primaires (fig. 10) assurent le chargement et le déchargement des éléments neufs ou irradiés ainsi que leur transport entre le réacteur et les puits d'un bloc de transfert. Une hotte secondaire assure le transport de ces éléments entre le bloc de transfert et les emplacements de stockage situés dans le bâtiment actif. Enfin, des hottes spéciales permettent de manipuler et de transporter les organes mécaniques, dispositifs expérimentaux,

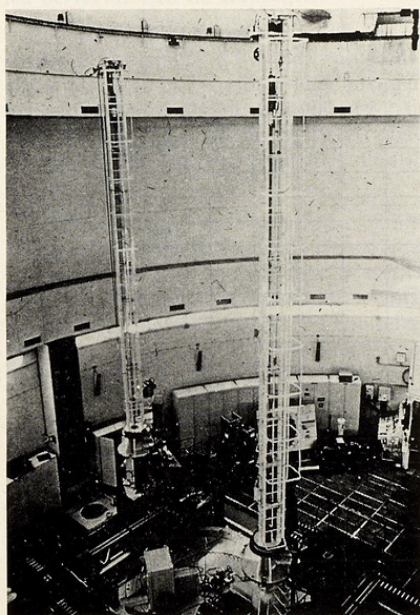


FIG. 10. — Les hottes de manutention du combustible de Rapsodie

bouchons, etc... dont l'activité ou la contamination réclament des précautions spéciales.

Le réacteur est conduit et surveillé par des opérateurs depuis une salle de commande extérieure à l'enceinte étanche. Ces opérateurs disposent de toutes les informations nécessaires en provenance de l'installation.

La surveillance du réacteur bénéficie de l'assistance d'un système de traitement centralisé des mesures et signalisation.

Le réacteur et tous les circuits véhiculant du sodium actif, éventuellement contaminé, sont enfermés dans des cellules en béton.

Contre la dispersion d'éventuelles projections de matières actives (sodium, argon, gaz de fission, etc...) à travers les fermetures supérieures, l'ultime barrière est constituée par une enceinte métallique étanche d'une résistance telle qu'elle puisse conserver son intégrité dans l'hypothèse d'un feu de sodium en nappe.

Rapsodie a apporté le premier irremplaçable expérience de l'exploitation en vraie grandeur d'un réacteur à sodium. Il a fait la preuve que sa construction pouvait être accomplie dans des délais raisonnables en suivant un planning de type industriel. Son démarrage a été particulièrement réussi, sa première montée en puissance n'a pris que sept jours. Le facteur de charge du réacteur, malgré les très lourdes servitudes que constitue l'expérimentation, s'est révélé très convenable.

Enfin, et ce n'est pas le point le moins intéressant, des incidents sont venus perturber sa marche : fuites de sodium, avaries de machines de manutention provoquant la déformation d'éléments du cœur, défauts sur les joints des bouchons, etc...

Pour ne citer qu'un exemple, il est instructif de noter qu'après trois ans de fonctionnement, il était possible de his-

COMPARAISONS

CARACTÉRISTIQUES

puissance thermique du réacteur	
flux neutronique maximal	
flux neutronique moyen dans le cœur	
nature du combustible	
composition du combustible :	- PuO ₂
	- UO ₂
enrichissement de l'uranium	
diamètre des pastilles de combustible	
hauteur de la colonne de pastilles	
diamètre extérieur de la gaine des aiguilles	
nombre d'aiguilles de combustible par assemblage	
nombre d'assemblages du cœur	
fluide de refroidissement	
température du sodium :	- à l'entrée du réacteur
	- à la sortie du réacteur
débit du sodium dans le circuit primaire	

RAPSODIE

24 MW

2.10¹⁸ n/cm².s1,25.10¹⁸ n/cm².s

25 %

75 %

80 %

5,57 mm

34 cm

6,7 mm

37

62

sodium

405°C

495°C

890 m³/hRAPSODIE
FORTISSIMO

40 MW env.

3,2.10¹⁸ n/cm².s3.10¹⁸ n/cm².s

oxyde mixte d'U et de PU

30 %

70 %

85 %

4,23 mm

32 cm

5,1 mm

61

64

sodium

400°C

514°C

1 100 m³/h

Fig. 11. — Caractéristiques comparées de Rapsodie-24 MW et de Rapsodie Fortissimo (40 MW)

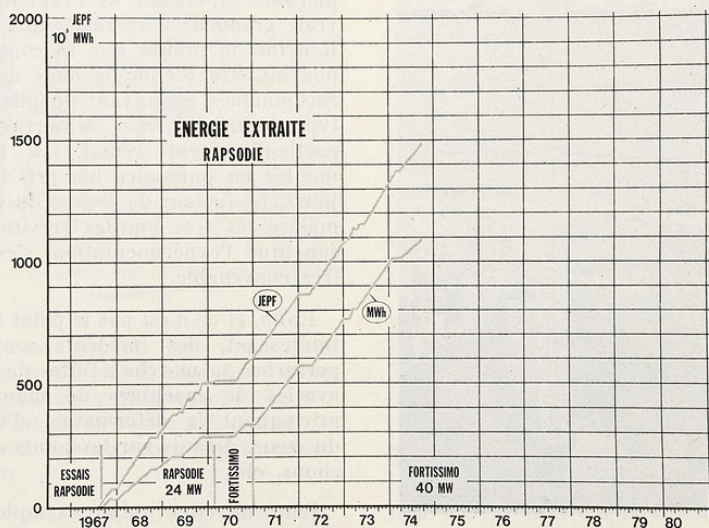


Fig. 12. — L'énergie thermique fournie par Rapsodie depuis ses origines

ser la fermeture supérieure du réacteur (petit bouchon tournant) d'un mètre cinquante ; dans ces conditions, le cœur étant en place, le personnel a pu travailler sans faire usage de masque et sans dépasser les doses admissibles d'irradiation et de contamination en service continu.

Il apparaissait déjà, après trois ans de fonctionnement de *Rapsodie* que les réacteurs surrégénérateurs à sodium seraient bien différents de l'idée que l'on pouvait s'en faire il y a 20 ans. Leur caractère futuriste, cette rapidité des neutrons, ce fluide inconnu, tout laissait croire que les réacteurs rapides allaient être des machines poussées. L'expérience initiale, largement confirmée depuis, montrait que ce type de réacteur poserait des problèmes tout à fait surmontables et que la filière correspondante méritait d'être développée sans plus tarder.

C'est dans cette période qu'était prise la décision de construire *Phénix*, dont on va reparler, mais aussi d'augmenter les performances de *Rapsodie*.

En effet, si *Rapsodie* avait déjà permis, en 1969, d'irradier plus de 1 000 aiguilles de combustibles jusqu'à un taux de combustion de 5 000 MWj/t, ses promoteurs pensaient qu'il était possible d'augmenter ses capacités d'outil d'irradiation.

Le flux de neutrons dont était capable *Rapsodie* — 24 MW était encore éloigné des flux des grands réacteurs à venir. On a donc cherché à augmenter le flux de neutrons dans *Rapsodie* au moindre frais. Tel a été le but d'une opération dont le nom de code est *Fortissimo*.

Disons brièvement qu'il s'agit de faire passer la puissance spécifique du réacteur de 630 kW/l à 1 080 kW/l. Pour cela, on a modifié d'abord les éléments combustibles que l'on divise plus finement pour augmenter la surface d'échange : 61 aiguilles au lieu de 37 par assemblage ; bien évidemment, on est amené à tenir compte de ces nouvelles performances dans l'ensemble de l'installation d'extraction de chaleur.

C'est ainsi qu'ont été changées les pompes primaires et secondaires, les échangeurs intermédiaires, les barres de contrôle, les machines de manutention, le pupitre de commande. L'ensemble de l'affaire s'est déroulé du 23-2-1970 au 14-8-1970. La puissance totale passant de 24 à 40 MW. L'ampleur de cette opération sur un réacteur ayant déjà fonctionné pendant trois ans a fait un banc d'essai précieux pour les méthodes de réparation et de maintenance.

Fonctionnant à ses nouvelles caractéristiques (fig. 11) depuis 1970, *Rapsodie-Fortissimo* a continué son programme d'irradiation de combustible. Il a passé le cap du milliard de kWh thermique produit le 23-1-1974 (fig. 12).

Les aiguilles combustibles du cœur nourrisseur fonctionnent normalement jusqu'à un taux de combustion de 70 000 MWj/t (8,1 % atomes lourds brûlés), certaines aiguilles expérimentales ayant dépassé 160 000 MWj/t (18 % d'atomes lourds) (fig. 13).

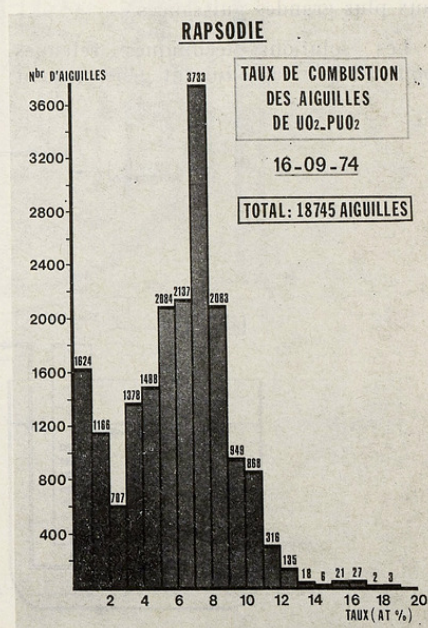


FIG. 13. — Histogramme des taux de combustion des aiguilles de combustible de *Rapsodie*

III.2. La centrale de démonstration, Phénix.

Entre *Rapsodie*, réacteur expérimental qui ne produit pas d'électricité, et la première centrale commerciale prototype qui ne peut être que de très grande puissance (plus de 600 MWe) existe nécessairement au moins une étape intermédiaire répondant au souci de limiter les risques et les difficultés de l'entreprise. Cette étape intermédiaire, c'est *Phénix*. Centrale électronucléaire de démonstration d'une puissance de 250 MWe. Le nom de *Phénix* est à lui seul tout un programme : des cendres du combustible nucléaire, un nouveau combustible est tiré...

Le choix de la taille de 560 mégawatts thermiques (ou 250 mégawatts électriques) résulte d'un compromis entre le souci d'être représentatif et celui de minimiser les investissements. En fait, on a cherché à adopter des solutions qui soient extrapolables sans difficulté aux plus grandes puissances.

Les solutions techniques retenues pour *Phénix* reproduisent généralement

les solutions de *Rapsodie* : combustible très voisin, pompes et échangeurs intermédiaires directement dérivés de *Rapsodie*, fermetures supérieures très voisines, appareillage et instrumentation en sodium souvent purement transposés. Il reste un point d'importance où l'on s'est écarté délibérément des solutions de *Rapsodie* : *Phénix* est un « réacteur intégré », *Rapsodie* est un « réacteur à boucles ».

Comme la controverse internationale au sujet des mérites respectifs de ces deux systèmes se poursuit et que les deux types paraissent se développer à peu près également, il n'est pas mauvais d'examiner les arguments pour et contre. Les deux solutions utilisent des récipients de sodium à niveau libre surmontés par une atmosphère d'argon. Dans la solution à boucle, ces récipients sont assez nombreux : les uns pour le cœur, les autres pour les pompes et échangeurs et sont reliés entre eux par des tuyaux. Dans la solution intégrée, pompes et échangeurs sont suspendus dans la cuve même qui contient le cœur et ses protections neutroniques (fig. 14 et 15). La solution intégrée conduit évi-

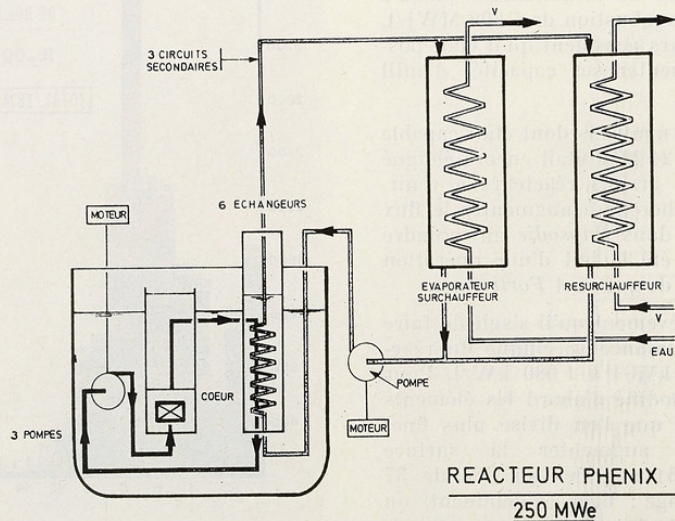


FIG. 14. — Schéma des circuits primaires et secondaires de Phénix.
(La vapeur issue des générateurs de vapeur est fournie à un turbo-alternateur du palier classique E.D.F. de 250 MW)

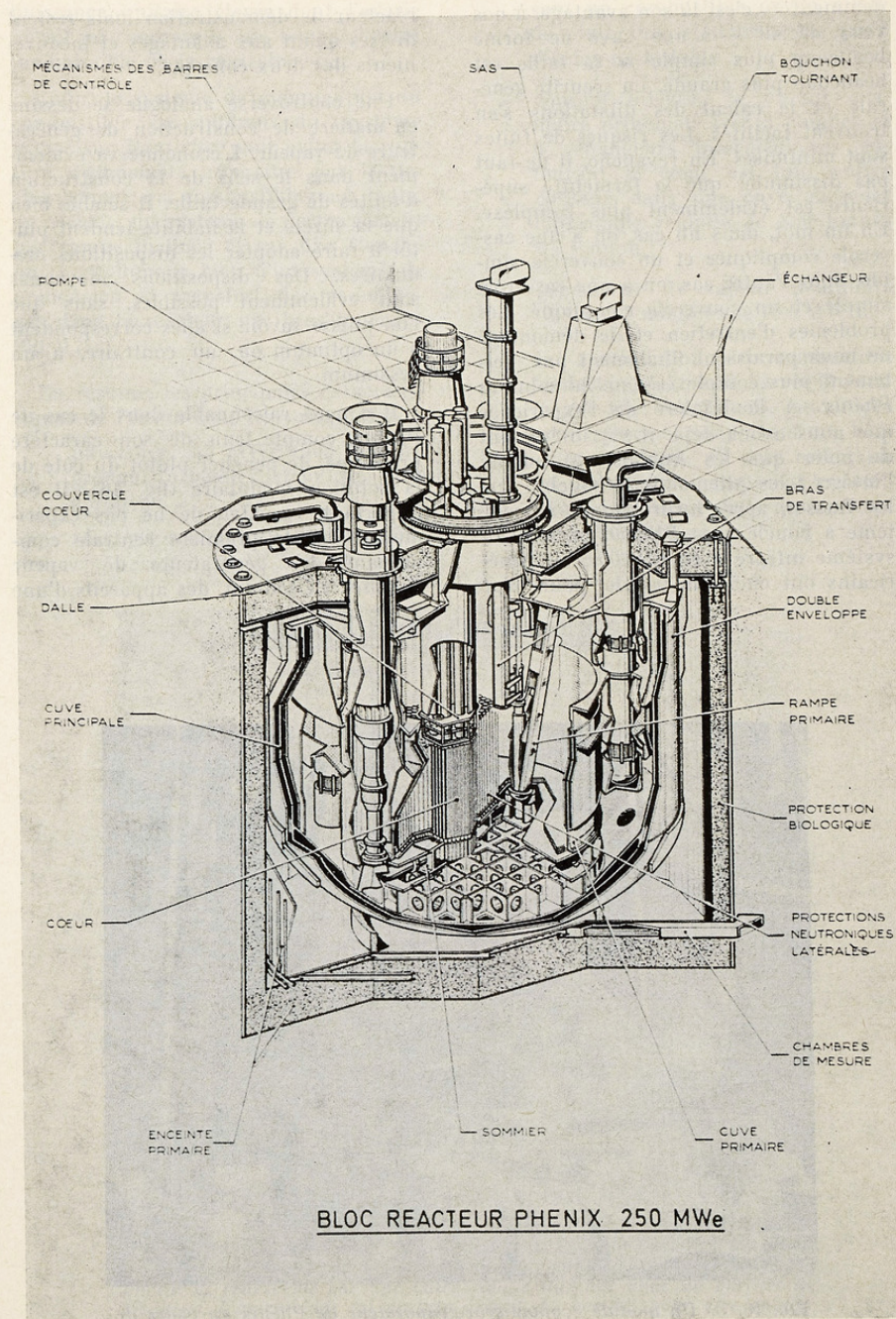


FIG. 15. — Vue en « écorché » du bloc réacteur de Phénix. (On voit la disposition du « circuit primaire intégré » avec pompes et échangeurs contenus dans la cuve principale contenant le cœur et le sodium primaire

demment — c'est là son avantage, à nos yeux, décisif — à une cuve de forme beaucoup plus simple si sa taille est beaucoup plus grande. La sécurité générale et le calcul des dilatations s'en trouvent facilités. Les risques de fuites sont minimisés. En revanche, il ne faut pas dissimuler que la fermeture supérieure est évidemment plus complexe. En un mot, dans un cas, on a une casserole compliquée et un couvercle simple, dans l'autre cas, on a une casserole simple et un couvercle compliqué. Les problèmes d'entretien et de démontage ne nous paraissent finalement pas nettement plus complexes dans la solution *Phénix*. A la lumière de l'expérience que nous avons déjà, il est intéressant de noter que les Anglais ont adopté l'intégré ; les Allemands la boucle ; que les Russes, après avoir adopté le système à boucle avec *BN 350*, passent au système intégré avec *BN 600* ; les Américains ont choisi la boucle pour leur

réacteur de démonstration mais restent divisés quant aux avantages et inconvénients des deux concepts.

Une controverse analogue se dessine en matière de construction de générateurs de vapeur. L'économie va évidemment dans le sens de la construction d'unités de grande taille. Il semble bien que la sûreté et la fiabilité tendent plutôt à faire adopter les dispositions modulaires. Des dispositions moyennes sont évidemment possibles, sans que l'on puisse savoir si elles correspondent à un optimum ou, au contraire, à un pessimisme.

Il a paru raisonnable dans le cas de *Phénix*, compte tenu de son caractère prototype, de pencher plutôt du côté de la solution modulaire (fig. 16). Il est important, en effet, de ne pas expérimenter sur la première centrale comprenant des générateurs de vapeur chauffés au sodium, des appareils d'une

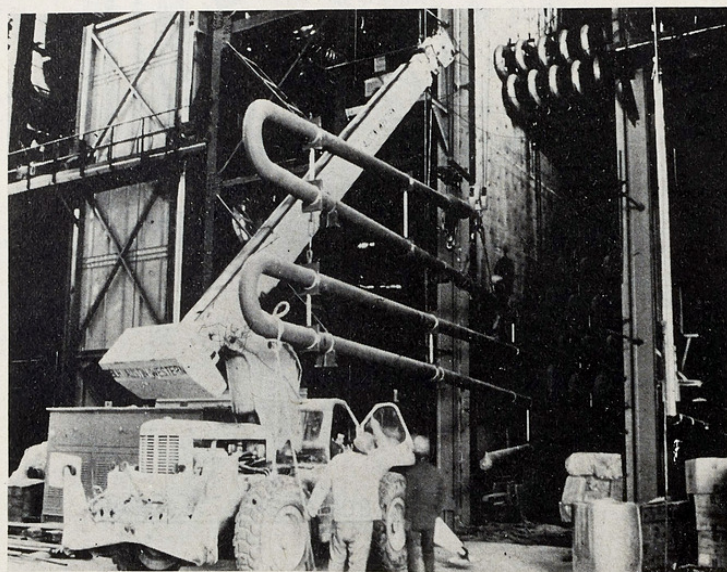


FIG. 16. — Un module économiseur-évaporateur de *Phénix* en cours de montage. (On voit, en arrière-plan, des modules déjà en place)

puissance unitaire élevée dont l'avarie aurait pu conduire à un temps d'arrêt inadmissible de la centrale.

Enfin, le système de manutention du combustible est différent du système utilisé sur *Rapsodie*, pour éviter la rupture d'étanchéité nécessitée par le déchargement du combustible par hotte, on a choisi un système de déchargement par rampe inclinée et sas fixe étanche qui s'accommode bien d'un système de préhension et transfert des assemblages dans le réacteur par bras tournant (fig. 17).

En résumé, les principales caractéristiques de *Phénix* sont les suivantes :

- puissance 250 MWe (563 MWth), groupe turboalternateur de type éprouvé ;
- réacteur refroidi au sodium utili-

sant un combustible oxyde mixte de plutonium et d'uranium gainé d'acier inoxydable ;

- concept intégré : le circuit primaire principal, avec 3 pompes et 6 échangeurs intermédiaires entourant le cœur est tout entier contenu dans une cuve en acier inoxydable remplie de 800 tonnes de sodium ;
- générateur de vapeur modulaire (3 fois 12 modules de 15,5 MWth) ;
- la manutention du combustible s'effectue réacteur à l'arrêt (1 campagne tous les 2 mois) au moyen d'un système comportant un bouchon tournant, un bras orientable et un système rampe sas permettant le transfert dans un stockage hors du réacteur ;

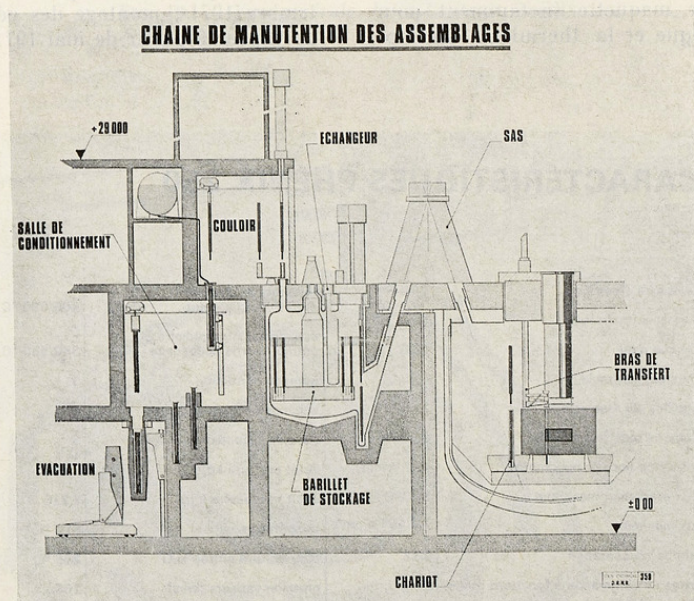


FIG. 17. — Schéma d'une chaîne de manutention des assemblages (l'assemblage est saisi dans le cœur par un bras de transfert tournant, déposé dans un chariot qui roule sur une rampe inclinée, bascule dans un sas et redescend par une autre rampe inclinée dans un barillet de stockage. L'assemblage est ensuite extrait du barillet pour être envoyé à l'usine de retraitement)

— fonctionnement sur le réseau en centrale de base.

La figure 18 rassemble les principales caractéristiques thermiques de la centrale et les photos 19 et 20 représentent une vue générale et une vue de la salle du réacteur de la centrale.

C'est en 1966 que fut commencée l'étude de l'avant-projet de *Phénix* par le Département des Réacteurs à Neutrons Rapides et le Département de Développement des Éléments Combustibles du C.E.A. à Cadarache. La construction commençait en 1968 à Marcoule, elle était confiée à une équipe intégrée comprenant du personnel d'E.D.F., de la société privée G.A.A.A. et du Département de Construction de Piles du C.E.A. sous la direction de ce dernier.

Rappelons brièvement les phases principales de la réalisation :

— de 1968 à 1971, études de projets, essais sur maquette (notamment pour l'hydraulique et la thermique du bloc

réacteur), essais des prototypes des principaux composants (pompe principale, mécanismes de barres de commande, bras, rampe, sas de maintenance, modules de générateur de vapeur). La politique, qui avait réussi pour *Rapsodie*, était en effet reconduite pour *Phénix* : les composants importants sont essayés, si possible en vraie grandeur, en sodium dans les installations du C.E.A. à Cadarache ou à Grand-Quevilly, ou d'E.D.F. aux Renardières.

Quand ce n'est pas nécessaire ou pas possible, on réalise les essais en eau et les simulations hydrauliques sur maquettes dans les installations du C.E.A. à Saclay et Cadarache ou d'E.D.F. ou de laboratoires privés.

— parallèlement, construction des bâtiments, mise en place des cuves en novembre 1970 (fig. 21), du couvercle de la cuve principale (toit) en août et de la dalle de protection supérieure en septembre 1971 ; montage des générateurs de vapeur à partir de mai 1971 ;

CARACTÉRISTIQUES PHÉNIX 250

puissance électrique	250	température sodium entrée / sortie cœur	400/560 °C
puissance thermique	563	échangeur intermédiaire entrée / sortie secondaire	350/550 °C
volume cœur	1227 l	pompes primaires	3
longueur assemblage	4,3 m	échangeurs intermédiaires	6
aiguilles par assemblage	217	boucles secondaires	3
diamètre extérieur aiguille	6,6 mm	débit primaire kg/s	2 760
puissance linéaire maximum	430 W/cm	débit secondaire kg/s	2 210
taux irradiation maximum	50 000 MW/t	température vapeur	510 °C
flux maximum	$7,2 \cdot 10^{16}$ n/cm ² s	température entrée H ₂ O	246 °C
gain de régénération	0,12	pression vapeurs (bars)	168
barres de commande à fonctions mixtes	6		
système d'arrêt complémentaire	0		
température de gaine nominale (maximale)	650/700 °C		

FIG. 18. — Caractéristiques de Phénix

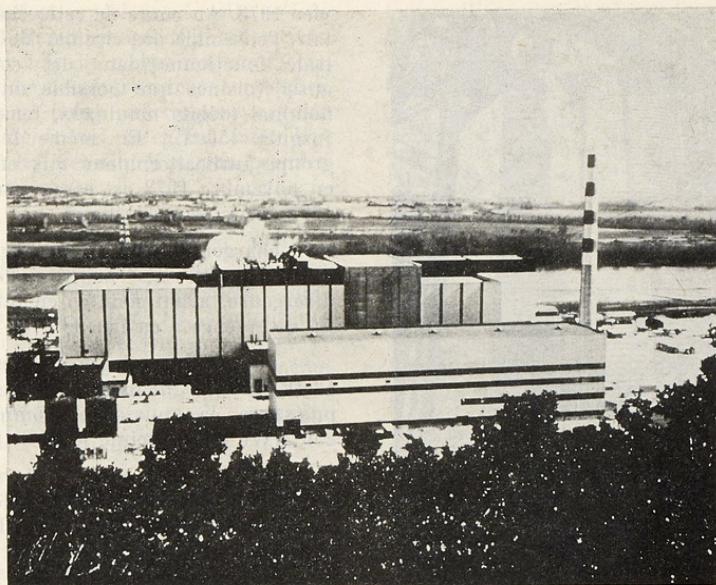


FIG. 19. — Vue générale de la Centrale Phénix

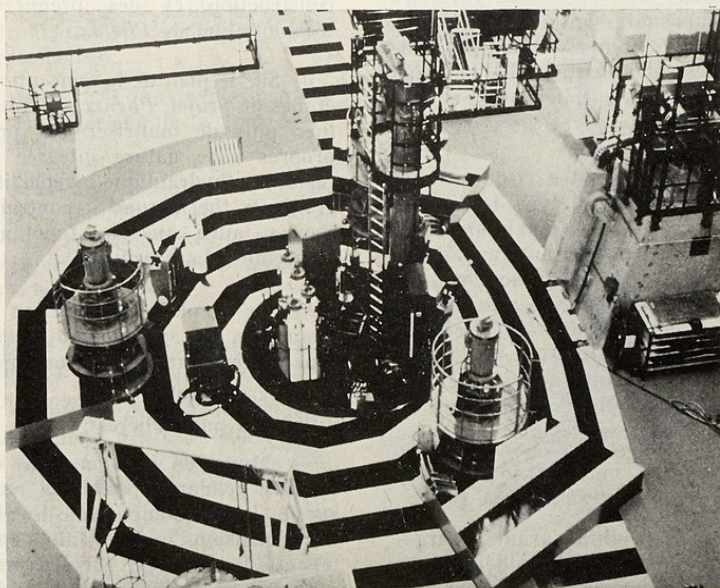


FIG. 20. — Phénix. La salle du réacteur

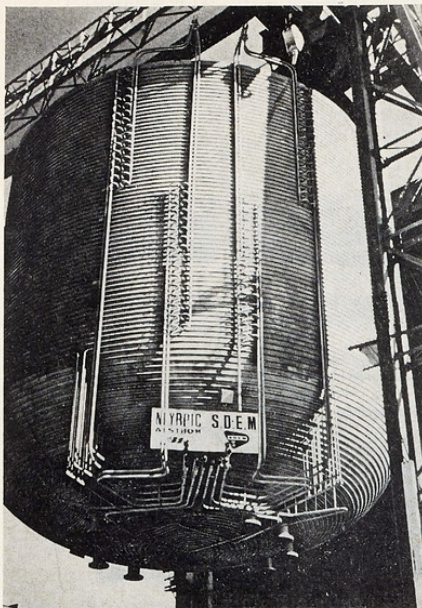


Fig. 21. — Phénix. Montage de la cuve de l'enceinte primaire

— pendant le 1^{er} semestre 1972, les autres composants sont installés : bouchon tournant, pompes, échangeurs intermédiaires, manutention. Le montage du groupe turboalternateur est achevé à l'automne 1972.

Afin de minimiser les risques inhérents au caractère prototype de l'installation tout en tirant le maximum d'enseignements et en faisant apparaître aussitôt que possible les modifications nécessaires, les essais de la centrale ont été préparés dès 1970. Ils ont été conçus aussi complets et exhaustifs que possible, visant à éprouver méthodiquement toutes les parties de l'installation, en quatre phases successives :

— essais avant mise en sodium des circuits principaux terminés en 1972 ;

— essais en sodium avant chargement du combustible qui ont débuté par la mise en sodium du réacteur et des circuits secondaires achevée le 10 jan-

vier 1973. Au cours de cette étape capitale, l'ensemble des circuits de la centrale fonctionne dans des conditions aussi voisines que possible du régime nominal (débits nominaux, température jusqu'à 450 °C). En même temps, le groupe turboalternateur mis en virage en novembre 1972 est essayé en février 1973 sur vapeur auxiliaire ;

— chargement des assemblages combustibles et essais neutroniques avec divergence, avant montée en puissance. La divergence a eu lieu le 31-8-1973 ;

— premier couplage en réseau le 13-12-1973 et montée progressive en puissance, la puissance nominale de 250 MWe était atteinte le 12-3-1974 ;

— le 1-12-74, la centrale *Phénix* avait fourni 633 millions de kWh électrique au réseau depuis sa mise en exploitation industrielle ; ceci représente un facteur de charge voisin de 80 % dans les tous premiers mois de la vie de la centrale, ce qui est tout à fait remarquable.

On peut d'ores et déjà faire un premier bilan des enseignements tirés de la construction et des premiers mois d'exploitation de *Phénix*.

a) Sur le plan de la conception et des études de projet, *Phénix* a permis d'évaluer puis de maîtriser des problèmes propres à la nature intégrée du bloc réacteur (hydraulique, répartition de gradients thermiques et contraintes associées, ainsi que le fonctionnement d'ensemble de la centrale).

b) Sur le plan construction proprement dite, les avantages inhérents à ce type de réacteur ont été confirmés :

— génie civil ne présentant pas de difficultés particulières ;

— absence de pression élevée dans les circuits, rendant possible la réalisation sur le site des composants de très grandes dimensions mais de faible épaisseur, tels que les cuves ; corrélativement, il n'y a pas de composant à délai de fabrication tel qu'il impose une durée totale

de réalisation supérieure à celle résultant traditionnellement des composants classiques tels le turboalternateur. On peut même espérer encore quelques gains sur ce point, par rapport aux délais de *Phénix* qui intègrent bien évidemment les aléas inhérents au premier grand réacteur.

c) En ce qui concerne la maintenance, les essais en sodium ont déjà permis de définir pratiquement comment intervenir sur les composants pour leur entretien et leur dépannage, et les équipes d'exploitation sont à même de maîtriser les problèmes particuliers des interventions en sodium actif notamment.

d) En ce qui concerne le fonctionnement en sodium des composants importants, l'économie de la politique d'essais hors pile préliminaires est apparue nettement : les appareils de commande du réacteur et de manutention du combustible ont fonctionné sans difficulté notable dès le premier jour.

e) Les prévisions des physiciens et des neutroniciens du projet se sont avérées excellentes :

- la masse critique expérimentale était à l'intérieur de la fourchette calculée ;
- les taux de réaction, les coefficients de température et de puissance, le comportement thermique du cœur sont très proches de la prévision.

Les figures 22 et 23 illustrent par deux exemples ces heureux résultats.

Avant de quitter *Phénix*, je voudrais mentionner une petite histoire : le week-end du 2 mars 1974 fut particulièrement pénible pour les départements du Gard et de l'Ardèche, la tempête avait conduit à réduire l'interconnexion des centrales de la région et l'histoire raconte que *Phénix*, alors en période d'essais de montée en puissance, a sou-

tenu vaillamment le réseau local en restant imperturbable à la puissance de 145 MWe malgré les à-coups auxquels le soumettait un réseau agité.

On peut espérer que cette stabilité dans l'adolescence augure bien d'une longue et heureuse vie.

III.3. Le prototype de la filière, Super-Phénix.

L'objectif recherché avec la centrale *Super-Phénix* est qu'elle soit le prototype des centrales à réacteurs rapides parvenues au stade industriel.

Il s'agit donc de réaliser un outil capable de produire de l'électricité dans des conditions qui puissent dans des délais raisonnables présenter des avantages décisifs par rapport aux centrales équipées de réacteur de types dits

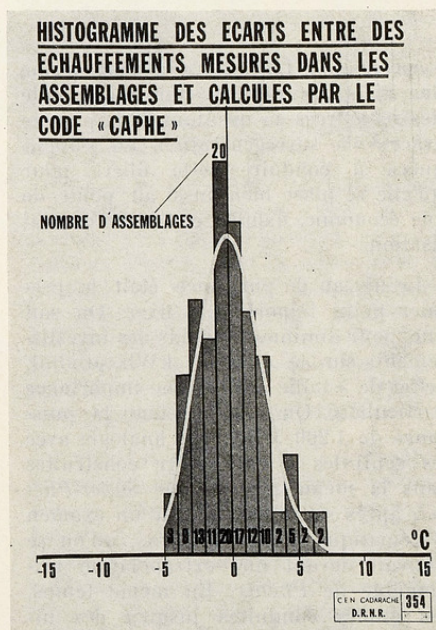


FIG. 22. — Résultats du démarrage de *Phénix*. Comparaison expérience-calcul sur l'échauffement moyen dans chaque assemblage combustible

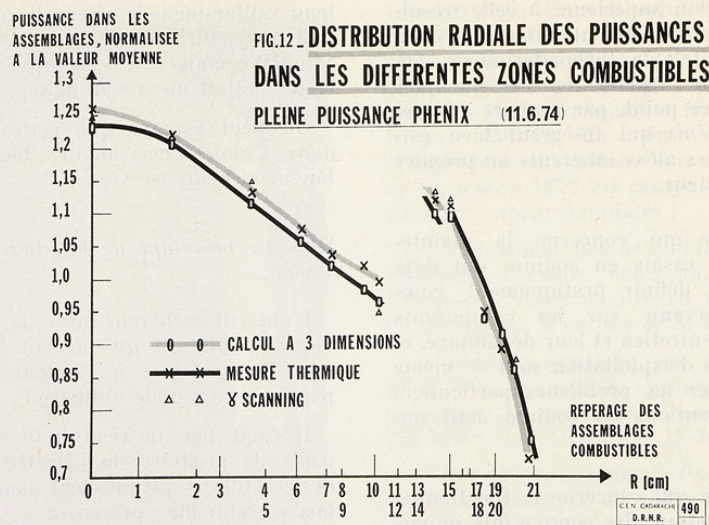


FIG. 23. — Essais de démarrage de Phénix. Comparaison expérience-calcul sur la distribution de puissance

« éprouvés ». L'avantage à long terme des réacteurs rapides étant l'économie des ressources en uranium de la planète grâce à la surrégénération, on s'appliquera à conduire cette filière pour qu'elle se place bien aussi au point de vue économie, fiabilité et facilité de réalisation.

Le niveau de puissance était le premier point important à fixer. On sait que, pour diminuer le poids des investissements sur le coût du kWh produit, l'effet de « taille » revêt une importance particulière. On a donc retenu la puissance de 1 200 MWe, par analogie avec les centrales à eau légère construites dans la même période que *Super-Phénix*, après s'être assuré, par un examen systématique des composants, qu'on se trouvait devant une extrapolation raisonnable de *Phénix*. En même temps, des études conduites jusqu'à des niveaux de puissance supérieurs à 1 200 MWe ont montré que les choix faits pour *Super-Phénix* sont valables pour l'avenir.

C'est donc dans la continuité avec *Phénix* qu'est étudiée *Super-Phénix*, en mettant à profit les connaissances acquises pendant la conception et la construction de la centrale de démonstration, connaissance que vient compléter peu à peu l'expérience de son exploitation.

Les grandes options ont été conservées : circuit primaire intégré, maintenance du combustible à l'arrêt ; et la conception de la plupart des grands composants est très proche de ceux de *Phénix*.

L'organisation générale de la centrale peut être résumée de la façon suivante : 1 cœur, 4 pompes primaires, 4 circuits secondaires, 1 point commun vapeur et 2 turbogénérateurs.

On désire avoir une symétrie des boucles secondaires par rapport au réacteur, de façon à n'étudier qu'une boucle et à normaliser les fabrications autant que possible. Comme dans les cas des centrales à eau légère, ce sont 4 boucles se-

condaires qui se logent le mieux autour du réacteur. Les dimensions des boucles sont une extrapolation raisonnable de celles de *Phénix*. Chacune de ces boucles comporte un générateur de vapeur et 2 échangeurs intermédiaires. Pour une puissance de 1 200 MWe, ce choix conduit à une cuve principale de diamètre minimal et aussi à une extrapolation raisonnable de l'échangeur par rapport à celui de *Phénix*.

Quand on a choisi 4 boucles secondaires, ce sont 4 pompes primaires qui se logent le mieux dans le bloc du réacteur. Les dimensions de la pompe sont alors proches de celles d'un des 8 échangeurs. Mais l'augmentation du débit de sodium primaire liée au désir d'avoir à la fois une température de vapeur assez élevée conduit à un débit par pompe relativement important. Cependant, cette difficulté n'est pas apparue assez grave pour en venir à une solution à 6 pompes et 8 échangeurs qui, par ailleurs, diminuerait la symétrie dans le bloc réacteur.

On a choisi 2 turbogénérateurs de 600 MWe ; ce système a l'avantage d'utiliser des machines plus proches de celles des paliers éprouvés. Mais elle augmente l'investissement et elle complique le fonctionnement de la centrale.

Le dessin du cœur du réacteur de 1 200 MWe est peu différent de celui de *Phénix* : l'élément combustible est formé de pastilles d'oxyde mixte UO_2PuO_2 en gaine étanche et les éléments sont toujours groupés sous forme d'assemblages hexagonaux.

L'instrumentation du cœur comprendra deux thermocouples par assemblages et l'on prévoit des canaux pour installer les détecteurs d'ébullition et le système de localisation de ruptures de gaines. Le bloc réacteur est dessiné dans la lignée de *Phénix*, en corrigeant, autant que faire se peut, les difficultés rencontrées pour ce dernier réacteur. C'est ainsi que le toit est supprimé et que la face intérieure de la dalle, protégée par un calorifuge, est en contact avec l'atmosphère d'argon. C'est ainsi,

aussi, qu'un effort important a été fait pour résoudre les problèmes de thermohydraulique, ainsi que les problèmes liés à la forme de la cuve primaire et à l'alimentation des échangeurs intermédiaires, problèmes qui furent des soucis pour les équipes qui ont travaillé sur *Phénix*. Une seule cuve de sécurité joue à la fois les rôles de la double enveloppe et de l'enceinte primaire de *Phénix*, rendant de la sorte meilleurs la surveillance et le contrôle.

Mis à part ces points, le dessin du bloc-réacteur (fig. 24) s'inspire directement de celui de *Phénix* : cuves pendues fermées par une dalle, sommier reposant sur un platelage, circuits d'ultime secours placés entre cuve de sécurité et béton, utilisation d'acier 316, etc...

A l'exception des générateurs de vapeur sur lesquels on reviendra plus loin, les circuits secondaires, dans leur principe, ne présentent que des différences mineures par rapport à ceux de *Phénix*. L'utilisation de gros modules de générateurs de vapeur à niveau libre en simplifie le tracé. On doit noter, cependant, le diamètre important des tuyauteries principales.

Le prix de l'ensemble des générateurs de vapeur est d'autant plus petit que les modules sont plus importants. Les modules de *Phénix*, dont la faible taille se justifiait au début du développement des générateurs de vapeur chauffés au sodium, sont nettement trop petits pour un réacteur de puissance. Puisqu'il fallait faire le saut, on a choisi délibérément des modules de 750 MWth.

Le dessin des modules est fonction essentiellement des techniques particulières à chacun des deux « échangistes ». Babcock-Atlantique propose d'utiliser des échangeurs à tubes en serpentins qui sont préconisés par les entreprises Babcock en France et à l'étranger et qui permettent de loger des tubes d'assez grande longueur dans un petit volume. Ces tubes seraient en incolloy. Comme ils sont assez long, on peut faire à la

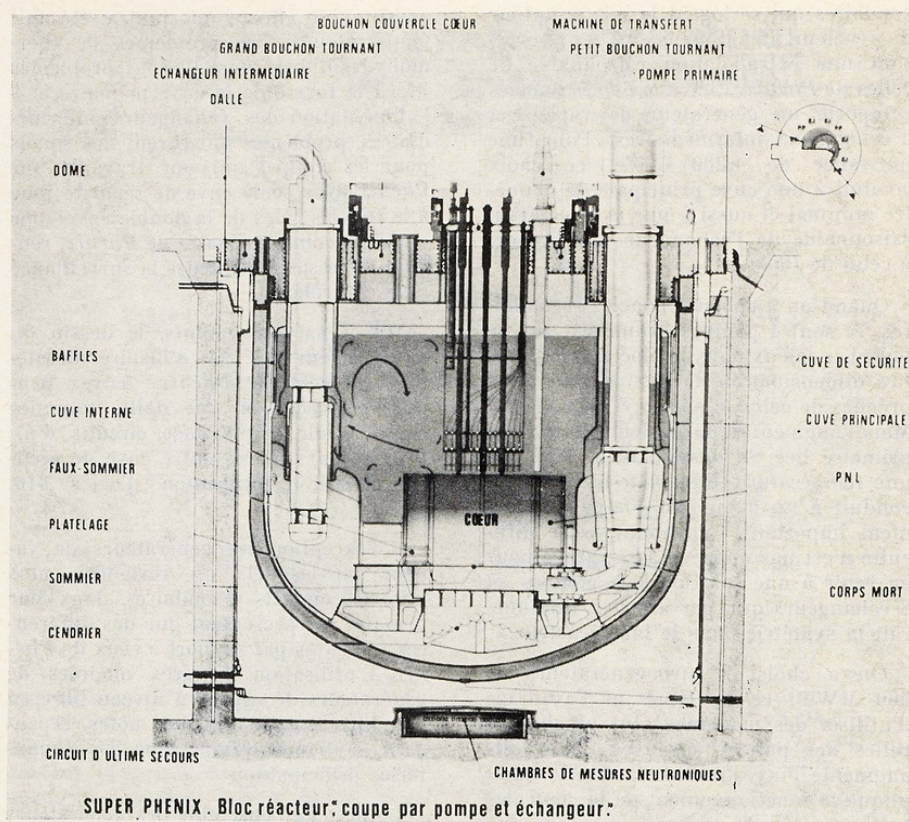


Fig. 24. — Super-Phénix 1 200 MW. Coupe du bloc réacteur

fois l'évaporation et la surchauffe dans un seul module (fig. 25). Stein-industrie a eu recours à un dessin inspiré de celui des échangeurs intermédiaires qu'il connaît bien ; des tubes droits munis de lyres à leur partie supérieure, placés verticalement dans une virole. Les tubes étant de longueur relativement faible ont un petit diamètre et il est avantageux de séparer évaporateur et surchauffeur dans deux appareils différents comme dans *Phénix*. On peut aussi reconduire les matériaux de *Phénix* (fig. 26). Il existe donc un point milieu entre évaporateur et surchauffeur dans la proposition de Stein-industrie, qui n'existe pas dans la proposition de

Babcock-Atlantique. Les procédures de démarrage seront probablement assez différentes suivant le choix fait pour les générateurs de vapeur. On a abandonné la resurchauffe de vapeur par le sodium au profit d'un système utilisant la vapeur prélevée au cours de la détente ; ce choix a été motivé par une optimisation de la fiabilité d'ensemble.

Les circuits auxiliaires sodium et argon nécessaires pour les circuits de sodium principaux sont directement inspirés de ceux de *Phénix*, avec deux exceptions importantes : la purification du sodium primaire est intégrée dans le bloc réacteur pour éviter la prolifération des cellules nécessitées par la mainte-

nance de ce circuit particulièrement actif.

D'autre part, le souci de l'environnement conduit à imposer des règles strictes pour les effluents et spécialement pour les effluents gazeux : on se donne comme objectif d'avoir un relâchement de gaz de fission le plus petit possible sur le site du réacteur. Si l'on compare les réacteurs rapides aux réacteurs à eau, cet objectif est beaucoup plus facile à remplir pour plusieurs raisons : les gaz actifs sont toujours localisés dans le gaz de couverture et l'existence d'un circuit secondaire permet d'avoir une vapeur propre que l'on peut traiter comme dans une centrale à combustible fossile ; le gaz de couverture n'est pas sous pression ; enfin la séparation du gaz de couverture et des gaz de fission ne présente pas de difficultés majeures. Cependant, il faut pousser encore le

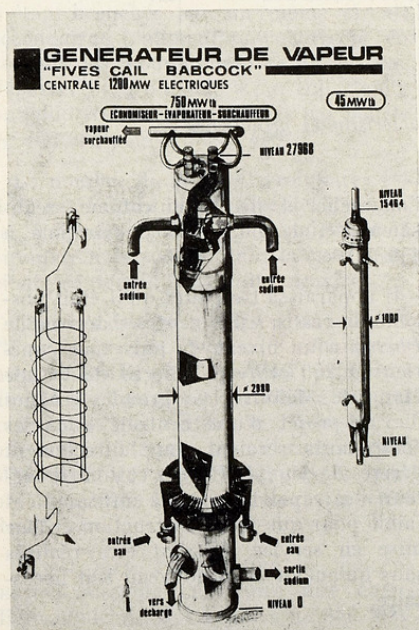


FIG. 25. — Super-Phénix 1 200 MW. Un concept de générateur de vapeur à tubes en hélice

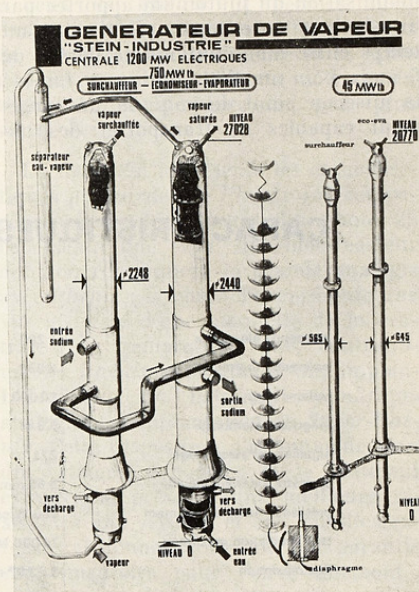


FIG. 26. — Super-Phénix 1 200 MW. Un concept de générateur de vapeur à tubes droits

développement des techniques de séparation.

La chaîne de manutention d'assemblages, est inspirée au maximum de *Phénix*. C'est ainsi qu'on a reconduit les pots de manutention, le principe du déchargement par rampe inclinée à travers un sas, le poste de conditionnement des conteneurs de transport, etc...

Cependant, deux points sont à noter : on ne propose pas un bras pour le transfert des assemblages dans le réacteur. Ce changement est la conséquence des connaissances nouvelles acquises sur le gonflement des structures en acier placées dans le cœur. Ceci pourra être réalisé avec 2 bouchons tournants et une machine de transfert verticale.

D'autre part, on a choisi de stocker les assemblages irradiés à l'extérieur du réacteur pour éviter la trop longue im-

mobilisation du plutonium apportée par un stockage interne au réacteur et un temps entre manutentions de l'ordre de 6 mois à un an. Cette option a imposé la mise au point de pots de déchargement capables de transporter des as-

semblages ayant encore une puissance résiduelle élevée (de l'ordre de 30 kw).

La figure 27 rassemble les caractéristiques thermodynamiques principales de *Super-Phénix*.

CARACTÉRISTIQUES SUPER-PHÉNIX

puissance électrique	1 200	température sodium entrée / sortie cœur	395/545 °C
puissance thermique	2 990	échangeur intermédiaire entrée / sortie secondaire	345/525 °C
volume cœur	10 000 l	pompes primaires	4
longueur assemblage	5,5 m	échangeurs intermédiaires	8
aiguilles par assemblage	271	boucles secondaires	4
diamètre extérieur aiguille	8,65 mm	débit primaire kg/s	15 700
puissance linéaire maximum	450 W/cm	débit secondaire kg/s	12 000
taux irradiation maximum	70 000 MWj/t	température vapeur	490 °C
flux maximum	$6,2 \cdot 10^{18}$ n/cm ² s	température entrée H ₂ O	235 °C
gain de régénération	0,24	pression vapeurs (bars)	184
barres de commande à fonctions mixtes	21		
système d'arrêt complémentaire	3		
température de gaine nominale (maximale)	620/700 °C		

FIG. 27. — *Super-Phénix. Caractéristiques principales*

Les études préliminaires de cette centrale ont été faites par le Département des Réacteurs à Neutrons Rapides et le Département de Développement des Éléments Combustibles du C.E.A. à Cadarache de début 1971 à mars 1972. Le projet est en cours d'achèvement par les soins de Technicatome (filiale à 90 % du C.E.A. et à 10 % d'E.D.F.) qui s'est associé la société G.A.A.A. La remise de l'offre au client devrait intervenir courant 1975 pour un démarrage en 1980-81.

III.4. Un *Phénix* agrandi : *Phénix 450*.

Pendant que *Phénix* faisait ses premiers pas et en parallèle de l'étude de *Super-Phénix*, les équipes du C.E.A. à

Cadarache et de Technicatome réalisaient l'étude d'un *Phénix* extrapolé à 450 MWe.

Il apparaissait en effet qu'il était possible de réaliser une centrale dérivée de *Phénix* à un niveau de puissance supérieur à 250 MWe. L'objectif de l'étude était de définir les grandes lignes d'avant-projet d'une centrale dont les composants seraient tous directement dérivés de ceux de *Phénix* et dont le facteur d'extrapolation serait suffisamment faible pour que leur construction et leur mise en service puissent être réalisés sans qu'aucun essai nouveau soit nécessaire.

Il importait donc de choisir le nombre et la dimension des pompes, échangeurs, générateurs de vapeur avec ces

objectifs. Il convenait aussi de permettre au combustible d'atteindre les taux de combustion maximum possibles s'appuyant sur les connaissances de 1973.

On décidait, par conséquent, de conserver exactement l'assemblage combustible de *Phénix*, et, de même, d'utiliser le même module de générateur de vapeur que celui qui avait été développé pour *Phénix*.

Le taux de combustion de 70 000 MWj/t était visé au lieu de 50 000 MWj/t pour *Phénix* en diminuant les températures des gaines du combustible.

Sur ces bases, on recherchait à assembler les composants pour atteindre la plus forte puissance possible sans trop augmenter les dimensions du bloc-réacteur, ce qui aurait nécessité une reprise des études et essais de thermohydraulique. Les modules de générateurs de vapeur de *Phénix* sont regroupés par ensemble de 6 alimentés par le même collecteur de vapeur, 2 groupes de 6 étant branchés sur un même circuit secondaire. L'alimentation correcte en sodium des modules impose de ne pas dépasser un groupe de 9 par collecteur ; on adoptera donc 18 modules par boucle secondaire pour *Phénix 450*.

Le nombre de boucles secondaires est de 3 sur *Phénix* mais on peut l'augmenter à 4 sans modifier anormalement la circulation de sodium dans la cuve principale contenant le circuit primaire.

On aura donc 4 boucles secondaires et 72 modules type *Phénix* ; 8 échangeurs intermédiaires et 4 pompes primaires dont les dimensions seront légèrement extrapolées de celles de *Phénix*. La puissance obtenue est d'environ 450 MWe avec des caractéristiques de température légèrement inférieures à celles de *Phénix*.

Il est bien évident que ce concept permet aussi de construire une chaudière nucléaire à 4 boucles de 350 MW avec 48 modules de générateur de vapeur, des composants et un cycle de température rigoureusement identiques

à ceux de *Phénix*. Il permet aussi d'aboutir à une chaudière d'un peu plus de 500 MW avec le nombre et la taille des composants de *Phénix 450* et un régime de température un peu plus élevé.

La figure 28 représente les caractéristiques principales de *Phénix 450* comparées à celles de *Phénix*. La photo 29 représente une vue du bloc-réacteur dont on remarquera la grande analogie avec *Phénix* ; la photo 30 représente une vue générale d'une maquette de la centrale : on remarquera que, contrairement à *Phénix*, on a adopté une implantation dans un bâtiment cylindrique analogue à l'implantation de *Super-Phénix*. Cette disposition s'accommode bien du système à 4 boucles et le bâtiment cylindrique présente une meilleure résistance aux séismes et aux missiles externes et donne, de ce fait, une garantie supplémentaire pour l'environnement.

COMPARAISONS

CARACTÉRISTIQUES	PHÉNIX 250	PHÉNIX 450
puissance électrique	250	450
puissance thermique	563	1 048
volume cœur	1227 l	2 135 l
puissance linéaire maximum	430 W/cm	430 W/cm
taux irradiation maximum	50 000 MWj/t	70 000 MWj/t
flux maximum	$7,2 \cdot 10^{16}$ n/cm ² s	$7,3 \cdot 10^{16}$ n/cm ² s
gain de régénération	0,12	0,15
barres de commande à fonctions mixtes	6	9
système d'arrêt complémentaire	0	3
température de gaine nominale (maximale)	650/700 °C	630/700 °C
température sodium entrée / sortie cœur	400/560 °C	390/540 °C
échangeur intermédiaire entrée / sortie secondaire	350/550 °C	350/530 °C
pompes primaires	3	4
échangeurs intermédiaires	6	8
boucles secondaires	3	4
débit primaire kg/s	2 760	6 300
débit secondaire kg/s	2 210	4 600
température vapeur	510 °C	495 °C
température entrée H ₂ O	246 °C	246 °C
pression vapeurs (bars)	168	180

FIG. 28. — Caractéristiques comparées de *Phénix 250* et *Phénix 450*

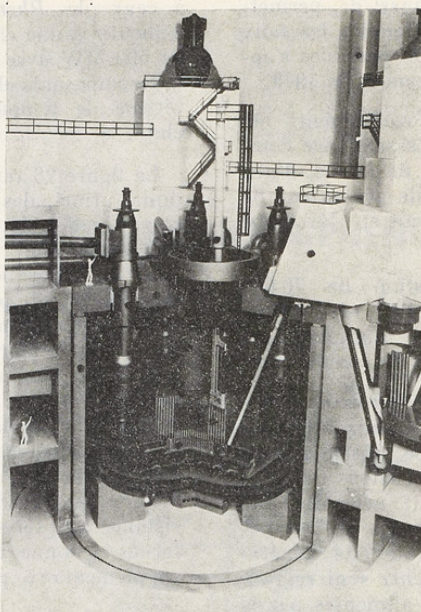


FIG. 29. — Phénix 450. Maquette du bloc réacteur

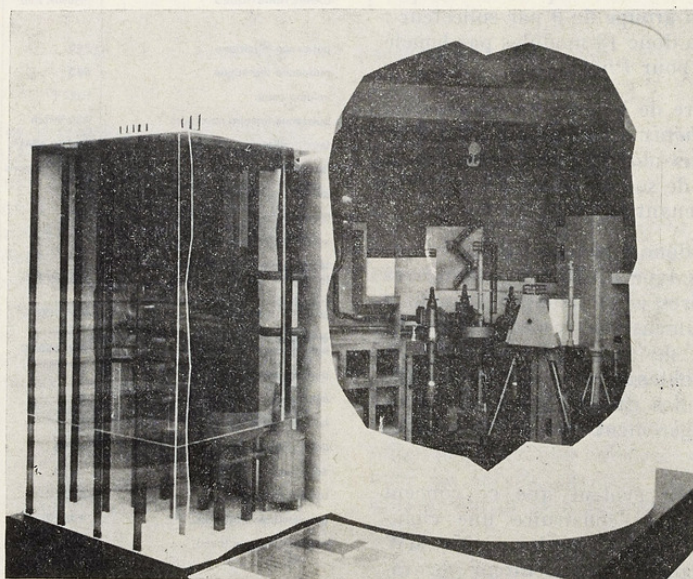


FIG. 30. — Phénix 450. Maquette du bâtiment réacteur et d'un bâtiment de générateur de vapeur

Le projet *Phénix 450* présente de l'intérêt pour un client désireux d'acquérir un réacteur rapide refroidi au sodium sans engager les frais très importants de recherche et d'essais nécessités par le premier réacteur de cette filière. Le surcroît d'investissement à engager pour cette centrale non optimisée est largement compensée par la garantie de bon fonctionnement donnée par *Phénix* dont il est immédiatement dérivé.

Technicatome et les fabricants français de la chaudière nucléaire et de ses composants sont aptes à réaliser cette centrale en s'appuyant sur le savoir-faire et les connaissances technologiques qu'ils ont mis au point et développés pour construire *Phénix*.

IV. — LE PROGRAMME DE RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT

La filière française des réacteurs à neutrons rapides est née entre 1954 et 1956 à Saclay et Fontenay-aux-Roses par des recherches de base en physique, en neutronique et en technologie.

Dès 1960, on construit à Cadarache le premier grand hall d'essai de technologie de sodium ; il était suivi jusqu'en 1967 par la construction de halls de recherche et d'essais pour l'étude et la fabrication du combustible, l'hydraulique du cœur, la chimie du sodium, les études de sûreté et par la mise en place de l'arsenal des expériences critiques et réacteurs *Harmonie*, *Masurca*, *Rapsodie* (fig. 31).

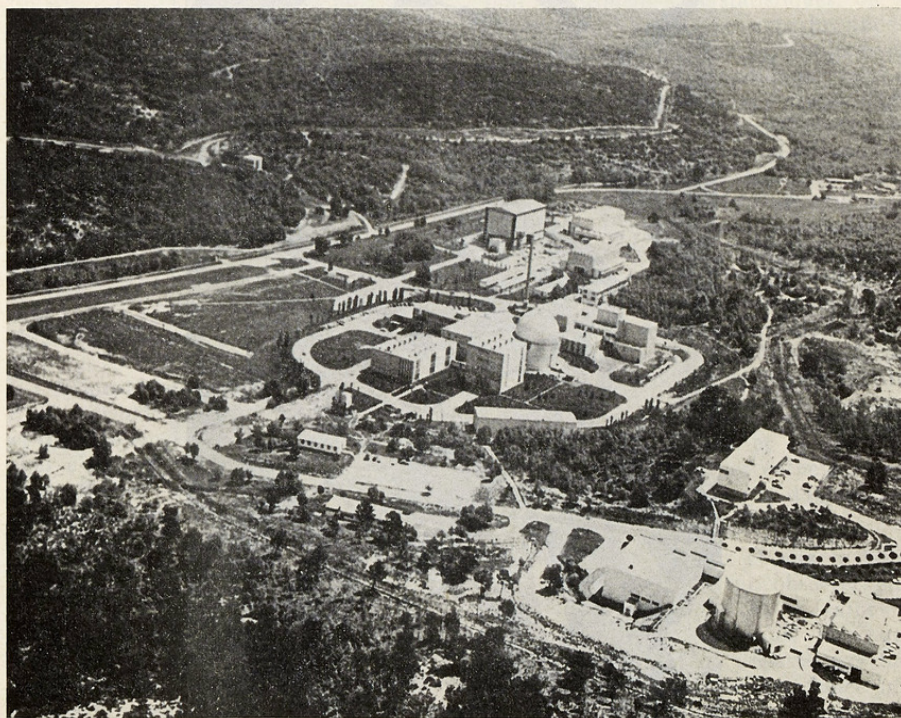


FIG. 31. — Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache. La zone neutrons rapides (on reconnaît le dôme de Rapsodie, au fond les halls d'essai et à droite l'expérience critique Masurca)

En 1964, démarrait l'installation d'essai de 5 MW pour générateur de vapeur du C.E.A. à Grand-Quevilly, 1970 voyait la mise en service de l'installation de 50 MW pour générateur de vapeur d'E.D.F. aux Renardières.

Aujourd'hui, un millier d'ingénieurs et de techniciens travaillent au C.E.A. pour la recherche et le développement attachés à la filière des réacteurs à neutrons rapides.

C'est sur cet ensemble important de moyens que s'est appuyé le développement de la filière de réacteur à neutrons rapides en France.

Voyons rapidement les divers domaines de la recherche et développement

pour apprécier les connaissances acquises et donner quelques indications sur les efforts à poursuivre :

IV.1. La physique et le projet du cœur.

Les physiciens et expérimentateurs entourant les expériences critiques (fig. 32), les neutroniciens, thermiciens et dynamiciens de projet ont bâti tout un ensemble de méthodes de calcul et de catalogues de données de base permettant de prévoir le comportement en régime normal et incidentel d'un cœur de réacteur rapide. Comme on l'a déjà dit, ce travail aboutit à l'obtention sur *Phénix* des caractéristiques prévues. Il reste maintenant à augmenter la

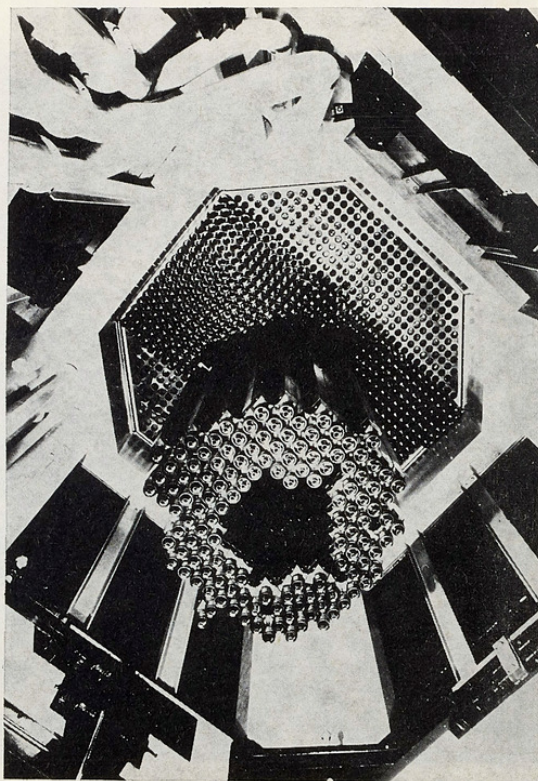


FIG. 32. — Le cœur de l'expérience critique Masurca

connaissance pour parvenir aux mêmes résultats pour les cœurs des grands réacteurs de la filière ; on recherchera aussi les améliorations à apporter à la conception du cœur pour en augmenter les performances et rendre maximales les capacités surrégénératrices des réacteurs à neutrons rapides. Ce travail s'appuie sur les résultats des expériences critiques mais aussi sur l'analyse permanente du comportement des réacteurs *Rapsodie* et *Phénix*.

Le projet du cœur s'appuie aussi sur un important programme de recherche et développement visant à définir les assemblages de combustible fissile, les assemblages de couverture fertile et les assemblages de commandes les plus performants possibles. Outre les études de neutronique, thermique et dynamique dont il vient d'être question, il convient de poursuivre les études théoriques et expérimentales hors pile et en pile pour améliorer la connaissance du comportement mécanique sous irradiation de plusieurs centaines d'assemblages hexagonaux posés côte à côte sur un sommier et inter-agissant les uns avec les autres. Cette recherche demande à accumuler les résultats d'irradiation de matériaux et à développer des méthodes de calcul mécanique multi-dimensionnelles complexes.

IV.2. Combustible.

L'élément combustible a fait l'objet d'un ensemble impressionnant d'études et d'essais. En 1962, a été prise la décision d'adopter pour le combustible de *Rapsodie* l'oxyde mixte UO_2PuO_2 , alors que, pratiquement, tous les réacteurs précédemment construits dans le monde utilisaient un combustible métallique à uranium enrichi.

Ce choix a été décisif et a permis d'accumuler depuis dix ans une expérience sans équivalent sur le combustible oxyde, adopté maintenant dans toutes les centrales à neutrons rapides en construction ou en projet.

On a d'abord mis progressivement au point les techniques de fabrication, à la lumière des irradiations en piles thermiques et des examens en laboratoire de nombreux échantillons. Ensuite, la fabrication et l'utilisation dans *Rapsodie* de plus de 14 000 aiguilles combustibles, à des taux d'irradiation allant jusqu'à 70 000 MWj/t, pour des aiguilles standard et jusqu'à 160 000 MWj/t pour des aiguilles expérimentales (fig. 13) ont apporté une somme d'informations que la France est seule à posséder sous cette forme. Elles reposent, d'une part, sur les observations globales du cœur pendant le fonctionnement du réacteur, et, d'autre part, sur les examens pratiqués sur les assemblages extraits du réacteur, dans les laboratoires d'examen actifs de Cadarache et de Fontenay-aux-Roses.

Outre ces observations portant sur un très grand nombre d'aiguilles et permettant des conclusions statistiques, on a examiné des aiguilles expérimentales ayant des spécifications particulières et irradiées dans des conditions variées dans *Rapsodie*. Grâce à ce faisceau d'informations, on sait comment se comportent l'intérieur des gaines des aiguilles, les pastilles d'oxyde mixte et l'on a une idée assez précise de la restructuration de cet oxyde et de l'évolution du transfert thermique entre pastilles et gaines au cours de l'irradiation. On sait quels soins il faut apporter à la fabrication des gaines et des aiguilles, et l'on dispose de moyens de contrôle permettant d'obtenir des produits de grande qualité.

On dispose enfin d'un arsenal très complet de surveillance et de détection permettant de suivre les événements se produisant dans le cœur et d'intervenir, le cas échéant, en temps voulu.

Grâce à ces moyens et aux installations d'examen, on a pu observer plusieurs types de ruptures de gaine et reconstituer leur processus, bien que leur nombre total ne dépasse pas une dizaine. C'est donc avec confiance que l'on aborde le stade de l'irradiation du cœur de *Phénix* qui contient plus de 20 000 aiguilles combustibles.

Cependant, *Rapsodie* restera longtemps encore une des sources d'informations sur le combustible des réacteurs rapides, car si *Phénix* est plus représentatif des conditions de fonctionnement des réacteurs de grande puissance, *Rapsodie* présente plus de flexibilité pour s'adapter aux exigences des expérimentateurs.

Le comportement des éléments combustibles au-delà d'un certain taux de combustion et d'une certaine fluence est encore mal connu car l'expérience statistique reste insuffisante aujourd'hui pour pousser le taux de combustion jusqu'aux 100 à 120 000 MWj/t qui assureraient la compétitivité de la filière. Pour cela, il faudra maîtriser les problèmes de gonflement de la gaine et de réaction entre gaine et oxyde. Les gaines en acier inoxydable sont soumises à un bombardement intense de neutrons, chaque atome de la gaine est déplacé de nombreuses fois. Il s'ensuit des dommages qui se traduisent macroscopiquement par un gonflement de l'acier dont l'explication demandera encore de nombreuses expériences.

D'autre part, les gaines peuvent être corrodées intérieurement par les produits de fission provenant du combustible ; ce phénomène, que l'on appelle « réaction oxyde-gaine » demande à être bien compris pour que les responsables du dessin de l'élément combustible puissent prévoir les parades à ces phénomènes. On sait déjà que ces phénomènes qui surviennent à fort taux de combustion sont sensibles à l'augmentation de température ; c'est une des raisons qui a conduit à diminuer quelque peu la température de sortie de sodium pour *Super-Phénix*.

On prévoit encore de nombreuses années d'expériences sur *Rapsodie* et *Phénix* pour aboutir au combustible oxyde à fort taux de combustion nécessaire pour la filière.

Parallèlement, un programme de recherche sur le combustible carbure est engagé car il peut être envisagé comme

relai de l'oxyde dans une phase ultérieure du développement de la filière.

IV.3. Technologie du sodium.

Depuis les essais à petite échelle effectués de 1955 à 1960, jusqu'aux essais de fonctionnement des circuits de *Phénix*, en passant par la construction et l'exploitation de circuits expérimentaux et de *Rapsodie*, la technologie du sodium a fait de tels progrès que ce métal est devenu un fluide industriel. Les équipes du C.E.A., d'E.D.F. et des constructeurs ont appris à la manipuler en grandes quantités.

L'étude du comportement de matériaux en présence de sodium a fourni une somme considérable de résultats qui continue à s'accroître de jour en jour. On connaît maintenant les matériaux qui conviennent aux diverses utilisations, notamment dans le cas de mécanismes plongés dans le sodium ou exposés aux vapeurs de sodium.

Cette connaissance a nécessité de nombreuses études appuyées sur des expériences avec des installations d'essais en sodium de petites dimensions (fig. 33).

On a rassemblé les connaissances des chimistes et physico-chimistes, des métallurgistes et des mécaniciens pour mettre au point les mécanismes élémentaires des matériels tels que système vis-écrou, soufflet d'étanchéité, paliers et axes ; pour déterminer les couples de matériaux de revêtement de pièces frotantes ; pour faire fonctionner des appareils tels que les vannes.

On connaît de mieux en mieux les phénomènes liés à l'apparition d'aérosols au-dessus des surfaces libres de sodium à haute température, notamment la formation de dépôts pouvant affecter le fonctionnement d'organes mobiles tels que les bouchons tournants, et on apprend à les maîtriser.

Le maintien de la pureté du sodium ne pose plus de problèmes. On sait prévenir ou supprimer les bouchages éven-

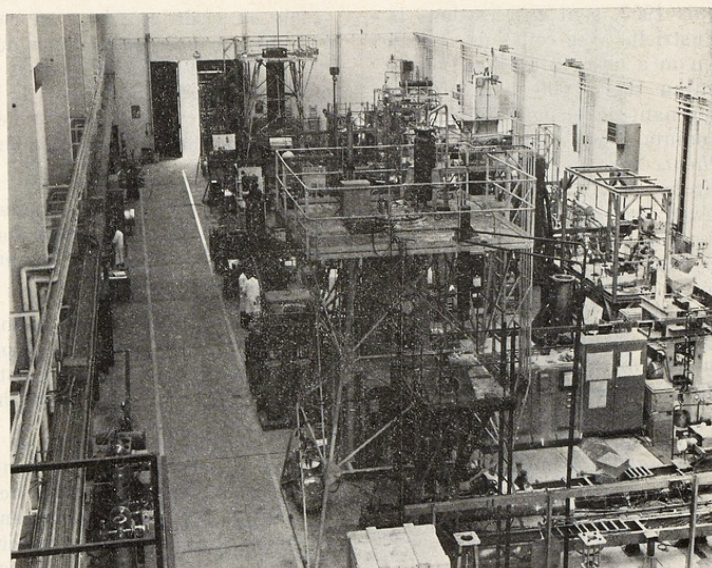


FIG. 33. — Le hall des essais de technologie du sodium à Cadarache

tuels dans les circuits, et on a fait de grands progrès dans les procédés d'extinction des feux de sodium consécutifs à une fuite accidentelle.

C'est l'occasion de noter que notre expérience du sodium nous a appris que son utilisation était préférable à celle de l'eutectique sodium-potassium. Le fait que cet alliage est liquide à la température ordinaire, qui paraissait être un avantage au départ, s'est révélé être un inconvénient puisque très réactif avec l'air, il interdit certaines interventions qui sont facilitées, au contraire, dans le cas du sodium, en laissant geler celui-ci en des points bien déterminés des tuyauteries.

On sait enfin faire de plus en plus de mesures en sodium : mesures de niveau, de pression, de débit, de vibrations. Même l'obstacle important que représente l'opacité du sodium est en train d'être tourné grâce à la mise au point de dispositifs à ultra-sons, qui permettent la « visualisation » d'objet immergés dans le sodium.

Il reste à approfondir et confirmer les connaissances de base, à améliorer et simplifier les systèmes d'analyse et les matériels de mesure. D'autre part, un important effort reste à faire pour diversifier les matériaux employés dans le sodium des circuits et dans les générateurs de vapeur. La tendance suivie est de rechercher des matériaux moins chers conduisant aux mêmes performances pour les températures actuelles et de démontrer que les matériaux austénitiques et ferritiques actuellement employés pourront fonctionner sans inconvénient à plus haute température.

IV.4. Composants.

Dans ce domaine, des progrès considérables ont été réalisés. La fabrication de cuves minces et de forme simple ne présente pas de difficultés : elle peut s'achever sur le site même de la centrale par assemblage d'éléments réalisés en usine.

Les pompes mécaniques à sodium, étu-

diées depuis 1957, sont entrées dans la phase industrielle avec celles de *Rapsodie*, puisqu'on a observé un fonctionnement continu de 57 000 heures sans panne provenant de la partie immergée dans le sodium. Pour passer aux pompes de *Phénix* (extrapolation d'un facteur 6 sur les débits) et à celles de *Super-Phénix* (extrapolation d'un facteur 30), on estime que les problèmes rencontrés sont essentiellement des problèmes liés à la fabrication de grandes pièces de fonderie et des problèmes d'hydraulique classique des grandes pompes, mais non pas de problèmes liés au sodium. Ceux qui concernent leur étanchéité par garniture mécanique entre l'argon de couverture et l'air ambiant relèvent de techniques classiques. La figure 34 donne très schématiquement les dimensions relatives des pompes de *Rapsodie*, *Phénix* et *Super-Phénix* ; on imagine que cet accroissement de dimensions pose un certain nombre de problèmes aux concepteurs et aux fabricants. La mise au point des pompes de *Rapsodie* s'est faite par des

essais en vraie grandeur en eau et en sodium ; la taille des pompes de *Phénix* et de *Super-Phénix* ne permet plus les essais en sodium à échelle 1, mais on effectue des essais en eau à l'échelle 1 et on les accompagne d'essais en sodium d'éléments de la pompe.

Les pompes de *Phénix* donnent toute satisfaction ; elles ont déjà fonctionné 10 000 heures sans difficultés provenant de la partie immergée.

Une grande attention est apportée à la fabrication et aux essais des pompes de *Super-Phénix* ; ce composant est en effet un des plus importants de la chaudière.

Les mécanismes de barre de contrôle et les appareils de manutention du combustible ont nécessité des soins attentifs à cause des conséquences graves d'un mauvais fonctionnement de ces appareils. C'est pourquoi on a adopté pour *Rapsodie* la même politique que pour les autres appareils, en réalisant des prototypes en vraie grandeur essayés en sodium dans les installations de Cadarache, dans des conditions de fonctionnement les plus représentatives possibles. Cette politique a porté ses fruits puisque le démarrage et la montée en puissance de *Rapsodie* se sont effectués très rapidement sans difficulté importante sur ces appareils. Depuis, nous avons profité de l'expérience de fonctionnement de *Rapsodie* pour simplifier les spécifications et le dessin des mécanismes ; d'autre part, on a encore suivi la même politique pour *Phénix* en essayant en sodium et en vraie grandeur des prototypes ou têtes de série de ces appareils (fig. 35). Nous estimons maintenant que cette démarche n'est plus nécessaire pour *Super-Phénix* et qu'il suffit de soumettre les appareils têtes de série à des essais de recette préalables à la mise en place dans le réacteur dans les installations prévues à cet effet dans le hall des grands essais de Cadarache.

Les échangeurs intermédiaires ont fait l'objet à l'origine de nombreux essais fondamentaux destinés à donner une bonne connaissance des coefficients

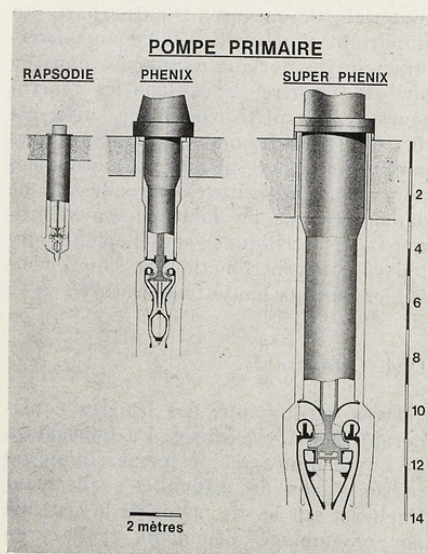


FIG. 34. — Evolution des tailles de pompes des réacteurs de Rapsodie à Super-Phénix

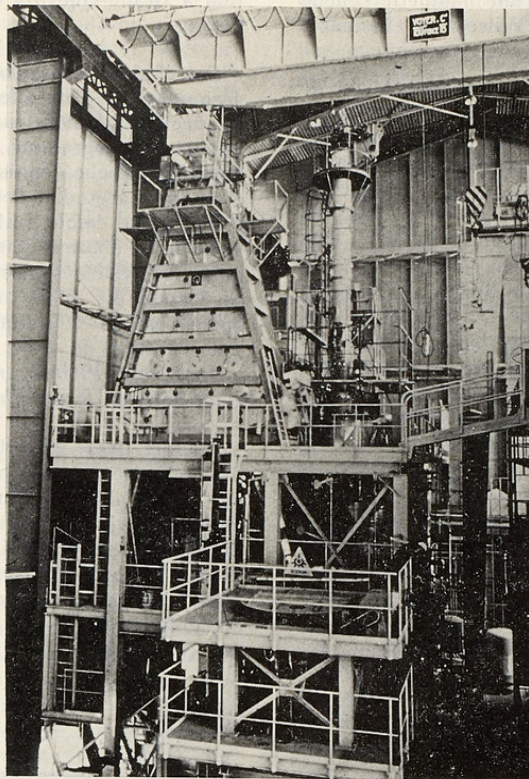


FIG. 35. — Le hall des grands essais en sodium à Cadarache (hauteur sous crochet du pont : 23 m). (Les appareils essayés ici sont les matériels de manutention du combustible de Phénix)

d'échange. Les échangeurs de *Rapsodie* qui ont été essayés en vraie grandeur sur un circuit de sodium de 10 MW, fonctionnent parfaitement. Pour *Phénix* et *Super-Phénix*, on a extrapolé progressivement en suivant le même concept et en affinant les connaissances sur la thermique et l'hydraulique de ces échangeurs par l'examen détaillé du fonctionnement en service et des essais partiels en similitude hydraulique.

Les générateurs de vapeur posent des problèmes de même nature, mais plus complexes et présentent une exigence capitale de fiabilité, du fait des risques

de réaction entre sodium et eau en cas de fuite. La première expérience française remonte à mai 1957 à Fontenay-aux-Roses. Un prototype essayé en juin 1964 à Grand-Quevilly atteignait déjà la puissance notable de 5 MW thermiques et ses caractéristiques de vapeur (125 bars, 545 °C) étaient proches de celles des centrales classiques. Mais l'utilisation d'une double paroi d'échange avec NaK intermédiaire grevait lourdement l'économie de ce type d'appareil. On peut citer également à la même époque l'essai, à Grand-Quevilly, d'une maquette conçue par le C.E.A. qui ne comportait aucune soudure entre sodium et eau, et

l'essai à Châton d'une maquette conçue par Babcock et Wilcox où la paroi d'échange était en compression.

La première réalisation industrielle de générateurs de vapeur chauffés au sodium est celle des générateurs de vapeur de *Phénix*. Mis au point à partir d'une maquette de 5 MW essayée à Grand-Quevilly (ce qui était possible grâce à leur conception modulaire), leur développement a été marqué par de nombreux essais à divers niveaux de puissance, notamment 8 000 heures sur le C.G.V.S. du centre E.D.F. des Renardières (50 MW) où on a pu essayer simultanément trois modules complets composés chacun d'un économiseur-évaporateur, d'un surchauffeur et d'un resurchauffeur.

Comme cela a déjà été dit plus haut, le passage de *Phénix* à *Super-Phénix* a conduit à modifier la conception des générateurs de vapeur et à développer en parallèle deux concepts d'appareils de grande taille. Des maquettes de ces appareils sont en cours d'expérimenta-

tion à Grand-Quevilly et aux Renardières.

Ces études de développement ont été accompagnées d'un effort important sur la sûreté des générateurs de vapeur. Un important programme d'essais est réalisé à Cadarache depuis 1965, consistant d'une part à étudier l'effet sur les matériaux d'une faible fuite d'eau dans le sodium et d'autre part à mettre au point les systèmes permettant de contenir les effets d'une réaction violente entre l'eau et le sodium consécutive à une rupture de tube. Ce programme, achevé pour *Phénix*, se poursuit aux conditions de *Super-Phénix* (fig. 36).

L'effort très important apporté au développement des composants se poursuit tout d'abord par la recherche d'une fiabilité toujours accrue des matériels développés, mais aussi par la mise au point de nouveaux systèmes ou appareils : pour n'en citer que quelques-uns on indiquera que le C.E.A. développe des calorifuges en sodium et en argon



FIG. 36. — Le hall des essais de réaction entre sodium et eau à Cadarache

chargé de vapeur de sodium, des systèmes de purification de sodium compacts pouvant être intégrés dans le réacteur, des systèmes permettant d'extraire et stocker les produits de fission dégagés dans l'argon de couverture du réacteur ainsi que des méthodes de nettoyage, de décontamination, de réparation à distance.

Un très long chemin a été fait depuis 20 ans, mais il reste encore beaucoup de pistes à explorer : elles sont peut-être moins nombreuses mais probablement plus difficiles.

V. — ENVIRONNEMENT ET SURETE

On doit d'abord définir ce qu'on entend par « sûreté » en matière d'énergie nucléaire. De même manière que dans d'autres secteurs industriels, il s'agit fondamentalement de définir la nature et l'importance des risques associés à l'exploitation de l'énergie nucléaire et de mettre en œuvre les dispositions propres à réduire ces risques à des valeurs extrêmement faibles, inférieures à celles couramment admises dans la vie de tous les jours tant pour l'installation nucléaire et les travailleurs eux-mêmes que pour l'environnement et le public.

La politique de sûreté adoptée en matière d'énergie nucléaire s'articule sur trois plans : conception d'ensemble et de détail, contrôles multiples et redondants, systèmes et moyens automatiques de prévention, de correction et d'intervention de secours. La sécurité maximale est obtenue par la mise en œuvre d'un principe fondamental, celui de la prévention. La détection du simple défaut déclenche les systèmes de sécurité qui interviennent avant même que l'accident ne puisse se produire.

Le caractère propre à l'énergie nucléaire réside dans la nature des risques principaux liés à la dissémination

éventuelle, accidentelle, de produits radioactifs dangereux qui doivent normalement rester confinés à l'intérieur des installations.

Pour la plupart, les produits radioactifs résultent des fissions provoquées au cours des réactions en chaîne qui sont à la base même de la production d'énergie et il n'y a pas, à l'origine, de différence notable sur ce plan entre les diverses techniques de réacteurs. De même, le confinement de ces produits dangereux est assuré de manière analogue quel que soit le type de réacteur, par l'interposition en série entre ces produits et l'extérieur de plusieurs « barrières » étanches et résistantes dont chacune suffit à s'opposer à toute dissémination à l'extérieur de l'installation.

Dans les réacteurs à neutrons rapides, comme dans les réacteurs à eau ordinaire, ces barrières sont au nombre de trois : la gaine du combustible fissile, l'ensemble des circuits contenant le fluide de refroidissement, l'enceinte de confinement qui englobe le réacteur et ses circuits. Dans le cas du réacteur rapide, type *Phénix*, une quatrième barrière est constituée par le bâtiment réacteur.

Sous l'angle de la sûreté, l'intégrité des barrières énumérées plus haut doit retenir surtout l'attention. En suivant une approche logique et rigoureuse, il faut :

- s'assurer que les matériaux ou dispositifs utilisés fonctionnent avec des marges de sécurité intrinsèques importantes ;

- mettre en place des systèmes de surveillance et des mécanismes d'action qui soient capables à tout instant de rétablir une situation normale si les marges de sécurité précédentes venaient à être entamées ;

- prendre en compte les possibilités d'accidents qui résulteraient d'événements anormaux ou inattendus, tels que défectuosité d'appareillage, erreur hu-

maine ou accident externe (tempêtes, inondations, séismes, etc...) et vérifier que des dispositifs de secours bien adaptés assurent dans tous les cas le confinement de produits dangereux.

La même approche doit être appliquée à tous les réacteurs nucléaires, qu'ils soient à eau ordinaire ou à neutrons rapides, et si l'analyse technique détaillée dépend effectivement des solutions technologiques adoptées dans chaque cas, les critères d'appréciation restent fondamentalement les mêmes.

V.1. *La prévention des accidents.*

Au niveau des marges de sécurité, les réacteurs à neutrons rapides ont des caractéristiques qui présentent des aspects très favorables (température de la gaine très inférieure à celle du point de fusion, fonctionnement à la pression atmosphérique, volume limité de l'enceinte de confinement primaire) et d'autres qui le sont moins (gainnes soumises à un flux intense de neutrons, dimensions réduites des canaux de refroidissement). Les spécifications du projet et les contrôles de fabrication en tiennent compte afin de garantir que les marges de sécurité restent toujours supérieures à un niveau déterminé de façon très prudente. En ce qui concerne la surveillance et les actions de sécurité, les mêmes critères sont adoptés quel que soit le réacteur : dispositifs de contrôle multiples et redondants qui déclenchent les systèmes de sécurité au moindre défaut, fiabilité élevée des matériels, entretien et essais périodiques, systèmes automatiques d'arrêt d'urgence multiples et indépendants, etc...

D'une manière générale, on peut affirmer que vis-à-vis de l'environnement en fonctionnement normal et de la prévention des accidents les réacteurs à neutrons rapides satisfont aux mêmes impératifs que les autres réacteurs nucléaires et font même l'objet d'exigences accrues du fait de leur caractère de nouveauté.

V.2. *Les risques d'accidents.*

Si l'objectif prioritaire des exploitants et des organismes de sûreté est de mettre en place les dispositions propres à éviter les accidents sur les installations — et l'expérience actuelle peut être considérée comme très positive à cet égard — il n'en reste pas moins nécessaire, comme il a été écrit plus haut d'envisager les possibilités d'accident (éventuel) et les dispositifs de secours appropriés. Dans ce domaine également, les réacteurs à neutrons rapides ne se présentent pas de façon fondamentalement différente des autres réacteurs, et il importe tout d'abord de réfuter deux arguments techniquement erronés qui ont été parfois avancés :

— le premier consiste à affirmer qu'une explosion nucléaire serait possible dans un réacteur à neutrons rapides parce qu'il contient une quantité de matière fissile (plutonium) très supérieure à celle qui serait nécessaire à une seule bombe atomique ;

— le deuxième soutient que les conséquences d'une dissémination éventuelle de produits radioactifs serait considérablement plus dangereuse que pour un autre réacteur en raison de la présence de ce plutonium et de sa nocivité élevée.

En ce qui concerne le premier point, il faut rappeler que dans un réacteur nucléaire quel qu'en soit le type, les conditions nécessaires pour obtenir une explosion nucléaire ne peuvent physiquement pas être réunies : matière fissile pure et non dispersée, et surtout disposition d'un système explosif complexe permettant à la fois de rassembler cette matière en un temps très court tout en maintenant sa cohésion suffisamment longtemps. On peut donc affirmer qu'il est rigoureusement impossible à tout réacteur, même à neutrons rapides, d'exploser comme une bombe atomique. Ce qui est par contre techniquement exact, c'est que tous les réacteurs disposent pour entretenir la réaction en chaîne d'une quantité de matière fissile supérieure à la « masse critique » minimale,

et qu'on peut imaginer des accidents où le réacteur pendant un court laps de temps soit « surcritique » avec dégagement d'énergie supérieure à la normale prévue, mais sans commune mesure avec une explosion nucléaire.

Dans un réacteur à eau bouillante par exemple, la surcriticité pourrait théoriquement résulter d'une diminution brutale des bulles de vapeur et accroîtrait la densité de l'eau de refroidissement et favoriserait ainsi le développement de la réaction en chaîne. Dans un réacteur à neutrons rapides, un phénomène analogue pourrait se produire si une concentration locale rapide de plutonium pouvait survenir. On est donc conduit à se prémunir contre ce type d'accident, c'est-à-dire en rechercher les causes possibles, définir et mettre en place les dispositifs permettant de les éliminer, assurer une surveillance adéquate et permanente du cœur et si nécessaire concevoir un confinement qui en limite par avance les effets.

Pour ce qui est du danger potentiel présenté par le plutonium, on doit tout d'abord rappeler que cet élément est produit dans tous les réacteurs qui, après un certain temps de fonctionnement, en contiennent donc en quantités importantes. Le problème ne serait donc pas spécifique aux réacteurs à neutrons rapides. De plus, il ne faudrait pas attribuer au plutonium une nocivité exagérée : la concentration maximale admissible du plutonium soluble dans l'eau de boisson a été fixée par les médecins de la Commission Internationale de Radio-Protection à cinq microcuries par mètre cube, alors qu'elle est cinq cent fois plus sévère pour le radium. Or des concentrations naturelles de radium existent dans la nature, et des sources de radium importantes sont utilisées quotidiennement en médecine, par exemple.

D'une manière générale, l'examen des risques d'accidents sur un réacteur nucléaire consiste, à partir d'une des « barrières » précédemment définies, à envisager tous les phénomènes qui pourraient mettre en cause l'intégrité de cette

barrière. Ainsi pour la gaine du combustible, on étudie tout ce qui pourrait entraîner sa fusion accidentelle : dégagement excessif de chaleur résultant d'une erreur à la conception ou au chargement ; refroidissement insuffisant provenant d'un arrêt accidentel de circulation du fluide ou d'un autre défaut de matériel, etc...

A partir de chaque « faute » initiale, on étudie le comportement de l'installation, et on vérifie que les systèmes de sécurité prévus sont capables dans chaque cas de corriger la situation. Au-delà de cette première analyse, on poursuit l'examen des séquences accidentelles en faisant l'hypothèse qu'un certain nombre de dispositifs de sécurité ne fonctionnent pas correctement, c'est-à-dire qu'il y a coïncidence fortuite entre la faute initiale et la déficience de certains matériels. Cette deuxième analyse permet de définir des systèmes de secours qui doivent assurer le confinement des produits radioactifs.

V.3. Les études de sûreté.

Dès lors que l'on admet que les surréacteurs constituent une solution meilleure au problème énergétique posé à notre société, on doit résoudre le problème de leur sûreté dans la perspective d'un développement massif de ce système. C'est dans cet esprit que tous les organismes de recherches engagés dans ce programme poursuivent depuis de nombreuses années des études et des essais dans leurs laboratoires afin d'approfondir leurs connaissances sur les comportements accidentels possibles de tels réacteurs. A terme, ces recherches doivent permettre de serrer de plus près l'analyse du comportement des barrières en cas d'accident, et, tout en conservant le même niveau de sûreté, de limiter les hypothèses d'accidents évoquées plus haut, en les appuyant sur des résultats expérimentaux représentatifs.

Le C.E.A. étudie depuis 1960 au Département des Réacteurs à Neutrons

Rapides à Cadarache, le comportement des enceintes de confinement soumises à des dégagements d'énergie importants ; depuis 1965, il développe au Département de Sûreté Nucléaire de Cadarache, des études et essais en ce qui concerne les feux de sodium ; à la même époque, il a commencé au Département de Transfert et Conversion d'Energie à Grenoble un important programme d'études de l'ébullition du sodium et du comportement du combustible fondu dans le sodium. A partir de 1972, on a provoqué dans les installations d'essais du Département de Sûreté Nucléaire, de Cadarache, des fusions délibérées de gaines de combustibles pour réacteurs à neutrons rapides, ce qui a permis d'une part de vérifier le bon comportement de tous les systèmes de surveillance et d'autre part, d'apprécier les marges de sécurité incluses dans les analyses de sûreté.

Leur développement ultérieur devrait donc pouvoir se faire sans avoir à rencontrer, sur le plan de la sûreté, des difficultés supérieures à celles qui ont pu être observées pour d'autres techniques.

Ce programme de recherche important est utilisé par les équipes d'études de sûreté de projet qui analysent le déroulement d'incidents ou accidents à partir de fautes initiales et en déduisent les systèmes redondants de prévention ainsi que la résistance nécessaire des différentes barrières.

L'énergie nucléaire est le secteur industriel qui a certainement fait l'objet, dès l'origine, de la plus grande attention, en ce qui concerne l'environnement et la sûreté. Dès l'étude préliminaire d'un projet, les ingénieurs se préoccupent dans le détail de l'examen de sûreté du concept ; les règlements administratifs ont obligé les constructeurs à apporter la preuve de la sûreté de leur installation avant toute construction.

Les réacteurs à neutrons rapides, derniers venus sur la scène nucléaire, ne posent pas de problèmes de nature nouvelle et se plient à la règle commune.

VI. — ORGANISATION INDUSTRIELLE ET COLLABORATION INTERNATIONALE

Phénix est une centrale de démonstration ; il a donc été réalisé sous la responsabilité principale du C.E.A. dans la ligne de sa mission de recherche et développement. E.D.F. a participé à cette réalisation, marquant ainsi son intérêt pour cette filière dès sa première réalisation industrielle.

Le responsable de la construction était aussi le client (80 % C.E.A., 20 % E.D.F.) ; l'équipe d'ingénierie étant une équipe où le personnel de E.D.F. et de G.A.A.A. s'était intégré à une équipe du C.E.A.

Aujourd'hui, *Phénix* est à son niveau de puissance nominal et pour la première fois les différents composants d'une centrale à neutrons rapides de taille significative fonctionnent simultanément conformément aux prévisions.

L'un des éléments déterminants de ce succès a été l'étroite collaboration à tous les stades entre les équipes de recherche et développement et celles chargées de la réalisation.

Dans l'étape actuelle, *Super-Phénix*, le C.E.A. doit avoir pour but de continuer à assurer le développement de la filière et d'assurer le transfert au secteur industriel de la compétence technique d'ensemble.

La Recherche et Développement nécessite des efforts soutenus de façon à assurer la pénétration des rapides dans les programmes électronucléaires. C'est le rôle du C.E.A. de les prendre en charge et de faire faire de nouveaux progrès à la filière mais il ne saurait s'acquitter seul de cette tâche, c'est dans le cadre d'une association la plus large possible avec l'industrie que doit se poursuivre la conception des matériels et composants.

C'est dans ce sens, que depuis deux ans, le C.E.A. et les industriels fabricants de composants des réacteurs rapi-

des ont négocié puis signé des accords les liant pour 15 ans et par lesquels ils s'engageaient réciproquement à faire l'effort de développement nécessaire et à promouvoir ces matériels sur le plan industriel et commercial.

Une autre nécessité est la recherche de collaboration sur le plan international pour la mise en commun des efforts de développement nationaux. En effet, les programmes en cours mobilisent des moyens importants et ne peuvent que bénéficier d'une collaboration étroite avec les autres pays engagés dans le développement de la filière rapide. C'est le sens d'un accord de collaboration que le C.E.A. vient de conclure avec le C.N.E.N. italien.

Cependant, l'objectif ne consiste pas seulement à construire le premier prototype de 1200 MWe, *Super-Phénix*, mais essentiellement à industrialiser la filière, à remettre le flambeau aux industries des deux pays, à essayer de concevoir la réalisation de *Super-Phénix* comme une opération intermédiaire conduisant à une structure industrielle adaptée au développement des neutrons rapides par les industries des deux pays. Et c'est pourquoi on a recherché à constituer des structures capables de coopérer et de coopérer si possible de façon durable. Ceci a conduit à signer un certain nombre d'accords, à constituer des groupements, des sociétés, des associations.

Ces structures sont aujourd'hui en place ; tout d'abord les clients de *Super-Phénix* ont constitué une société qui les regroupe : il s'agit de la Nersa (Nucéaire Européenne Neutrons Rapides) composée à 51 % par E.D.F., 33 % par E.N.E.L. (Ente Nazionale per l'Energia Elettrica) et 16 % par R.W.E. (Rheinische Westfälische Elektrizität).

Concernant l'organisation industrielle liée au C.E.A. et la coopération avec l'Italie, on trouvera ci-après le texte intégral du communiqué remis le 7 juin 1974, à l'occasion d'une conférence de presse de M. Giraud, Administrateur Général du C.E.A. :

« Pour qu'une filière de réacteurs nucléaires arrivée à un niveau de développement avancé puisse aborder le marché, il est nécessaire de mettre en place des moyens industriels adaptés à la promotion commerciale et à la construction des chaudières. Parallèlement et en soutien de ces objectifs, il faut assurer la continuité de l'effort de développement.

a) Au stade de la recherche, un accord de coopération C.E.A.-C.N.E.N. (Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare) a été signé le 2 mai 1974.

Aux termes de cet accord, le C.E.A. et le C.N.E.N. échangent leurs connaissances sur la filière à neutrons rapides et décident de coordonner leur programme de recherche et développement pendant la durée de l'accord (15 ans).

b) Le développement de la filière suppose également l'organisation de la transmission des connaissances acquises par celui qui a développé la technique à celui qui la mettra en œuvre.

C'est dans cet esprit qu'une série d'accords vient d'être conclue entre le C.E.A., d'une part, et les groupements industriels (G.N.R. en France, N.I.R.A. en Italie), d'autre part.

Le G.N.R. (Groupement Neutrons Rapides) est formé par : C.G.E. (Alsthom), Fives Cail Babcock, pour réaliser et commercialiser les centrales à neutrons rapides conçues suivant la technique C.E.A.

La N.I.R.A. (Nucleara Italiana Reattori Avanzati) est formée par : Agip Nucleare, Ansaldo, Fiat.

Aux termes de ces accords, le C.E.A. communique au G.N.R. et à la N.I.R.A. toutes les connaissances relatives au système des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium qu'il a développé ou développera pendant la durée de l'accord (15 ans à compter du couplage au réseau de *Super-Phénix*).

Cependant, ces accords doivent être accompagnés d'un dispositif approprié

permettant d'assurer le transfert de la compétence technique de l'ensemble. Ce transfert se fera par le canal de Technicatome (1). Dans ce but, une filiale est créée par Technicatome et G.A.A.A. filiale de C.G.E., Alstom et Fives Cail Babcock (Cirna : Compagnie d'Ingénierie pour les Réacteurs à Sodium) qui assurera en outre les missions d'ingénierie et une promotion cohérente de la filière. »

Les figures 37 et 38 résument l'organisation mise en place.

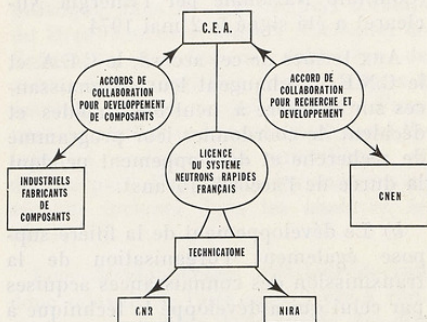


FIG. 37. — Les accords liant le C.E.A. pour la filière des réacteurs à neutrons rapides

	PHENIX	SUPER PHENIX
CLIENT	CEA + EDF	NERSA = EDF + ENEL + RWE
MAÎTRE D'ŒUVRE	80% 20%	50% 33% 16%
RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT	CEA	CEA et C.N.E.N.
INGENIERIE D'ENSEMBLE	CEA + G.A.A.A. + EDF	CIRNA = CEA + G.A.A.A. N.I.R.A.
CONSTRUCTEURS	CEA + EDF	CONSORTIUM = TECHNICATOME + C.N.R. + N.I.R.A.
FABRICANTS DE COMPOSANTS	INDUSTRIELS FRANÇAIS	INDUSTRIELS : FRANÇAIS, ITALIENS, ALLEMANDS
FABRICANTS DE COMBUSTIBLE	CEA	CEA ACP NUCLEAIRE

FIG. 38. — Organisation industrielle pour la construction de Phénix et de Super-Phénix

(1) Société d'ingénierie pour l'énergie nucléaire, filiale commune du C.E.A. (90 %) et d'E.D.F. (10 %).

VII. — CONCLUSION

Imaginé en 1954, orienté en 1957, précisé en 1966, le concept français de réacteurs à neutrons rapides a progressé à grands pas en s'appuyant sur les importants moyens d'essais du C.E.A. essentiellement concentrés à Cadarache.

Les étapes de l'expérience et de la démonstration sont maintenant largement engagées avec *Rapsodie* et *Phénix* ; la phase industrielle de cette aventure commence avec *Super-Phénix*.

L'organisation industrielle mise en place permet une bonne interpénétration des équipes et assure le transfert des connaissances des équipes du C.E.A. chargées de la recherche et développement aux équipes industrielles, chargées de la mise en place commerciale de la filière.

Jusqu'à présent, la filière française des réacteurs à neutrons rapides a été un succès technique. Gageons que l'industrie prendra convenablement le flambeau pour transplanter ce succès sur le plan commercial.

VIII. — REMERCIEMENTS

L'auteur remercie les nombreux ingénieurs du C.E.A. dont il a utilisé les rapports, notes et publications pour rédiger cette conférence.

Ses remerciements s'adressent particulièrement à MM. Houseaux, Bellet et Rua et au Secrétariat du Département des Réacteurs à Neutrons Rapides qui l'ont aidé à préparer ce document.

SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

Fondée en 1801

Reconnue d'Utilité Publique en 1824

44, rue de Rennes, 75006 PARIS

Tél. : 548-55-61 - C.C.P. 618-48 Paris

HISTORIQUE

La « SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE » fondée en l'AN X de LA RÉPUBLIQUE (1801) par NAPOLEON-BONAPARTE, Premier Consul et CHAPTAL, Ministre de l'Intérieur et premier Président de la Société, assistés de Berthollet - Brongniart - Delessert - Fourcroy - Grégoire - Laplace - Monge - Montgolfier - Parmentier... et de nombreux autres savants, ingénieurs, et hommes d'Etat,

RECONNUE D'UTILITÉ PUBLIQUE EN 1824,

a poursuivi son action pendant tout le XIX^e siècle, sous la présidence de Thénard - J.-B. Dumas - Becquerel et de leurs successeurs. On la voit encourager tour à tour Jacquard - Pasteur - Charles Tellier - Beau de Rochas.

Ferdinand de Lesseps - Sainte-Claire-Deville - Gramme - d'Arsonval furent titulaires de sa Grande Médaille.

BUT

LA SOCIÉTÉ S'EST PRÉOCCUPÉE PARTICULIÈREMENT, CES DERNIÈRES ANNÉES, DE DONNER AUX MILIEUX INDUSTRIELS DES INFORMATIONS EXACTES LEUR PERMETTANT DE SUIVRE LES DERNIERS DÉVELOPPEMENTS DE L'ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE.

ACTIVITÉS

ELLE DÉCERNE DES PRIX ET MÉDAILLES aux auteurs des inventions les plus remarquables et des progrès les plus utiles ainsi qu'aux ouvriers et contre-maîtres qui se sont distingués par leur conduite et leur travail. Elle organise des CONFÉRENCES d'actualité scientifique, technique et économique.

Elle publie une REVUE TRIMESTRIELLE : « L'INDUSTRIE NATIONALE ».

RECRUTEMENT

La Société recrute, en fait, ses Membres (Sociétés ou Individus) parmi ses anciens Conférenciers ou Lauréats. Ils ne sont soumis à aucune obligation particulière en dehors du paiement d'une cotisation annuelle de QUARANTE FRANCS pour les Personnes ou de CENT CINQUANTE FRANCS pour les Sociétés. Cette cotisation donne droit au service gratuit de la Revue reproduisant le texte des exposés faits à la Société ainsi qu'à une convocation à toutes les Conférences.

