

# Historique des réacteurs à sels fondus aux USA focus sur le MSRE

Y. Gorse

DEN/DANS/DM2S/STMF/LMEC

22/03/2018

# L'avion à propulsion nucléaire

## Contexte

- guerre froide
- but : avoir des bombardiers nucléaires à rayon d'action illimité
- les USA et l'URSS étudièrent de tels moyens de propulsion



**FIGURE** – Convair NB-36H, seul avion américain ayant transporté un réacteur nucléaire fonctionnel

# L'avion à propulsion nucléaire

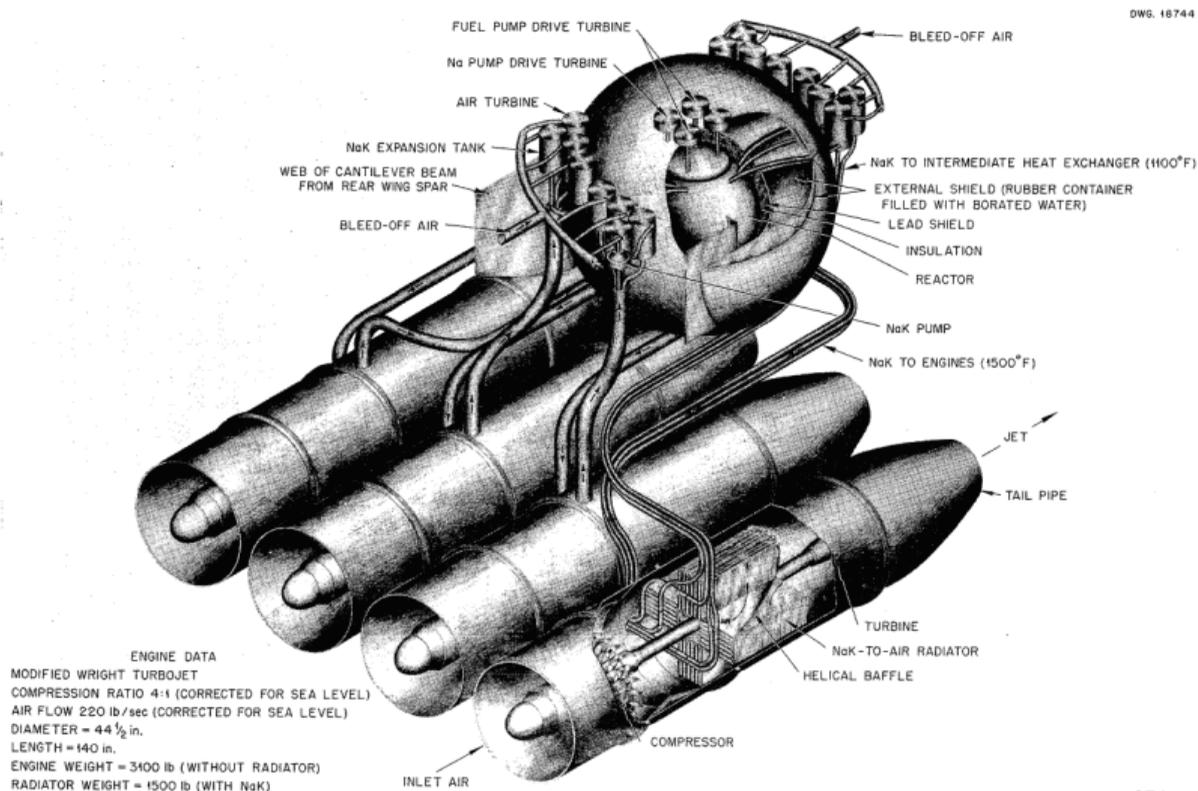
## Des besoins extrêmement exigeants

- puissance et températures élevées ( $> 600^\circ$ )
- encombrement réduit ( $\simeq 1\text{m}$ )
- tolérance aux chocs, accélérations (pas de changement de réactivité brusque)
- mécanique simple, robustesse, fiabilité
- facile à piloter

⇒ réacteur à **sels fondus**

ORNL dirige les recherches coté USA

# Allure d'un réacteur pour la propulsion nucléaire d'un avion



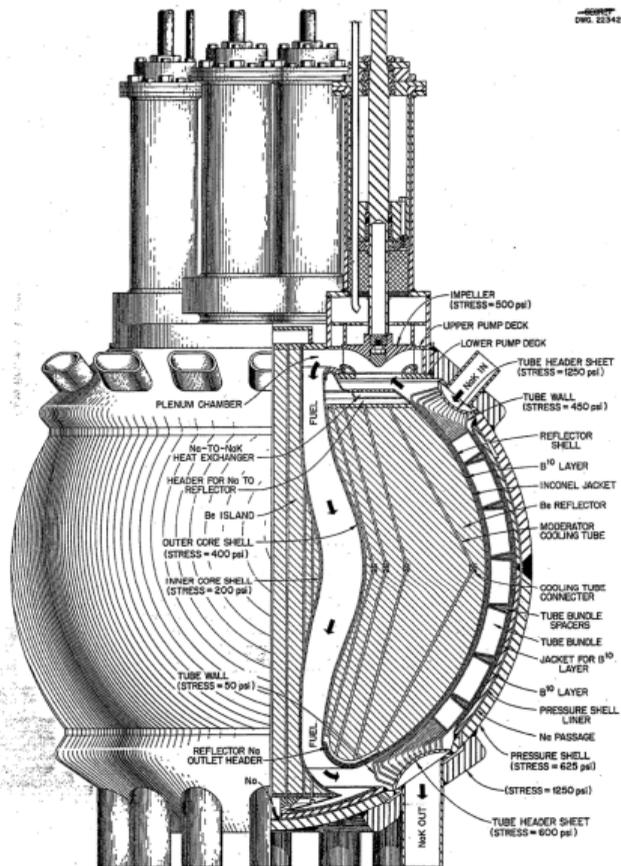


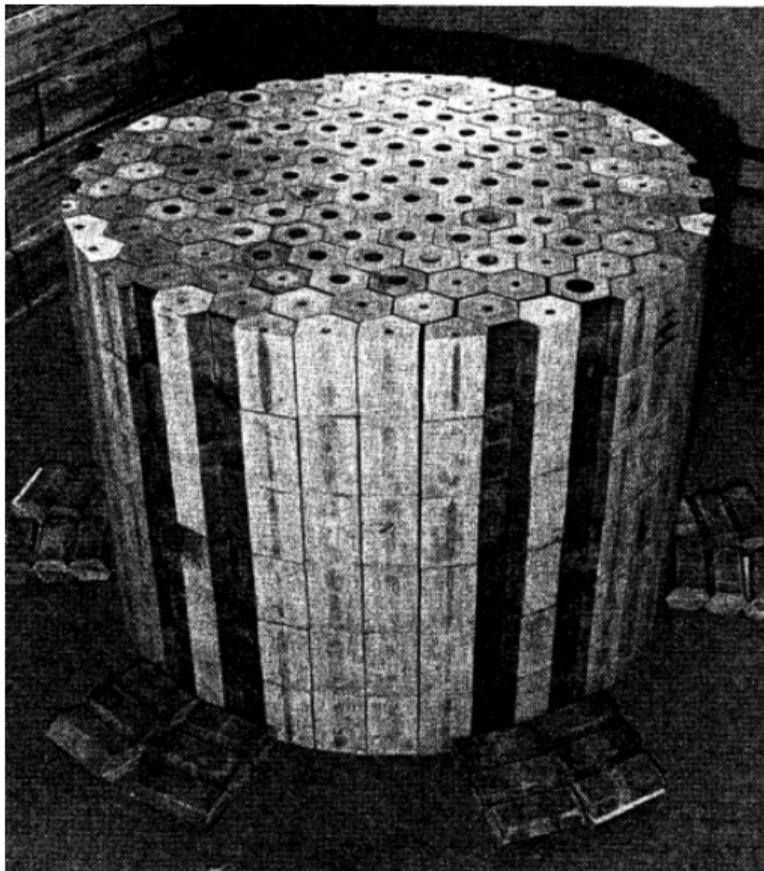
Fig. 2-1. 60-Mw Reflector-Moderated Reactor.

## Zoom sur le réacteur

### Circuit primaire

- réflecteur sphérique Be refroidi au sodium
- combustible : sels fluorures à l'Uranium
- génération de puissance en écoulement annulaire descendant
- échange thermique au secondaire en NaK en écoulement annulaire ascendant

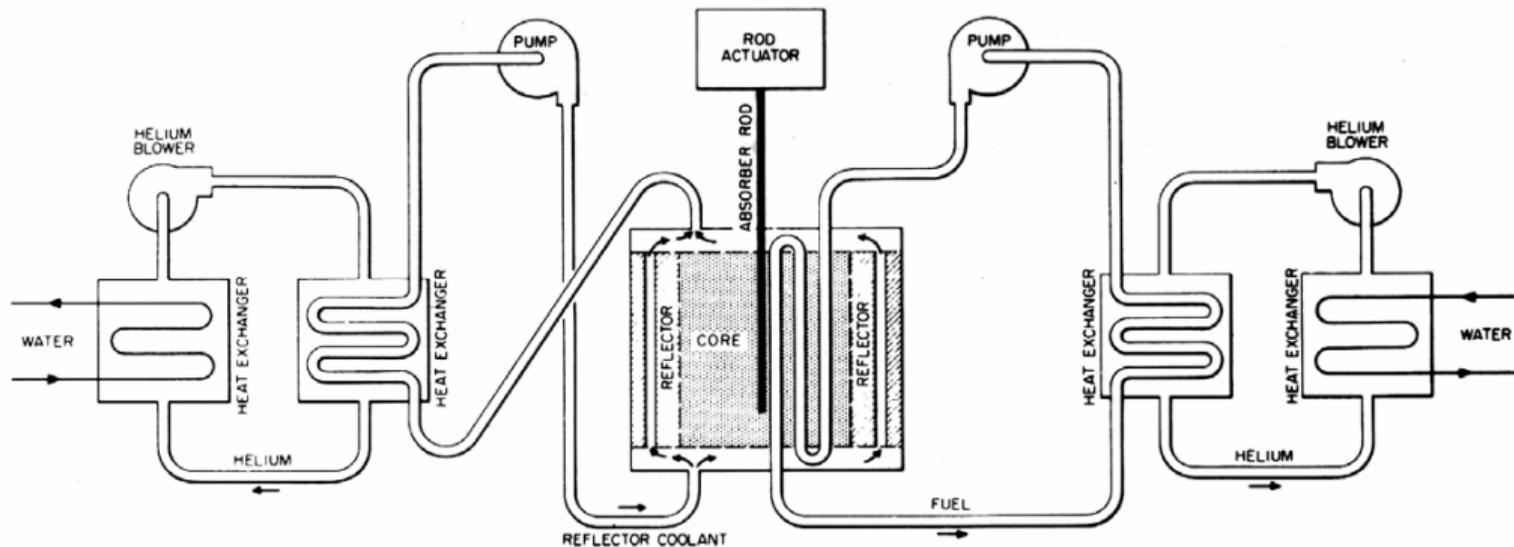
## Démonstration de faisabilité (1954)



### ARE (Aircraft Reactor Experiment)

- premier réacteur à sels fondus en opération
- sel combustible :  $\text{NaF-ZrF}_4\text{-UF}_4$ 
  - bonne solubilité de l'U
  - stabilité à haute température, sous irradiation
  - compatibilité avec les alliages à base Ni
- utilisation de blocs de BeO initialement conçus pour un concept abandonné de réacteur à combustible solide, spectre thermique et refroidi au sodium
- puissance de 2.5MWth

## ARE : fonctionnement



- circulation du **combustible** dans des **tubes en Inconel** insérés dans les **blocs de BeO**
- **refroidissement** par un écoulement inter-blocs en **sodium**
- évacuation de la chaleur dans des **échangeurs Na/He** ou **sel/He**

# Retour d'expérience de l'ARE

Exploité du 3 au 12 novembre 1954

## Points positifs

- confirmation du coefficient de température négatif
- produits de fission gazeux extraits naturellement à la pompe
- démonstration de la faisabilité du suivi de charge par variation du débit au secondaire

## Points à améliorer

- complexité de l'installation
- corrosion de l'Inconel par le sel → développement de nouveaux alliages

## Début 60's

### Arrêt du programme Aircraft Nuclear Propulsion...

- l'arrivée des **missiles balistiques intercontinentaux** rend le besoin d'avion à propulsion nucléaire moins pertinent
- la **protection neutronique** a toujours été une **difficulté**
- pas envisagé pour l'aviation civile (curieusement...)

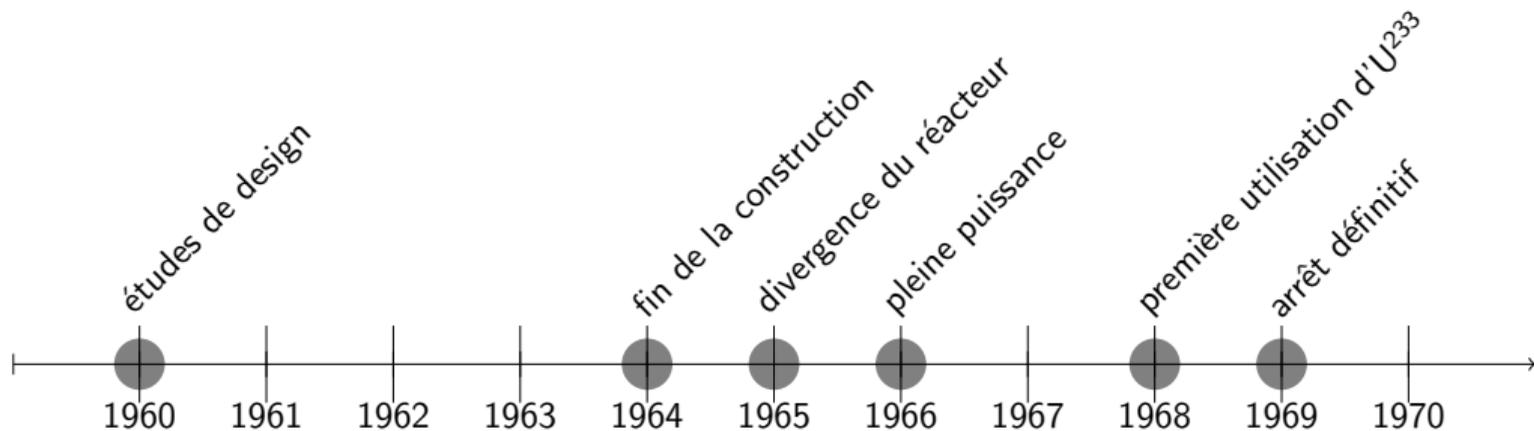
### ... et début des applications civiles des MSR !

- les **MSR** ont des **propriétés désirables**, y compris pour la **production d'électricité**
- l'ORNL obtient un financement pour dessiner, construire et exploiter le **MSRE** (Molten Salt Reactor Experiment)

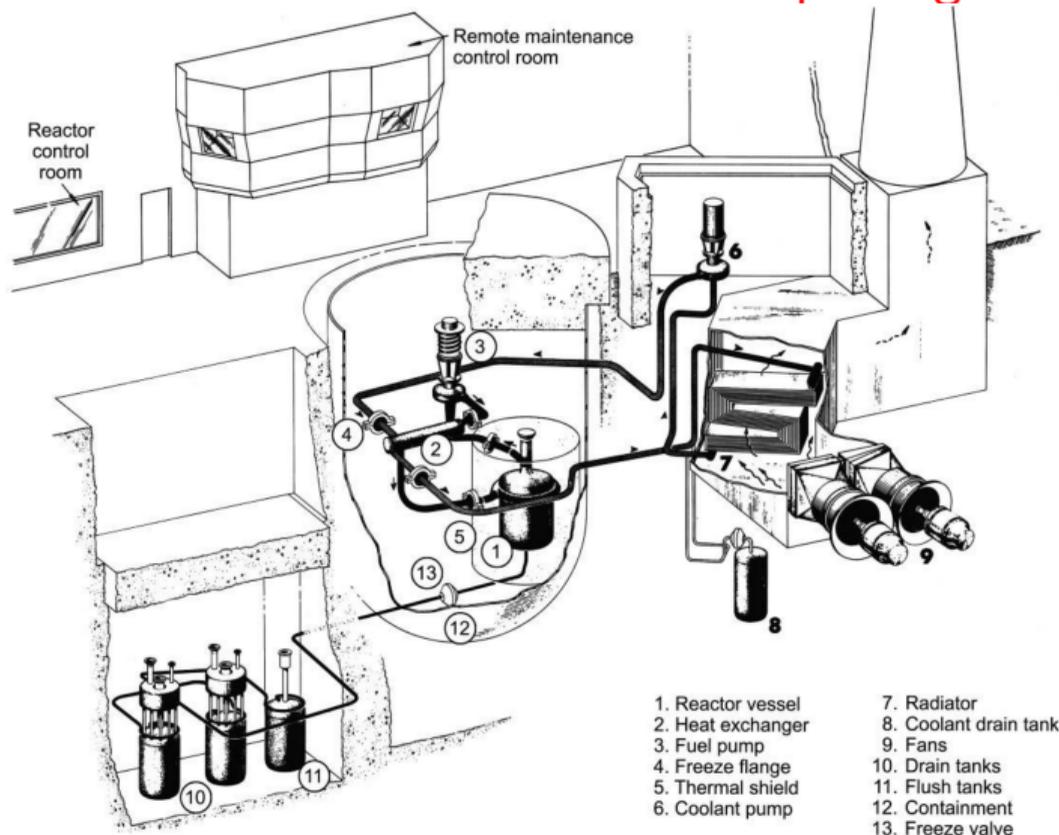
# Le MSRE

## Caractéristiques générales

- puissance : 7.4MWth
- mono-fluide (pas de couverture fertile)
- spectre **thermique** (modération au graphite)



# Le MSRE - Description générale



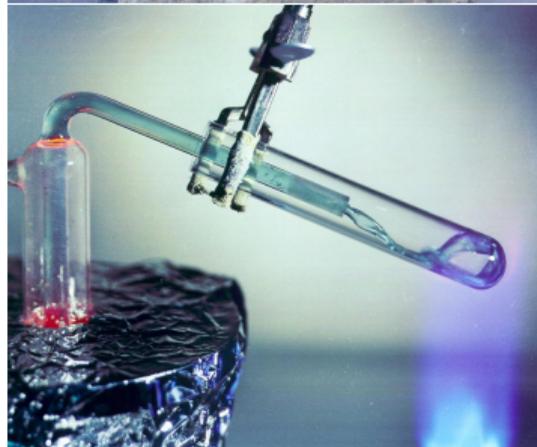
## Le MSRE - sel utilisé

### FLiBe :

- meilleure **économie des neutrons** que le sel de l'ARE (très faible section efficace de capture)
- $^7\text{Li}$  **évite** la production de **tritium**
- **Be** permet **abaisser** la **température de fusion**
- caloporteur au secondaire
- solvant au combustible  $\text{UF}_4$  au primaire
- ajout de  $\text{ZrF}_4$  au combustible pour éviter la formation d'oxydes d'Uranium

### REX

- l'ajout de  $\text{ZrF}_4$  n'est **pas nécessaire**
- confirmation du **bon comportement** sous irradiation du FLiBe



## Le MSRE - matériaux

### Structure : Hastelloy-N

- Alliage à base de **Nickel**
- haute teneur en **Molybdène**
- excellente **résistance à la corrosion** des fluorures à haute température
- compose tous les tuyaux et cuves en contact avec les sels

### REX

- très **faible corrosion** de l'Hastelloy-N
- mais **fragilisation** de faible profondeur par le **Tellure** → **problème** pour des durées de vie de **plusieurs décennies**
- solutions proposées : ajout de Niobium à l'Hastelloy-N ou maîtrise du potentiel redox

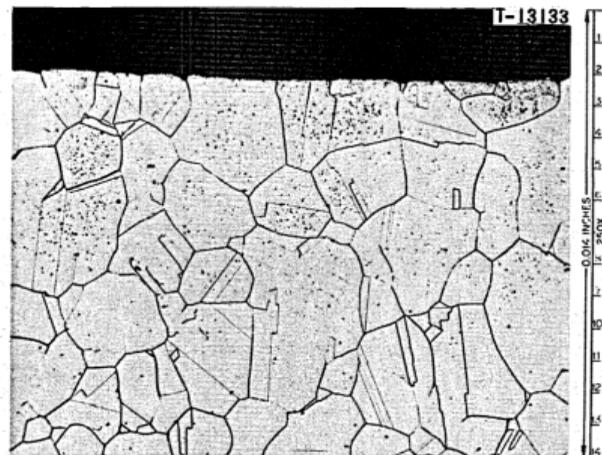


Fig. 9. Hot-Leg Surface of Ternary Nickel-Molybdenum Alloy Containing 2.47 at. % Ti After 1000-hr Exposure to Salt 107. Heat OR 30-8.

## Le MSRE - ThHyd au primaire

### Chemin hydraulique

- injection dans le distributeur toroïdal
- écoulement annulaire descendant en périphérie → maintient la cuve à la température froide
- retournement dans le plenum inférieur
- écoulement ascendant dans les canaux graphite
- sortie du sel combustible par le haut de la cuve

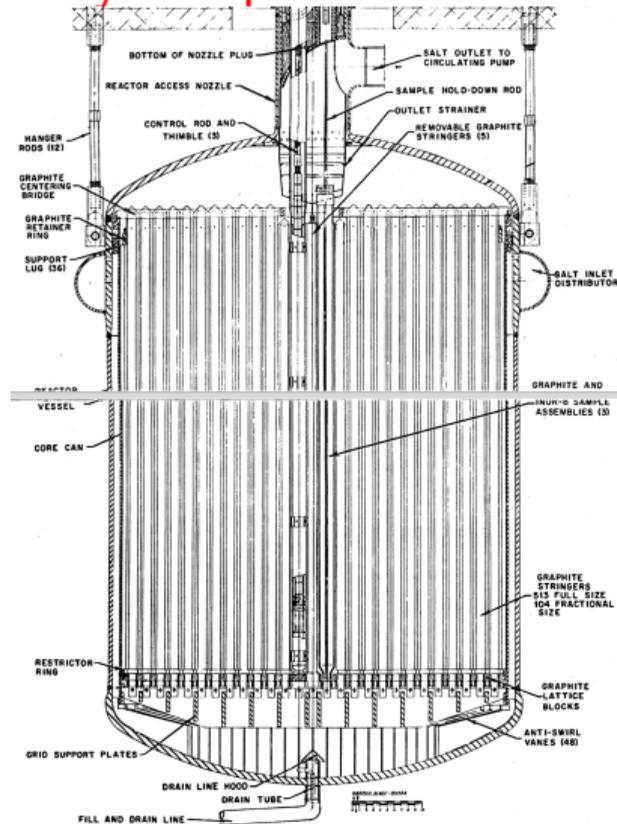


Fig. 5.4.  
CROSS SECTION  
MSRE REACTOR VESSEL AND ACCESS NOZZLE

## Le MSRE - ThHyd au primaire

### Écoulement coeur

- 513 barres de graphite à section carrée
- bords usinés pour former un demi canal → 1140 canaux
- le graphite occupe 77.5% du volume
- $T_{in} = 635^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{out} = 665^{\circ}\text{C}$
- écoulement laminaire



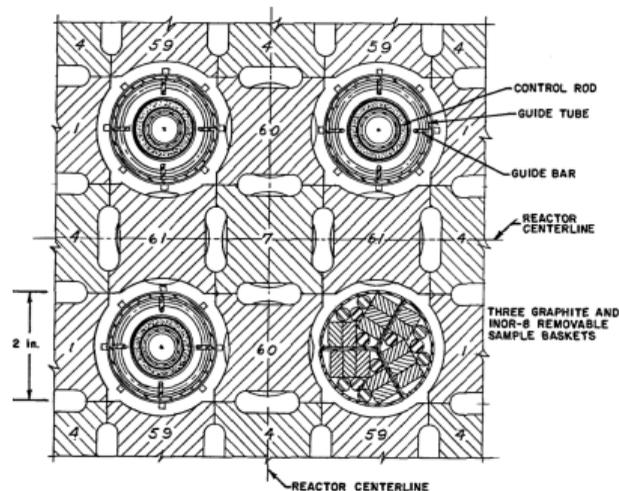
## Le MSRE - barres de contrôle

### Description

- 3 barres de contrôle
- composées de 38 cylindres (70%  $Gd_2O_3$  - 30%  $Al_2O_3$ )
- pas en contact avec le sel
- maintenues par électro-aimant

### Problèmes rencontrés

- barre de contrôle bloquée en position haute par un dispositif expérimental → rampe de puissance puis stabilisation par CR
- 3060 SCRAM - 1 échec



## Le MSRE - échangeurs

### Primaire

- $\varnothing$  40cm , longueur 2.5m
- 163 tubes

### Radiateur

- 120 tubes
- longueur 9m
- capacité d'extraction : calculée à 10MW, mais finalement limitée à 7.4MWth

### Problèmes rencontrés

- rupture ventilateur → arrêt de 11 semaines



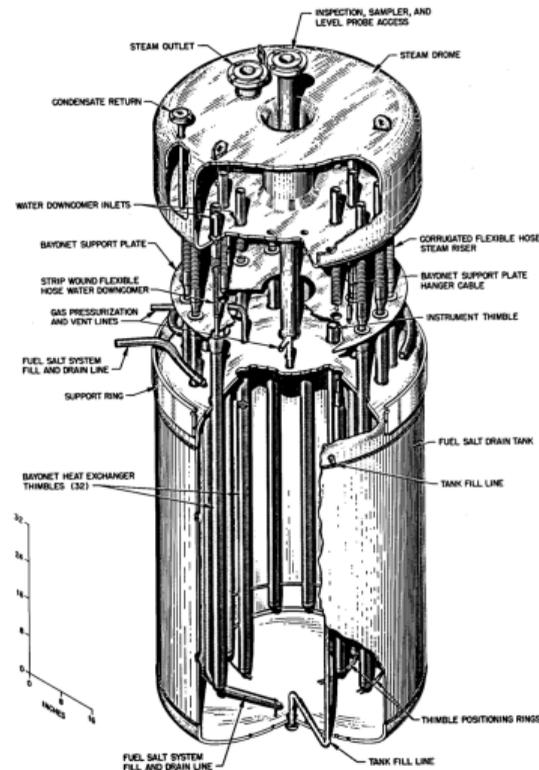
## Le MSRE - réservoirs de vidange

### Plusieurs types de réservoirs :

- sel combustible (× 2)
  - chacun peut accueillir la **totalité de l'inventaire** en sel
  - configuration **non critique**
  - extraction de la **puissance résiduelle** par **ébullition de l'eau** contenue dans 32 tubes insérés dans le réservoir
- sel secondaire
- rinçage du circuit primaire
- stockage et retraitement

### Problèmes rencontrés

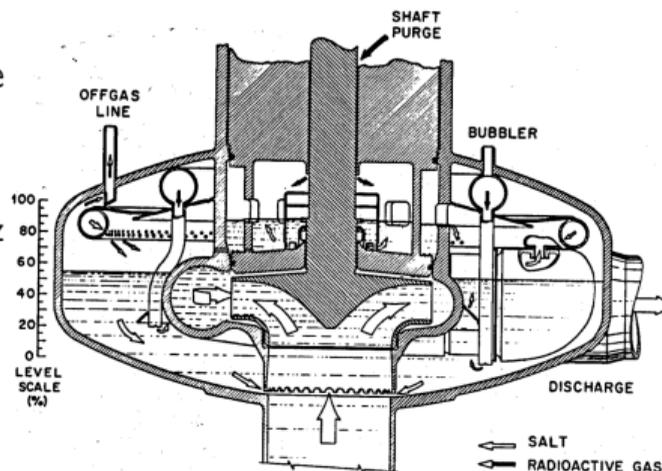
- lors de la **vidange finale** du circuit primaire : détection de PF dans le bâtiment réacteur → **fissure** au niveau d'une **vanne** par solidification



# Le MSRE - Extraction des gaz de fission

## Pompe "multi-fonctions"

- **circulation** forcée du sel dans le **circuit primaire**
- vase d'**expansion**, mesure de l'**inventaire**
- accès pour : **prise** d'échantillons, **ajout** de combustible
- **extraction des PF** :
  - **bypass** d'une fraction du débit de sel dans un dispositif visant à former un **spray** dans le ciel de gaz
  - **entraînement** des PF dans l'He, et extraction



## Problèmes rencontrés

- **fuite** de lubrifiant → vaporisation, dépôts et **bouchage** de systèmes de **filtration**
- **entraînement de gaz** → **variation** de 5-10% de la **puissance** à intervalles réguliers (10/h)

# Le MSRE - traitement du sel

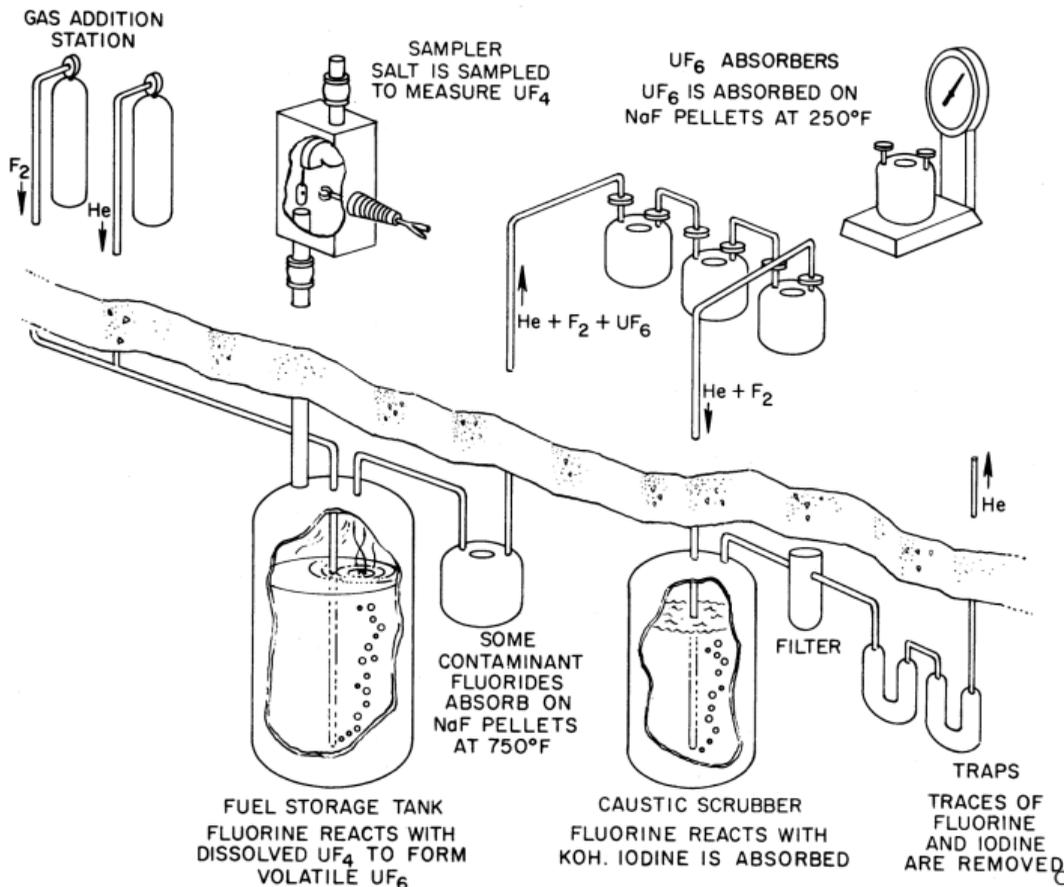
## Contrôle redox

- la **fission** tend à provoquer un **excès de F**
- en **présence d' $UF_3$**  : **conversion** en  $UF_4$
- en cas d'**absence d' $UF_3$**  : **corrosion** !
- solution : du **Be** métallique est **immergé** dans le vase de la pompe → formation de  $BeF_2$  et **réduction** d' $UF_4$  en  $UF_3$

## Extraction de l'Uranium par fluoration

- pour récupérer l'U lors de l'**arrêt définitif**
- pour **extraire** l' $^{235}U$  avant le **remplacement** par l' $^{233}U$
- **injection de  $F_2$**  gazeux dans le réservoir de stockage du combustible
- oxydation de l' $UF_4$  du sel en  **$UF_6$  (gazeux)**
- fixation de l' $UF_6$  sur des pièges NaF

## Le MSRE - traitement du sel



## Le MSRE - statistiques

	<sup>235</sup> U	<sup>233</sup> U	total
Temps équivalent pleine puissance	9005 h	4167 h	13172 h
Temps de circulation du combustible	15042 h	6746 h	21788 h
Temps de circulation du secondaire	16906 h	9170 h	26026 h
cycles de remplissage / vidange primaire	37	14	51
cycles de remplissage / vidange secondaire	13	6	19
$\% T_{crit}$	57	56	

### Phase de démonstration de disponibilité

- durée : 15 mois
- 80%  $T_{crit}$
- 6 mois continus sans vidange du sel

# Conclusions

- le programme sels fondus a été initié suite aux **besoins très exigeants** de l'avion à propulsion nucléaire
- l'**ARE** est construit et exploité, il démontre la **faisabilité** du concept **MSR**
- après l'abandon du programme militaire, un **programme civil** est initié
- le **MSRE** est construit et exploité
- démonstration de la **fiabilité** et la **sûreté** d'un MSR
- premier réacteur à fonctionner avec de l' $^{233}\text{U}$
- mise en œuvre des **fondations technologiques** pour les **MSR futurs**