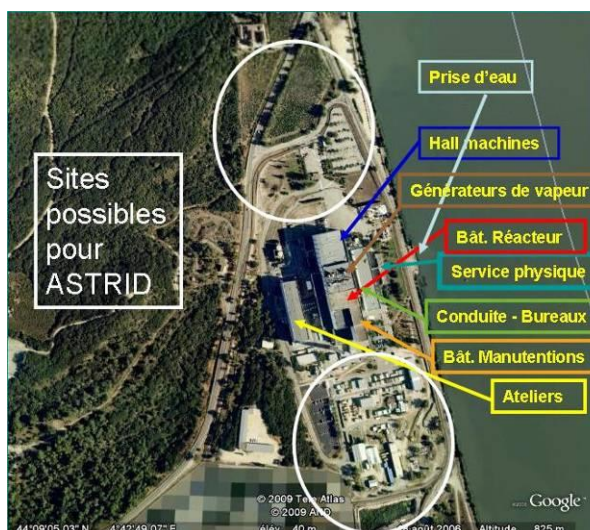


Phénix, réacteur surgénérateur

Patrick MICHAILLE

Phénix a terminé son 56ème et dernier cycle le 6 mars 2009, en réalisant les essais de fin de vie qui permettront d'en affiner la connaissance neutronique et thermohydraulique, et de clore l'histoire remarquable de ce réacteur de démonstration qui a permis de valider durant 35 ans les choix faits par ses concepteurs, et aussi de réaliser des expériences d'irradiation qui préparent l'avenir.

1. PRÉSENTATION DE LA CENTRALE

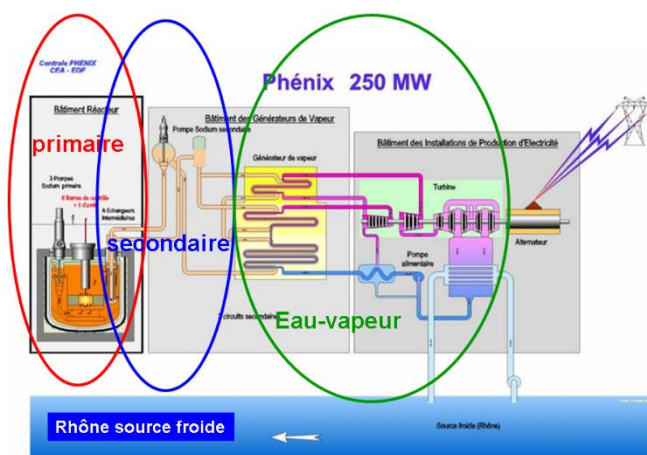


La centrale Phénix est située au nord-est du site nucléaire de Marcoule, les bâtiments s'alignent le long du Rhône : le bâtiment réacteur (BR) au centre, le bâtiment des générateurs de vapeur (GV) et l'installation de production d'électricité au nord, le hall des manutentions au sud.

2. DESCRIPTION DU SYSTÈME

Le réacteur est de type intégré, c'est-à-dire que les grands composants du circuit primaire (pompes, échangeurs de chaleur) sont plongés dans la cuve primaire qui contient 820 tonnes de sodium. Le circuit eau-vapeur produit de façon classique de l'électricité à travers une turbine (le palier 250 MWe qui a été choisi était celui de l'époque, pour les centrales thermiques).

Entre les deux est inséré un circuit secondaire de sodium non contaminé, de façon à séparer les risques chimiques liés au sodium des risques radioactifs du circuit primaire.



3. LA FILIATION RAPSODIE – PHÉNIX – SUPER PHÉNIX

Phénix est un réacteur de démonstration, de 250 MWe (625 MWth). Par rapport à Rapsodie, réacteur de recherche de 40 MWth, les différences sont importantes, comme le montre le tableau suivant.

Caractéristiques	Rapsodie	Phénix	Super Phénix
Puissance thermique	40 MW	563 MW	3 000 MW
Conception	À boucles	intégré	intégré
Générateurs de vapeur	0	3	4
Masse sodium primaire	37 tonnes	820 tonnes	3 000 tonnes
Diamètre cuve principale	2,35 m	11,8 m	21 m

Cœur - Combustible	Rapsodie	Phénix	Super Phénix
Nb d'aiguilles	61	217	271
Nb assemblages fissiles	37	106	365
Longueur de l'assemblage	1,4 m	4,3 m	5,4 m

À noter que le premier réacteur électrogène au monde était un "rapide" : EBR-1 a divergé en 1951 (puissance : 1,4 MW). Rapsodie, implanté sur le centre de Cadarache, a divergé en janvier 1967. Il a atteint 20 MW en mars et 24 MW à fin 1967 et, en 1970, une refonte du cœur a permis de porter sa puissance à 40 MW (Fortissimo).

Les caractéristiques principales de Phénix ont été arrêtées dès 1965, en gardant le choix d'un combustible au plutonium, un caloporteur sodium, mais en innovant avec une conception intégrée, déjà utilisée pour le réacteur américain EBR-2. La conception intégrée présente du point de vue de la sûreté l'avantage de l'inertie thermique, et la suppression du risque d'accident de perte de caloporteur contaminé par rupture d'une tuyauterie primaire ; en exploitation, les risques de feu de sodium contaminé et les doses intégrées par le personnel sont réduits. Les performances thermiques du sodium permettent de l'utiliser sans pressurisation, et donc de conserver des parois de cuve primaire mince (25 mm pour la virole primaire de Phénix), compatible avec de grands diamètres (la cuve primaire de Super Phénix mesure 21 m de diamètre).

LES ÉTAPES DE LA CONSTRUCTION DE PHÉNIX

Ouverture du chantier : octobre 1968

Premier dépotage de sodium : 28 juillet 1971

Divergence : 31 août 1973

Couplage au réseau: 13 décembre 1973

Mise en service industriel : 14 juillet 1974

LES CARACTÉRISTIQUES DE PHÉNIX

Puissance nominale : 563 MW_{th}, 250 MW_e, soit un rendement thermohydraulique de 44% (pour un REP¹, il est de ~ 30 %) en raison de la température élevée en sortie du cœur : 560°C

Depuis 1993 : puissance limitée à 350 MW_{th} (142 MW_e), sur 2 boucles secondaires.

Total de Jours Equivalents à Pleine Puissance : 4580 JEPP

Durée de production d'électricité : 128 000 h

Production électrique brute : 28 TWh

Rejets (jusqu'à fin 2002) : 180 TBq

Dosimétrie (intégrée sur 35 ans) : 2,3 Sv (le personnel se composait d'environ 280 agents, soit une dose moyenne de 0,23 mSv/a (moins de 1/10^e de la dose naturelle en France – voir [la fiche GAENA « L'environnement radioactif naturel et artificiel »](#))

4. POURQUOI DES NEUTRONS RAPIDES ?



Avec un spectre de neutrons rapides, 1) les fissions produisent davantage de neutrons, 2) les neutrons générés par la fission convertissent les noyaux ²³⁸U en ²³⁹Pu plus efficacement qu'avec des neutrons thermalisés (ralentis), 3) les neutrons peuvent transmuter les éléments transuraniens à vie longue en éléments de période courte.

Phénix a apporté la démonstration que la surgénération (capacité de produire plus de noyaux fissiles ²³⁹Pu qu'il n'y en a eu de consommés) était possible à l'échelle industrielle :

un taux de 16 % a été atteint, c'est-à-dire qu'au bout de 6 recyclages du combustible, on a formé assez de plutonium pour fabriquer un cœur supplémentaire. Les réacteurs à neutrons rapides visent ainsi à multiplier par

un facteur 50 à 70 le potentiel énergétique des réserves d'uranium de la planète en brûlant l'uranium-238 contenu à 99,3 % dans l'uranium naturel, ce qui offre à la France une énergie disponible pour plusieurs millénaires (en effet, l'uranium appauvri issu de l'enrichissement est entreposé en emballages à Pierrelatte, après stabilisation sous forme U_3O_8 à l'usine W) (voir "[Les réacteurs nucléaires](#)"). En outre, les essais réalisés à partir de 1992 dans le cadre de la loi sur les déchets nucléaires de 1991 ont permis de valider le concept de réacteurs incinérateurs d'actinides mineurs prévus pour la 4^{ème} génération.

5. POURQUOI LE SODIUM COMME CALOPORTEUR ?

Les probabilités d'interaction (sections efficaces) des neutrons avec ^{239}Pu sont 100 fois plus faibles qu'avec des neutrons « thermiques » donc, pour pouvoir entretenir la réaction en chaîne, il faut augmenter la densité de noyaux fissiles dans le cœur, ce qui implique une teneur en isotopes fissiles plus élevée (~20 %, contre 4-5 % pour les REP¹) et un cœur compact (5 à 10 fois plus que pour un REP¹).

A titre d'exemple, les 560 MWth de Phénix sont générés dans un volume d'1 m³ contenant 1 tonne de Pu. Une telle densité de puissance ne peut être extraite que par un caloporteur à métal liquide : mercure et plomb ont été utilisés, mais le sodium a été sélectionné pour ses capacités neutroniques (transparence aux neutrons), thermiques (capacité calorifique, plage de températures d'utilisation) et son faible coût : il est obtenu par électrolyse du sel (NaCl). De plus, à 400°C, sa viscosité est voisine de celle de l'eau, ce qui permet des essais hydrauliques sur maquettes en eau et facilite l'interprétation des résultats.

En outre, s'il n'est liquide qu'à 98°C, sa température d'ébullition est de 880°C à la pression atmosphérique, ce qui offre une plage de fonctionnement de près de 800°C, et cela sans pressurisation.



Entraînement des opérateurs à combattre un feu de sodium
Ecole du sodium, Cadarache

Mais le sodium brûle à l'air, en produisant une petite flamme peu rayonnante qui permet d'en approcher, mais en dégageant beaucoup d'aérosols caustiques (il faut se protéger la peau et les voies respiratoires). En réacteur, tous les circuits de sodium ont un gaz neutre (argon) comme gaz de couverture. Par ailleurs, les opérateurs s'exercent à la lutte contre les feux de sodium, à l'Ecole du sodium de Cadarache.

6. UN RÉACTEUR RAPIDE EXIGE-T-IL DES PILOTES DE COURSE ?



Salle de commande de Phénix

En fait, le pilotage d'un réacteur comme Phénix est plus aisé que celui d'un REP¹ car, outre les contre-réactions négatives dont il bénéficie, le concept intégré procure une très forte inertie aux phénomènes thermohydrauliques se produisant au primaire, et il n'est pas soumis aux poisons neutroniques (xénon, samarium) qui se manifestent lors d'un redémarrage de REP¹.

Phénix comporte 6 barres de pilotage contenant un absorbant de neutron (carbure de bore enrichi à 48 % de ^{10}B) et la chute par gravité d'une seule d'entre elles suffit à arrêter la réaction en chaîne.

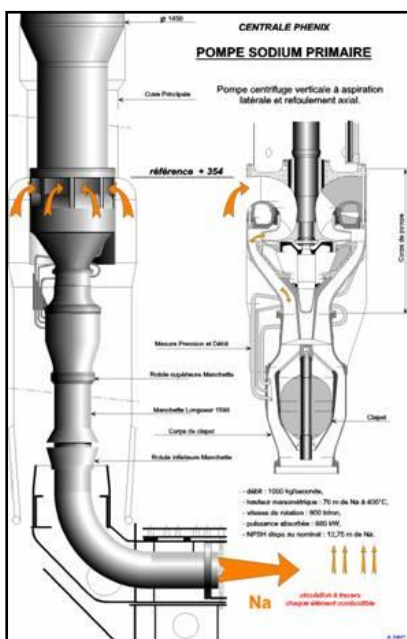
Un système d'arrêt complémentaire (SAC) a un rôle uniquement de sûreté : articulé et retenu par un électro-aimant contrôlé par géophones, il offre la garantie d'une chute complète même en cas de déformation du cœur suite à un séisme majeur.



Mécanismes des barres de commande

¹ REP : réacteur à eau pressurisée, utilisant l'eau comme modérateur de neutrons et comme refroidisseur du cœur.

7. QU'EST-CE QUE L'EXPLOITATION DE PHENIX NOUS A APPRIS ?



ayant fonctionné à haute température.

Les 20 premières années de fonctionnement de Phénix ont permis de valider le fonctionnement des principaux composants du circuit intégré : pompes, échangeurs, mécanismes de barres de contrôle, purification du sodium, purification de l'argon primaire, détection et localisation des ruptures de gaine de combustible.

Ces incidents ont donné lieu à un nombre significatif d'opérations de manutention de gros composants, apportant ainsi la preuve que la conception intégrée n'était pas un obstacle à leur maintenance.

17 échangeurs, 7 pompes et 17 mécanismes de barres ont été **lavés et décontaminés pour permettre leur réparation au contact**, ce qui démontre la faisabilité de ces opérations même pour des composants souillés de sodium, et



Des **ruptures de gaine** sont apparues à partir de 1979 quand on a voulu pousser le taux de combustion. Au total, 15 éléments défectueux ont dû être déchargés dont seulement 6 concernant du combustible standard, ce qui témoigne de la qualité de fabrication du combustible sur quelque 230.000 aiguilles irradiées, et justifie le concept de fonctionnement en cœur propre. Ce fait est corroboré par l'expérience de Super Phénix, où aucune rupture de gaine ne s'est produite pendant l'irradiation du cœur, qui comportait à lui seul près de 99.000 aiguilles.



Une trentaine de **fuites de sodium** se sont produites, dont seulement 3 avec du sodium primaire (sur des soudures d'instruments de mesure) ; sur les circuits secondaires, elles ont impliqué du sodium non radioactif. Détectées à un stade précoce, elles n'ont pas eu de conséquences sur la sûreté.

Quatre **réactions sodium-eau** se sont produites en 1982 et 1983, et une 5^{ème} en 2003, sur les resurchauffeurs des générateurs de vapeur (GV). Le mécanisme a été identifié : des entrées d'eau se produisent lors des démarrages, entraînant des fluctuations de température, et donc de la fatigue thermomécanique. Les modules ont été changés et la procédure modifiée. Les fuites ont été limitées à des quantités de 1 à 4 kg d'eau, après amélioration du système de détection de l'hydrogène dans le sodium.



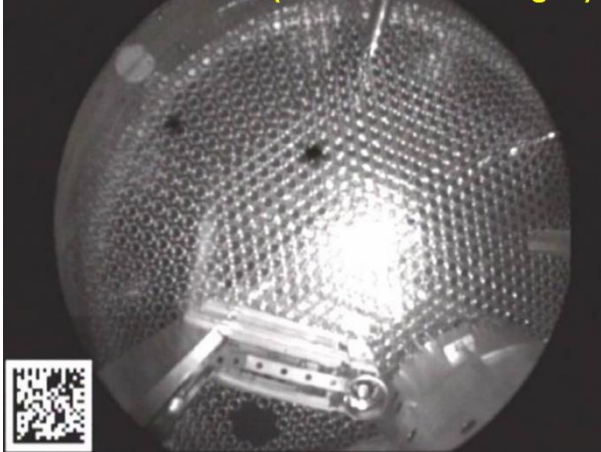
Des « arrêts d'urgence par réactivité négative » se sont produits en 1989 et 1990, et ne se sont pas reproduits depuis. Ils sont imputés à des circonstances particulières (irradiations nécessitant de thermaliser les neutrons en périphérie de cœur). Les essais de fin de vie ont permis d'améliorer la connaissance de la neutronique du cœur. Ils se sont terminés avec la dernière chute de barre, le 1^{er} février 2010 à 17h30.

8. LA PROLONGATION DU FONCTIONNEMENT

Le choix a été fait en 1994 d'étendre la durée de vie de Phénix pour réaliser les essais prévus dans la loi sur les déchets de 1991. Les travaux de mise à niveau de la sûreté du réacteur visèrent essentiellement à garantir la tenue au séisme suivant les normes actuelles : renforcement de tous les bâtiments, création de nouveaux circuits de refroidissement de secours autonomes, mise en place d'un système d'arrêt complémentaire (SAC) spécialement conçu pour parer aux séismes (absorbant de neutron placé dans des porteurs articulés et tenus par un électro-aimant, arrêt d'urgence déclenché par des géophones).

Également, les principaux risques ont été diminués : réduction des risques d'un grand feu de sodium (cloisonnement des circuits secondaires), tenue des tuyauteries de vapeur (dispositifs anti-fouettement en cas de rupture d'une tuyauterie), limitation des conséquences d'une réaction sodium-eau (renforcement des caissons des générateurs de vapeur).

Examen du cœur (têtes d'assemblages)



Le réacteur a ainsi pu redémarrer fin 2003, pour 6 cycles d'irradiation qui ont permis de réaliser le programme expérimental prévu pour satisfaire aux demandes de la loi de 1991 : transmutation d'échantillons de combustible chargé d'américium, irradiation d'échantillons de combustibles innovants (notamment pour des réacteurs refroidis au gaz) ainsi que de matériaux pour ITER ([voir la fiche GAENA "ITER"](#)).

La puissance du réacteur a été ramenée aux deux tiers de la puissance nominale, en fonctionnant sur deux boucles secondaires. Cette décision tenait compte de la disponibilité des équipements de rechange, et garantissait de ne pas dépasser une température de 650°C au primaire, même en cas de perte des circuits secondaires d'évacuation normale de la puissance.

9. PHÉNIX AURAIT-IL PU CONTINUER À FONCTIONNER ?



Phénix était exploité par une association CEA (80 %) – EDF (20 %), qui a été dissoute au 31 décembre 2009. Les travaux de démantèlement sont à la charge du CEA. En contrepartie, EDF avait pris en charge les travaux de démantèlement de la centrale de Brennilis (50 % EDF – 50 % CEA), équipée du réacteur EL-4.

Compte tenu qu'un nouveau réacteur de démonstration pour valider les choix de Génération IV ([voir fiche GAENA "Génération IV"](#)) ne sera pas disponible avant le début des années 2020, l'Europe et la France ne disposeront pas d'outil d'irradiation performant pendant plusieurs années. Ce manque sera partiellement comblé par le futur réacteur Jules Horowitz (RJH – [voir fiche GAENA](#)) en cours de construction à Cadarache.

Les collaborations se sont fortement renforcées avec les partenaires étrangers : le Japon, qui possède le réacteur d'essai JOYO et le réacteur MONJU de 300 MWe ; l'Inde, qui construit un réacteur PFBR de 500 MWe dont la divergence est prévue en 2013 ; la Chine, qui a démarré son réacteur d'essai CEFR de 65 MW_{th} (20 MWe) en 2010 ; la Russie, qui a prolongé la durée de vie de BN600 (600 MWe) de 15 ans, et démarrera BN800 en 2014.

Malheureusement, la poursuite du fonctionnement de Phénix n'est pas possible : d'une part, l'autorisation de prolongation de durée de vie accordée par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) était limitée à 6 cycles d'irradiation ; d'importants et coûteux travaux auraient été nécessaires pour satisfaire à l'examen de sûreté décennal ; en outre, certaines pièces de rechange sont devenues introuvables ; d'autre part l'atelier de fabrication de combustible de Cadarache (ATPu) a été arrêté.

Aussi le Président Chirac a-t-il lancé, lors de ses vœux de 2006, le projet d'un nouveau réacteur : il sera refroidi au sodium, pour bénéficier de l'expérience acquise, mais devra innover pour satisfaire aux objectifs de Génération IV : sûreté – au niveau celle des réacteurs de la Génération III qui seront mis en service à l'époque, fiabilité et disponibilité accrues, économie de combustible et réduction des déchets, lutte contre la prolifération.

Des sites d'implantation possible d'ASTRID (Advanced Sodium cooled Technological Reactor for Industrial Demonstration) ont été identifiés au nord et au sud de Phénix ; 40 ha de terrain au nord ont déjà été achetés par le CEA, pour faire renaître le Phénix de ses cendres !

10. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Jean-François SAUVAGE : *Phénix, une histoire de cœur et d'énergie* ; édité par CEA Marcoule
- [2] RGN 2009 N°1 : *Le réacteur Phénix, Bilan de 35 ans de fonctionnement* ; édité par SFEN