

Réacteurs à sels fondus : un peu d'histoire

Centrale énergies

Dominique GRENECHE

Nuclear Consulting

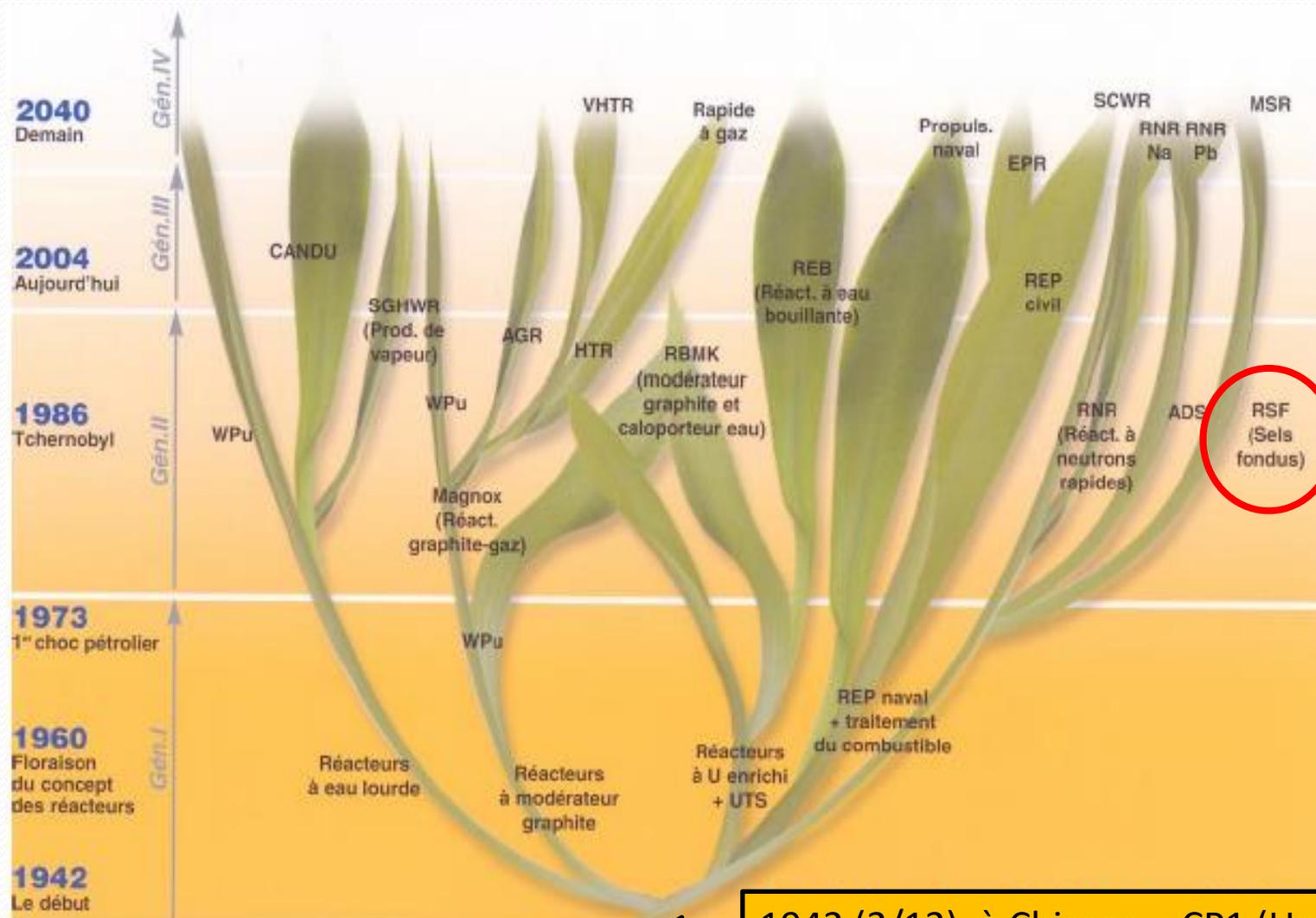
- Les différentes filières de réacteurs nucléaires
- Les précurseurs des réacteurs homogènes
- Naissance des réacteurs à sels fondus

Un peu de physique

- Le cœur d'un réacteur nucléaire c'est l'association de **TROIS** composantes:
 - Un « **milieu multiplicateur** » comprenant des noyaux atomiques « fissiles » : U235, Pu, U233 **LIQUIDE OU SOLIDE**
 - Un « **modérateur** » pour ralentir les neutrons (si nécessaire) : H₂O, D₂O, C, Be
 - Un **fluide caloporteur** (si nécessaire : dès que la puissance est > quelques kW) : liquide (eau, métal liquide (Na, NaK, Pb fondu, mercure), fluides organiques, sels fondus, ...) ou gaz (air, CO₂, N₂, He, ...)

Le phylum des réacteurs nucléaires

.. À la manière de « l'arbre » de développement lié à l'évolution des espèces (Darwin)



1942 (2/12), à Chicago : CP1 (Unat - C)

L'évolution des filières nucléaires

- **200 000** : nombre de **combinaisons possibles** de corps combustibles, de modérateurs et de réfrigérants sous différentes formes
- **1000** : combinaisons ayant fait l'objet d'**études**
- **100** : **projets** plus ou moins complets parmi ces 1000 combinaisons
- **30** : projets ayant fait l'objet d' **essais** en laboratoire ou de prototypes
- **17** : de ces projets ont été jusqu'à la construction et au fonctionnement de **réacteurs** producteurs d'énergie

(source : Claude Bienvenu , « l'aventure nucléaire » Explora, 1995 (page 61)

Obstacles et stimulants du passé

● Les déboires

- Ambitions excessives (propulsion aérienne)
- Problèmes techniques rédhibitoires (liquides organiques, C-Na)
- Les mauvais « timing » (HTR)
- Les accidents : Windscale (air), TMI (Babcock), RBMK (Tchernobyl)
- Incommodité (Q244)

● Les moteurs du développement

- Utilisation de l'uranium (RNR)
- La volonté d'indépendance (UNGG, MAGNOX, CANDU)
- L'agressivité industrielle (Westinghouse, General Electric)
- Le poids de l'histoire (CANDU)
- Les dualités et synergies militaires (propulsion, Pu)
- Les ruptures technologiques (HTR, métallurgie Zr,...)

Les réacteurs à COMBUSTIBLE LIQUIDE

- **AQUEUX** : la matière fissile **en solution ou en suspension** dans l'eau : nombreux prototypes, comme par exemple LAPRE avec inox plaqué or et platine (!), HRE d'Oak Ridge (150 b), le KSTR Hollandais à suspension (1 MWth) etc. Mais abandon de tous ces prototypes sur difficultés technologiques
- **METAL LIQUIDE** : U-Bi (Brookhaven), Fer-Pu ou Co-Pu fondus (dans des aiguilles) refroidis au sodium (Los Alamos),
Egalement abandonnés
- **SELS FONDUS** : Prototype ARE de 2,5 MW (1947), modérateur Be refroidi au sodium puis MSRE, 8 MW (1962) à modérateur graphite, puis projet MSBR de 1000 Mwe (début 70)

Les précurseurs des réacteurs à combustible liquide

- **Eté 1940** à Cambridge, **équipe française** (Kowarski et col.) : dispositif sous critique : sphère (60 cm), **D₂O** (112 l) + **poudre U₃O₈** (Unat) en suspension (« slurry »). Démontre qu'une réaction en chaîne est possible.
- Etudes poursuivies au Canada (avec B. Goldschmidt, Nov. 1942) à **partir de fin 1942**, avec un mélange appelé « mayonnaise » → **premiers concept de réacteurs homogènes à combustible liquide** avec **circulation de ce mélange** vers des échangeurs de chaleur ET pompage en ligne d'une fraction pour traitement et séparation des P.F. et du Pu pour recyclage. Mais problème radiolyse D₂O.

(1) - Fondateur des idées sur les réacteurs nucléaires « civils », il comprenait pas moins de trois prix Nobel : E. Fermi, J. Franck et E. Wigner (+ L. Szilard, A. Weinberg, W. Zinn).

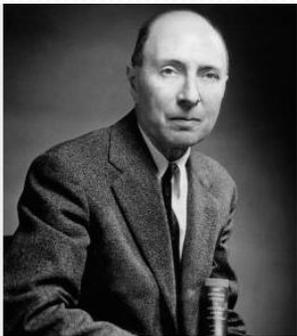
Les précurseurs des réacteurs homogènes

26 Avril 1944 « New pile committee » :

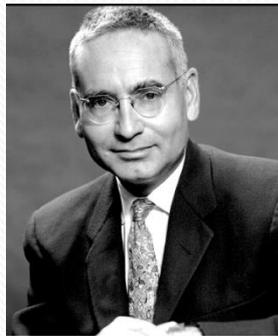
Fondateur des idées sur les réacteurs nucléaires « civils » ,

**il comprenait pas moins de trois prix Nobel : E. Fermi, J. Franck et E. Wigner
+ L. Szilard, A. Weinberg, W. Zinn.**

Eugène Wigner



Alvin Weinberg



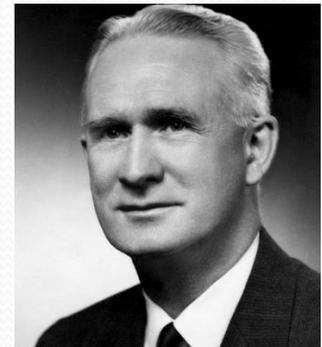
Enrico Fermi



Leo Szilard



Walter Zinn

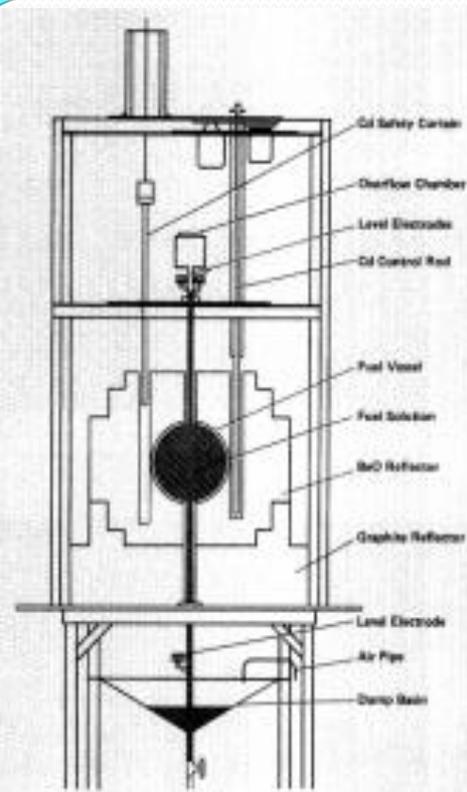


- Naissance du concept de réacteur « **surgénérateur** » : « mother plant » de Fermi (les ressources Unat sont alors estimées comme très rares).
- **Wigner et Weinberg** proposent chacun un modèle de réacteur **HOMOGENE à combustible liquide** D₂O-U233 (réacteur au **thorium**).

Liste des réacteurs identifiés par le « New Pile Committee » de 1944 (avril – mai)

Catégorie de réacteur	Présentateur du concept	Type de réacteur	
		Puissance	NATURE
Production de puissance	Fermi	1 MWé	Petits réacteurs modérés à D ₂ O pour « brûler » du plutonium
	Wigner	54 à 280 MW	Réacteur homogène pulsé (« pulsating ») utilisant une boue (« slurry ») d'oxyde d'U233 et de D₂O pompée vers un échangeur de chaleur par un gaz sous pression
	Vernon	Non précisée	Réacteur à haute température refroidi au gaz pour produire de l'électricité
Production de matière fissile et d'isotopes	Szilard	250 MWth	Réacteur surgénérateur à neutrons rapides avec de la matière fissile « enrichie », refroidi par un mélange liquide plomb-bismuth ou par du sodium
	Fermi	1000 MWth	« Mother plant » produisant du Pu239 pour utilisation dans de plus petits réacteurs. Trois concepts sont proposés : de type « Hanford », à modérateur D ₂ O homogène ou hétérogène, refroidi au sodium (convertisseur ou surgénérateur)
	Weinberg	60 MWth	A eau légère, avec de l'uranium enrichi pour produire du Pu239
	Weinberg	100 MWth	A D₂O, homogène, pour produire de l'U233 (donc en utilisant du thorium)
	Wigner	2750 à 3300 MWth	Réacteur analogue à celui de la production de puissance (pulsé) mais dédié à la production d'isotopes
Sources de radiations	Morrison	1 MWth	Réacteur modéré à l'eau légère mais avec réflecteur en béryllium (métal ou oxyde)

Pendant ce temps là..., à Los Alamos, réacteurs expérimentaux pour la mise au point de bombes atomiques



9/5/1944, LoPo (« Low Power)⁽¹⁾ : 4,5 kg de sulfate d'uranyle (U à 14%) puis en décembre (HyPo, 5,5 kW) à nitrate d'uranyle (UN) moins corrosif (sel très soluble dans l'eau)

1950: SuPo : sphère de nitrate d'uranyle UN (U à 88,8 %) entourée d'un réflecteur en graphite (35 kW, 60°C)

Photo montrant les serpentins de refroidissement



Les réacteurs à sels fondus : la préhistoire

- En **1940**, les physiciens britanniques Bretscher et Feather prédisent **(1)** qu'avec le Th232 peut produire de **l'U233 fissile**
- **Fin 1940**, des **recherches** sont engagées (sous la direction de G. Seaborg) pour affiner les connaissances sur le **thorium et sur l'U233** qui intéresse le projet Manhattan **(2)**. Ces travaux montrent notamment que **facteur de reproduction η** des **neutrons thermiques** de l'U233 est nettement supérieur à celui de U235 : 2,3 au lieu de 2,07
- **Fin 1944, Wigner** propose d'exploiter son idée de **réacteur convertisseur Pu** → U233 (cœur Pu, couvertures Th, refroidissement à l'eau légère, combustible solide) pour produire de l'U233 (utilisable pour faire des bombes, à la place du Pu239 « pollué » par du Pu240). Il était hostile aux RNR-Pu (trop de Pu)

(1) - sur des bases théoriques : modèle du noyau atomique de Bohr et Wheeler

(2) - Voir thèse « Thorium Research in the Manhattan Project Era » (478 pages)

En 1945, naissance des réacteurs à sels fondus (RSF)

- Mais avec du combustible solide, il faut « retraiter » périodiquement pour recycler le Pu → pertes à chaque étape → surgénérations compromise (Seaborg) → **combustible LIQUIDE ?**
- Les recherches sur ces réacteurs producteurs d'U233 sont cependant interrompues DANS LE CADRE DU PROJET MANHATTAN (1), mais elles vont se poursuivre pour les applications « civiles », notamment en vue de réacteurs **surgénérateurs à neutrons thermiques utilisant le cycle Th-U233 à combustible LIQUIDE** (idée première attribuée à Seaborg fin 1944).
- **Premier concept élaboré par Weinberg et Wigner**: « Preliminary calculation on a breeder with circulating fuel » - **17 mai 1945** (valeur précise de η de l'U233 (2) communiquée à Groves le 17 avril 1945 = 2,35)

(1) - à cause de l'U232 qui « pollue » l'U233 pour une utilisation dans une bombe (émission alpha)

(2) - Ironie de l'histoire : mesure réalisée en partie par Alan Nunn May, le célèbre espion que travaillait pour les soviétiques !

En résumé ...

Idée de base : développer un **surgénérateur** à neutrons « thermiques »

- en utilisant un **cycle thorium-U233**, pour mettre à profit les caractéristiques très favorables de l'U233 : $\eta = 2,3$.
- en **évitant le traitement et recyclages multiples** nécessité par des combustibles solides : Seaborg affirmait à l'époque qu'il n'existait aucun procédé chimique connu capable de garantir à grande échelle un taux de récupération de matière fissile dans les combustibles usés avec une efficacité proche de 100 % (> 99,9 %), jugée nécessaire pour espérer parvenir à cette surgénération **(1)**
- en **minimisant les captures stériles** de neutrons (structures, PF.)

Un réacteur à combustible liquide pouvant être retraité « en ligne » répondait très bien à ces exigences

➔ Idée presque obsessionnelle de Weinberg **(1)**

(1) : Livre de Weinberg : « The first nuclear era », P 116

Les réacteurs à combustible liquide

Les réacteurs d'Oak Ridge

Name	Thermal power, MW	Years operated
Air-cooled, graphite-moderated		
Graphite Reactor (Oak Ridge Pile, X-10 Pile)	3.5	1943–63
Aqueous homogeneous		
Homogeneous Reactor Experiment (HRE)	1.6	1952–54
Homogeneous Reactor Test (HRT)	5.0	1957–61
Molten salt		
Aircraft Reactor Experiment (ARE)	2.5	1954–55
Molten Salt Reactor Experiment (MSRE)	7.4	1965–69
Fast burst		
Health Physics Research Reactor (HPRR)		1963–87
Water cooled		
Low-Intensity Test Reactor (LITR)	1.5 (later 3.0)	1950–68
Bulk Shielding Reactor (BSR)	2.0	1950–87
Geneva Conference Reactor	0.1	1955 ←
Tower Shielding Reactor I (TSR-I)	0.5	1954–58
Tower Shielding Reactor II (TSR-II)	1.0	1958–92
Oak Ridge Research Reactor (ORR)	30	1958–87
High Flux Isotope Reactor (HFIR)	100 (now 85)	1965–

Aqueux

Sels fondus

Transporté à Genève
pour la conférence de
1955 (août)

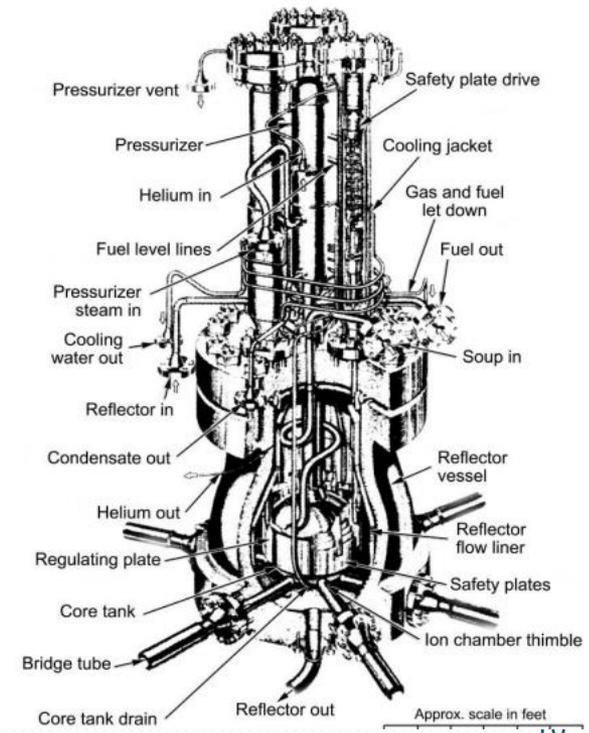
Le premier prototype de réacteurs homogènes à combustible liquide : HRE (Homogeneous reactor experiment)

Construit et mis en service en 1952 (15/4) à Oak Ridge : 1,6 MW max (1 MW en Fev. 1953)

- Combustible UO_2SO_4 (U à 93%) - H_2O
- Temp. 210°C / 250 °C
- Pression : 68 bars
- Réflecteur eau lourde
- Echangeur sel- eau permettant de produire de la vapeur alimentant une turbine : 140 kW_e

Note : coefficient de température TRES NEGATIF (expérience 10 MW en 1sec → retour à puissance nominale en 0,2 sec)

Document de référence : « *An Account of Oak Ridge National Laboratory's Thirteen Nuclear Reactors* » - ORNL/TM-2009/181

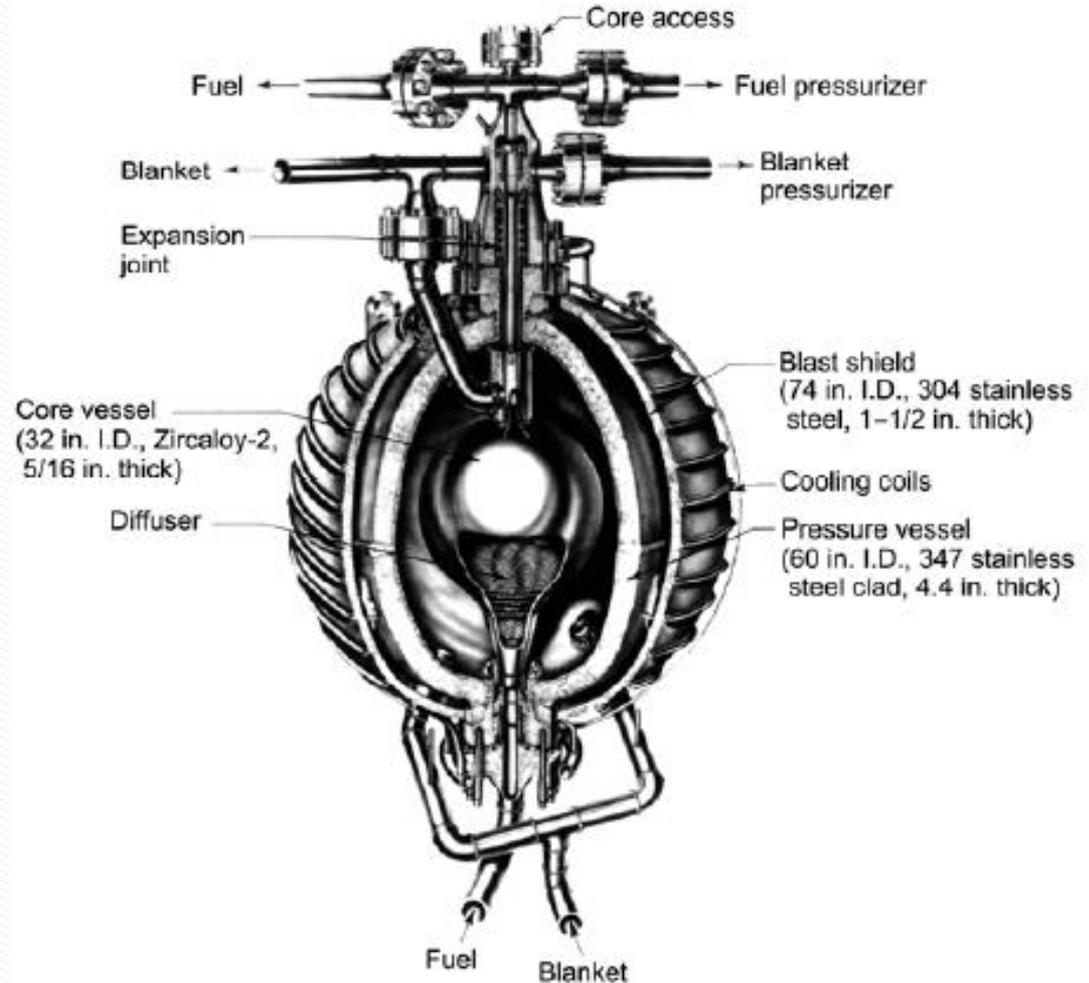
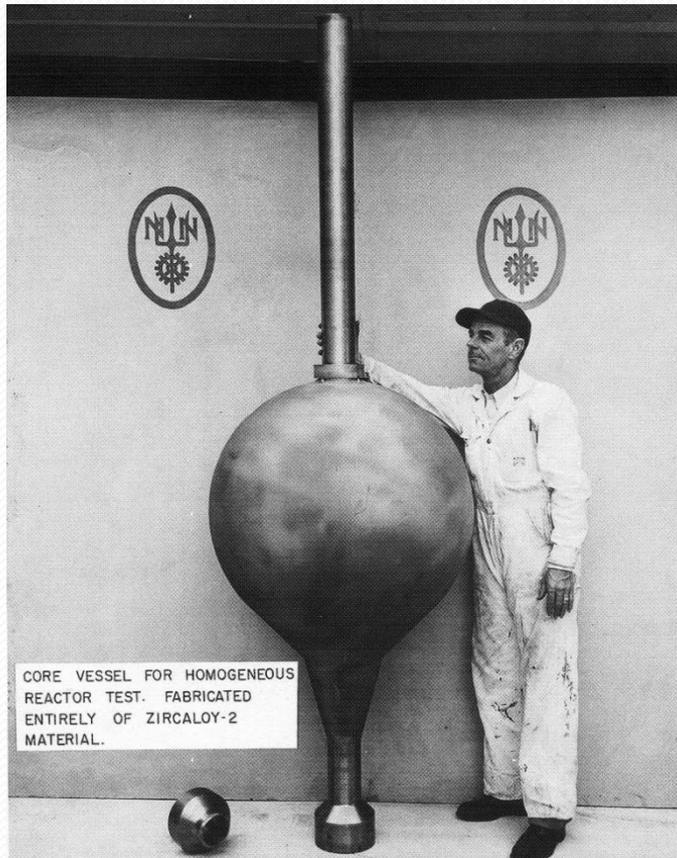


Le HRT (1) (Homogeneous Reactor Test) – 1/2

- L'expérience du HRE (et la collaboration avec Los Alamos sur SUPO) suscite de nombreuses voies d'amélioration pour le HRE, notamment en ce qui concerne la maintenance et le traitement en continu du sel (extraction du sel et produits de corrosion)
- Un nouveau réacteur est construit à la place du HRE : le HRT (→ appelé aussi HRE-2) : divergence le 27/12/1957, arrêté le 21 avril 1961 – Puissance 5 MW (= 4 fois HRE max)
- Caractéristiques principales
 - Combustible UO_2SO_4 (U à 93%) - D_2O (H_2O pour HRE)
 - Temp. 265 – 300 °C (+ 50 °C par rapport à HRE)
 - Pression 136 b (double du HRE)

(1) – Appelé aussi HRE-2

Le HRT (1) (Homogeneous reactor test) – 2/2



Enseignements :

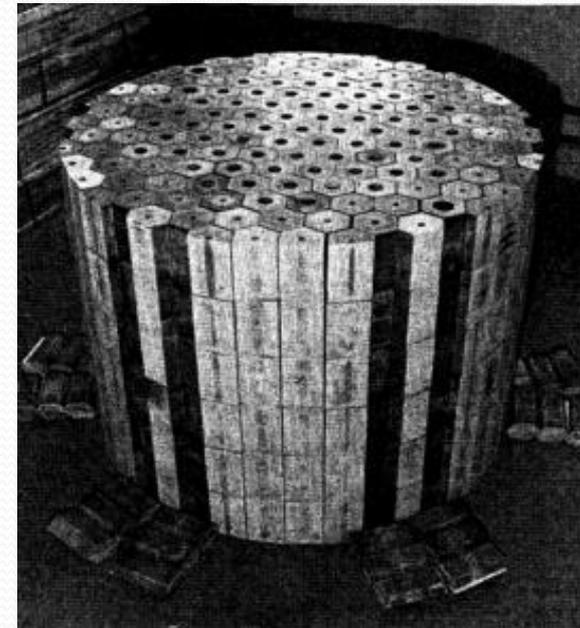
nombreux problèmes technologique (corrosion, percement cuve, oscillations / fluctuation de puissance inexpiquées, pertes d'uranium, ...) mais DEMONSTRATION de la FAISABILITE de ce type de réacteur

Le premier prototype de RSF : ARE

- En 1948, l'armée de l'air veut développer un avion à propulsion nucléaire : $T > 850^{\circ}\text{C}$ → chercher à atteindre ces hautes températures avec un **fluide sans pression (+ forte densité de puissance)**.
- **Weinberg**, à Oak Ridge (dépossédé, en 1948, de sa mission de R&D sur les réacteurs civils au profit de Argonne) propose (opportunément) un réacteurs à sels fondus : **Aircraft Reactor Experiment** : 1/11/1954 → Fin 1955 (arrêt prématuré car problèmes technologiques sur circuits sels)

Combustible : mélange fondu ($T > 500^{\circ}\text{C}$) de sels de zirconium et de fluorure de sodium, dans lequel était dissout le fluorure d'uranium fissile (U à 93%).

- Mélange peu corrosif, restant liquide à 1400°C (Patm.)
- Modérateur : briques hexagonales de BeO .
- Refroidissement sodium liquide avec échangeurs eau.
- Test de diverses compositions de sels fondus, et de nombreux alliages
- Puissance de 2,5 MW atteinte en 1954 – $T = 850^{\circ}\text{C}$ (100h)



Weinberg avec Kennedy et Al Gore – Visite à Oak Ridge Fev. 1959



Le MSRE : la référence pour les RSF (1/4)

- L'ARE ayant montré la faisabilité des RSF, ORNL (Weinberg) persuade l'AEC (« Atomic Energy Commission ») de poursuivre la R&D sur ce type de réacteur, en proposant deux versions (toutes deux avec modérateur en graphite) : une avec sels mixte U233-Th l'autre avec zone fissile (U233) et couverture fertile (Th).
- Les RSF sont alors en compétition avec le concept de Brookhaven à métal liquide (Uranium-Bismuth) : travaux démarrés en 1951
- Finalement, c'est le RSF (mais sans thorium) qui est « sélectionné » par l'AEC en 1959
- Début de construction en 1962, divergence le 1/6/1965

Le MSRE : la référence pour les RSF (2/4)

Quelques caractéristiques principales

- Sel fissile : 65% Li7F, 29.1%BeF4, 5% ZrF4, 0.9 % UF4 - Temp. fus. = 450 °C
- Matière fissile : U235 (1/6/1965) puis **U233** (2/10/1969) (et même du Pu à la fin)
- Modérateur : graphite (ARE : BeO).
- Echangeur Sel / Sel (66% Li7F, 34% BeF4 (ARE sodium liquide) puis sel/air
- Puissance de 7,4 MW (ARE 2,5 MW)
- Température : 635 °C – 663 °C

Installation de traitement du sel primaire simple (réservoir dans lequel le sel pouvait être aspergé de fluor pour extraire l'uranium).

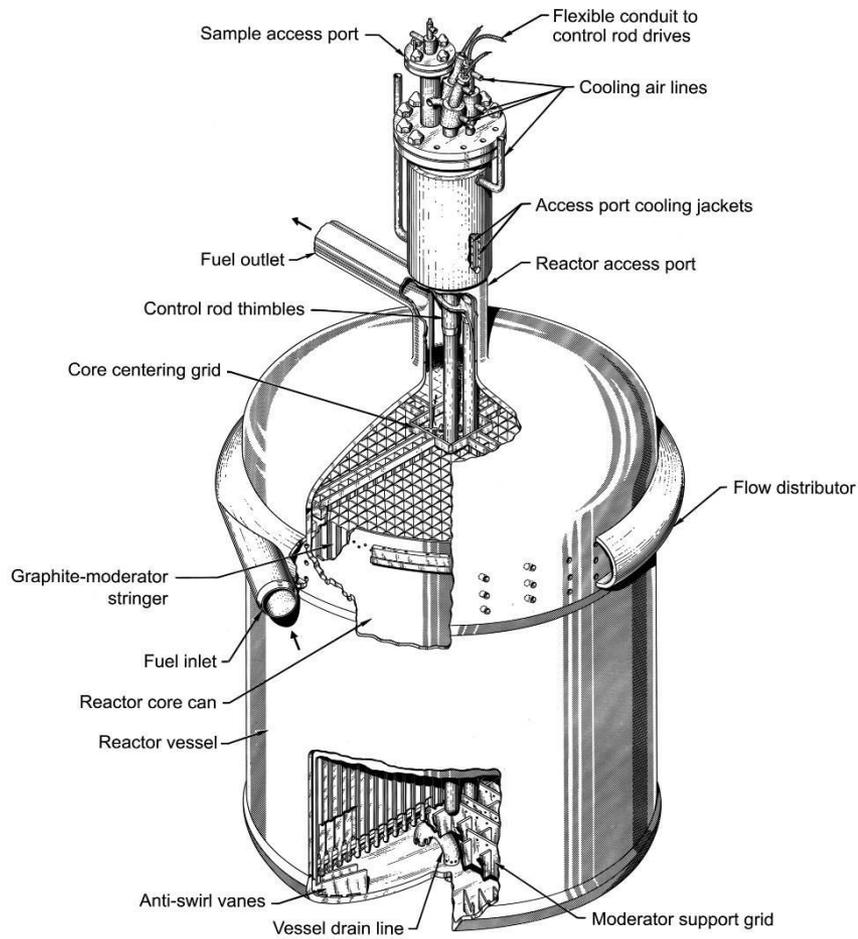
Quelque problèmes / enseignements

- ❖ Bouchages (circuits d'évacuation des gaz) : polymérisation de vapeurs d'huiles
- ❖ Rupture de pales de soufflantes du radiateur

MAIS, problèmes technologiques surmonté et dans l'ensemble fonctionnement à pleine puissance sur de longue périodes qui ont DEMONTRE la viabilité de ce type de réacteur

Arrêt en 1969 pour raisons budgétaires
Arrêt programme RSF en 1973 (priorité aux RNR-Na)

Le MSRE : la référence pour les RSF (3/4)



Le MSRE : la référence pour les RSF (4/4)

Gleen Seaborg, le « Patron » de l'AEC, aux commandes du MSRE le 10/10/1968 lors du **démarrage du réacteur en U233**



Lu dans « Alvin Weinberg's liquid fuel reactors

The Oak Ridge work was stopped when President Nixon decided instead to fund work on the solid-fuel liquid-metal fast breeder reactor in California. Weinberg wrote to NRC Commissioner Glenn Seaborg, “Our problem is not that our idea is a poor one, rather it is different from the main line and has too chemical a flavor to be fully appreciated by non-chemists.” Later Weinberg said “It was a successful technology that was dropped because it was too different from the main lines of reactor development.” Colleague Herbert MacPherson explained, “Political and technical support is too thin geographically. Oak Ridge is the only stakeholder.”

Réacteurs à combustible liquide : développements « post MSRE » et perspectives

- **USA** : projet **MSBR** (Molten Salt Breeder Reactor) – 1000 MWe
- **Pays bas** : divergence le 22/5/1974 d'un prototype expérimental de réacteur dont le combustible était constitué de fines particules (5 μm) d'UO₂ et ThO₂ en suspension dans de l'eau lourde : **KRST**
- **Ex-URSS** : travaux sur les RSF à partir du début des années 1970, qui se poursuivent **dans le cadre de Gen-IV**, mais pas de réalisation concrète de prototype.
- **Autres pays** (dont la **France, à partir de 1971 (1)**) : une vingtaine de pays sont cités dans le livre « Molten salt and thorium energy » (Woodhead publisher) mais aucun n'a réalisé de prototype de RSF. Mais **très nombreuses variantes étudiées** (intégrées ou à boucle, fluides secondaires divers (Pb), choix du sel, cœur avec ou sans modérateur à une ou deux zones, traitement du sel, etc.)

Poursuite active de travaux dans divers pays (dont la France),
notamment dans le cadre de Gen-IV

(1) : Réacteurs à sels fondus : synthèse des études réalisées – Hery – Lecocq – EDF-HT/12/74/83 et CEA 83/365

En guise de conclusion : avantages et inconvénients des RSF

Inconvénients ou difficultés



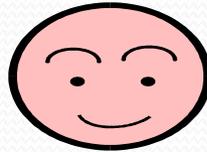
- **Matériaux métalliques** : **corrosion** en température des matériaux métalliques : coût élevé
- **Graphite** (si nécessaire) : **tenue sous irradiation** problématique
- Formation importante de **tritium** via (n, α) sur Li 7
- **R&D** requise **très importante** (en plus des matériaux) : chimie du sel (y compris traitement en ligne et recyclage), développements technologiques (échangeurs), maintenabilité et inspection du circuit primaire très radioactif, etc.
- Approche nouvelle de sûreté (plus que **2 « barrières »**)

+ craintes de Prolifération (Pu, U233) ?

Note : certains sont déjà cités dans le livre de Weinberg « The first nuclear era » (p. 118 à 125).
Il cite en outre: la fiabilité et la maintenance du circuit primaire très radioactif, le contrôle précis des inventaires en matières fissiles et leur précipitation possible,

En guise de conclusion : avantages et inconvénients des RSF

Avantages



- **Retraitement et renouvellement en ligne du combustible :** pas d'arrêt pour rechargement, pas d'absorbants de contrôle de la réactivité à long terme (elle est contrôlée par variation de la concentration en matière fissile), pas de transport de combustible irradié,
- Elimination de toutes les contraintes liées à un combustible solide avec gaine
- **Sûreté :** **par de crainte de fusion du cœur**, vidange passive du cœur, **pas de pression**, pas d'interaction violente sel / air-eau, **pas de PF gazeux dans le cœur (Iode)**, coefficient de température très négatif,
- **Surgénération possible en neutrons thermiques** (très bonne « économie de neutrons », pas de Xe par exemple) avec un faible inventaire fissile en cœur, Pa233 -> U233 à l'extérieur du cœur, absorbants de contrôle réduits, ...
- **Hautes températures** (700 °C) et pas de transfert thermique du combustible vers le caloporteur.

Thank you

Questions ?





COMPLEMENTS

RAPPELS SUR LES SELS (en chimie)

En chimie, un sel est un composé ionique composé de cations et d'anions formant un produit neutre et sans charge nette. Ces ions peuvent être aussi des minéraux (chlorures) qu'organiques (acétates $\text{CH}_3\text{-COO}^-$) et monoatomiques (fluorures, F^-) aussi bien que polyatomiques (sulfates) (SO_4^{2-}).

Les solutions de sels dans l'eau sont appelées électrolytes, car conductrices de l'électricité.

RAPPELS SUR LES SELS (en chimie)

Quelques cations courants formant des sels

ammonium NH_4^+

calcium Ca^{2+}

fer Fe^{2+} (ion fer II) et Fe^{3+} (ion fer III)

magnésium Mg^{2+}

potassium K^+

pyridinium $\text{C}_5\text{H}_5\text{NH}^+$

ammonium quaternaire NR_4^+

sodium Na^+

lithium Li^+

RAPPELS SUR LES SELS (en chimie)

Quelques anions courants formant des sels [[modifier](#) | [modifier le code](#)]

(Le nom de l'[acide](#) parent est entre parenthèses)

[acétate](#) $\text{CH}_3\text{-COO}^-$ ([acide acétique](#))

[carbonate](#) CO_3^{2-} ([acide carbonique](#))

[chlorure](#) Cl^- ([acide chlorhydrique](#))

[citrate](#) $\text{HO-C(COO}^-\text{)(CH}_2\text{-COO}^-\text{)}_2$ ([acide citrique](#))

[cyanure](#) $\text{C}\equiv\text{N}^-$ ([acide cyanhydrique](#) ou [cyanure d'hydrogène](#))

[hydroxyde](#) HO^- ([Eau](#))

[nitrate](#) NO_3^- ([acide nitrique](#))

[nitrite](#) NO_2^- ([acide nitreux](#))

[oxyde](#) O^{2-} ([Eau](#))

[phosphate](#) PO_4^{3-} ([acide phosphorique](#))

[sulfate](#) SO_4^{2-} ([acide sulfurique](#))

RAPPELS SUR LES SELS (en chimie)

Les sels sont formés par réaction entre :

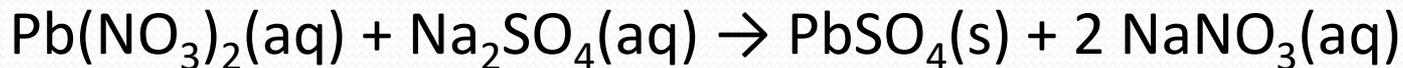
une base et un acide : $\text{NH}_3 + \text{HCl} \rightarrow \text{NH}_4\text{Cl}$

un métal et un acide : $\text{Mg} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{MgSO}_4 + \text{H}_2$

une base et un anhydride acide : $2 \text{NaOH} + \text{Cl}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NaClO} + \text{H}_2\text{O}$

un acide et un anhydride basique : $2 \text{HNO}_3 + \text{Na}_2\text{O} \rightarrow$
 $2 \text{NaNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

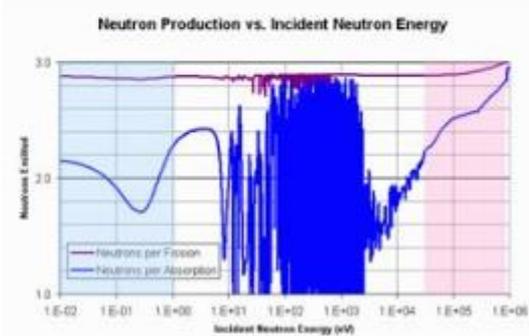
Les sels peuvent aussi se former si des solutions de différents sels sont mélangées ensemble. Les ions se recombinent alors et de nouveaux sels insolubles se forment et précipitent :



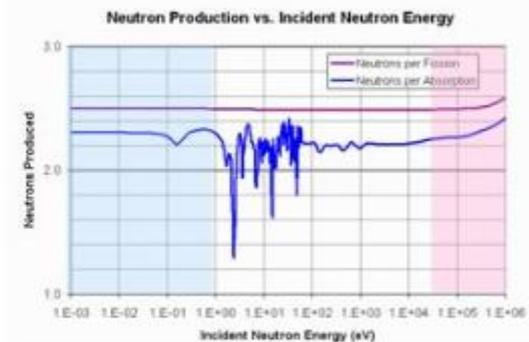
1944: A tale of two isotopes...



- ◆ Enrico Fermi argued for a program of fast-breeder reactors using uranium-238 as the fertile material and plutonium-239 as the fissile material.
- ◆ His argument was based on the breeding ratio of Pu-239 at fast neutron energies.
- ◆ Argonne National Lab followed Fermi's path and built the **EBR-1** and **EBR-2**.



- ◆ Eugene Wigner argued for a thermal-breeder program using thorium as the fertile material and U-233 as the fissile material.
- ◆ Although large breeding gains were not possible, **THERMAL** breeding was possible, with enhanced safety.
- ◆ Wigner's protégé, Alvin Weinberg, followed Wigner's path at the Oak Ridge National Lab.





Eugene Wigner et Alvin Weinberg

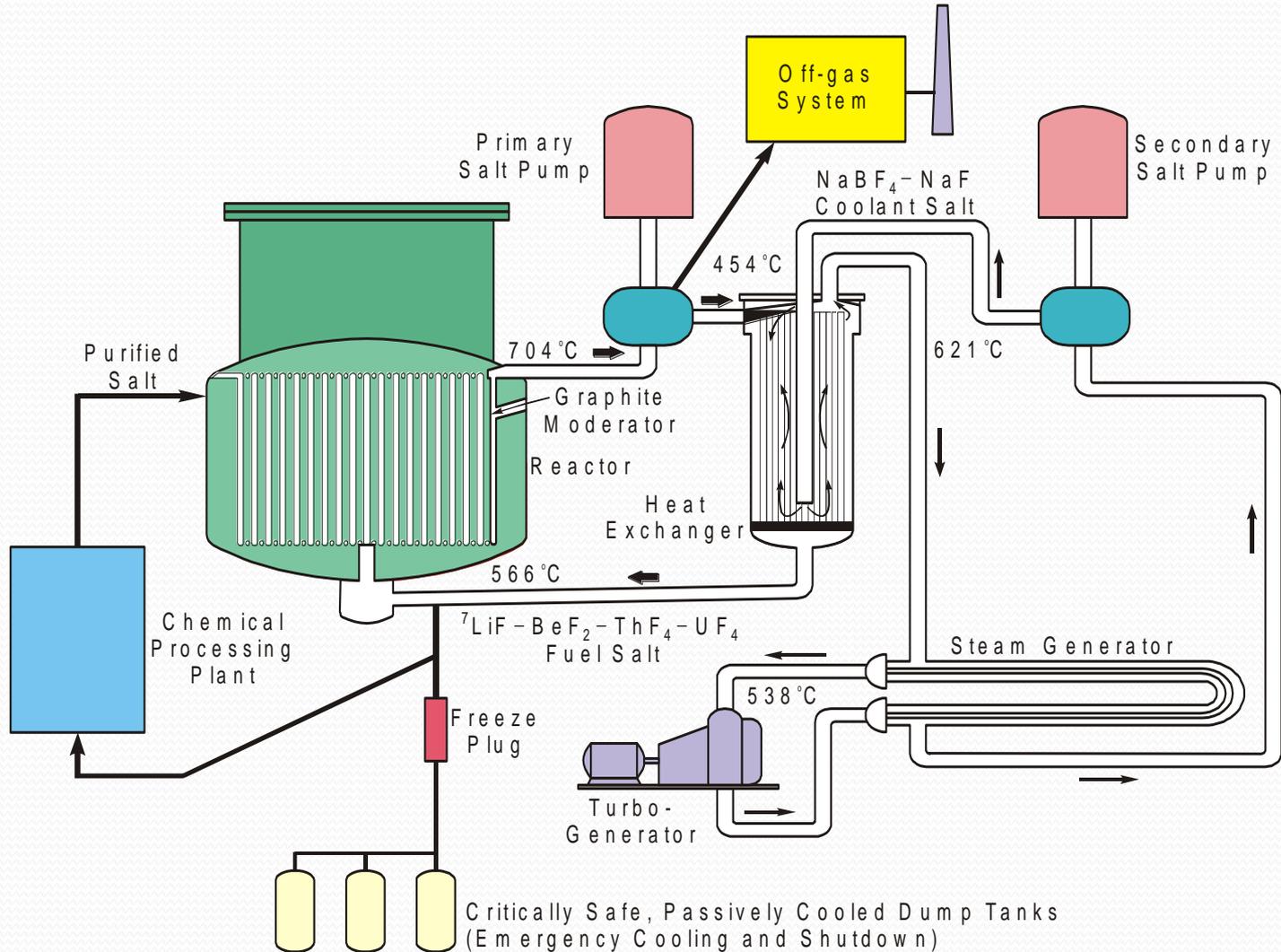


Weinberg avec John F. Kennedy (sénateur) à Oak Ridge en 1959



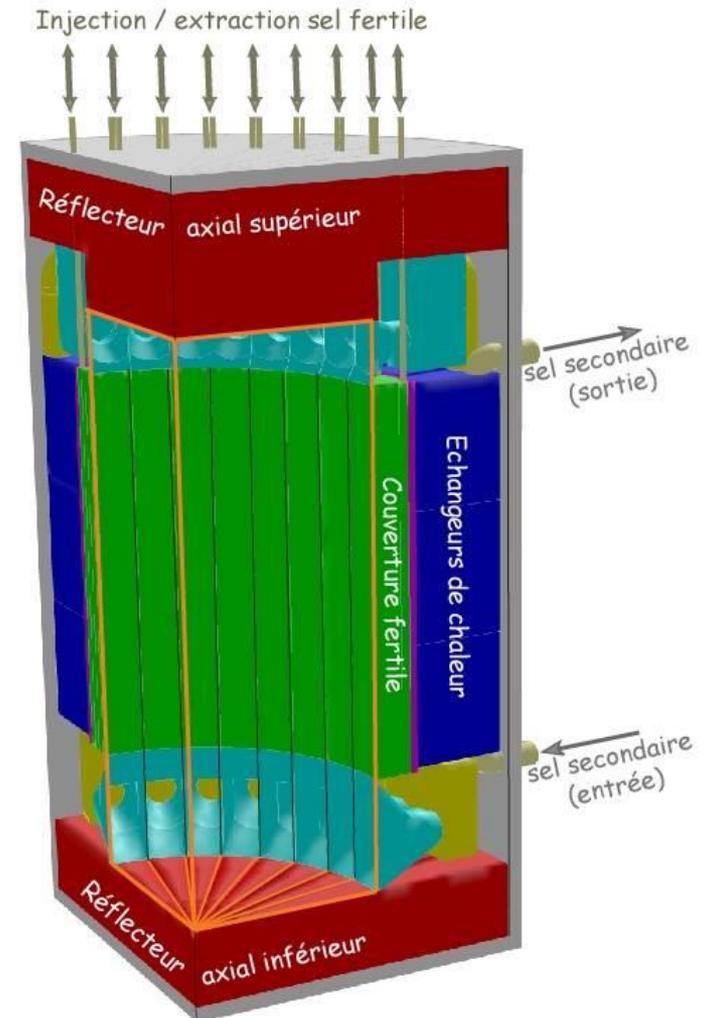
Le concept "MSBR" (Oak Ridge)

UNE IMAGE DE RÉFÉRENCE : LE CONCEPT MSBR



Exemple de concept MSR (Molten Salt Fast Reactor)

- Sel initial: 77,5%LiF, 20%ThF₄, 2,5%²³³UF₄ – T = 700 à 850 °C
- Puissance: 3 GW_{th} (1,5 GW_{él})
- Inventaire initial d'²³³U par réacteur: 5060 kg (3370 kg/Dwel)
- Volume de sel: 18 m³
 - Dont 50% cœur et plenums et 50% échangeurs et tuyaux
- Retraitement du cœur: 40 l/j ou moins
- Diamètre intérieur du cœur: 2,26 m
- Hauteur cœur plus plenums: 2,26 m (plenums = 2 fois 0.16m)
- Epaisseur de la couverture: 50 cm
- Volume de sel couverture: 7,7 m³ (77,5%LiF, 22,5%ThF₄)
- Retraitement de la couverture: 40 l/j ou moins
- Coefficient de température: de -5,3 à - 4,8 pcm/K
 - Densité: de -3,7 à -3,3 pcm/K - Doppler: de -1,6 à -1,5 pcm/K
- Production d'²³³U: 95 kg/an à 40 l/j de retraitement
- Temps de doublement: 56 ans à 40 l/j de retraitement



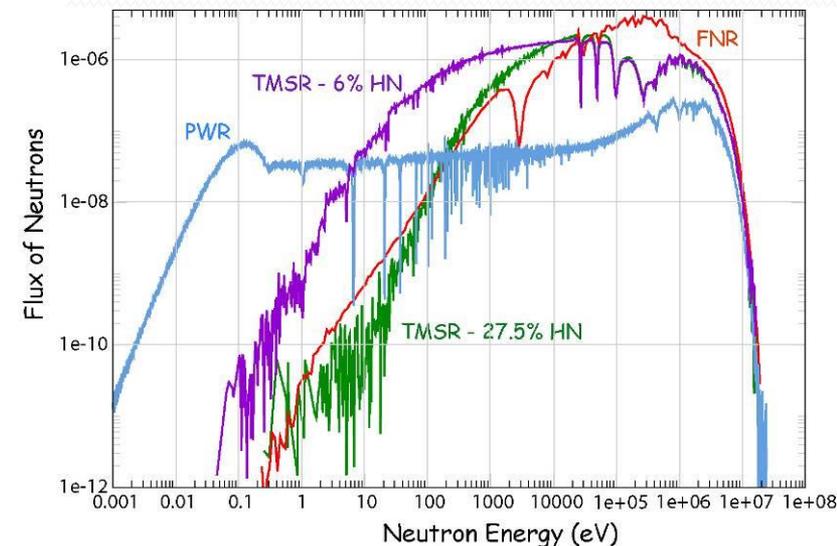
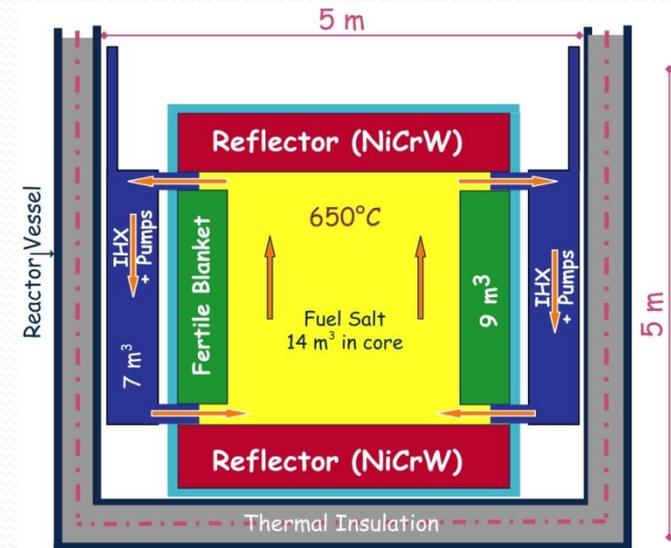
Le Concept TMSR du CNRS

Le concept est simple

Dimensions caractéristiques pour un réacteur De 2.5GWth ou 1GWe

- Volume de sel : 20 m^3 (1/3 hors réacteur)
- Mean Operating Temperature: 750 K
- Rayon Coeur: 1.25
- Hauteur Coeur : 2.6 m
- Sel : 80% LiF + X%(Heavy Nuclei)F₄ +

Le réacteur est non-modéré
Comparaison des spectres de
1) PWR (bleu)
3) RNR (rouge)
4) TMSR (violet et vert)



Les grandes familles de filières

- Les filières se classent assez bien en 2 grandes catégories :
 - Les réacteurs des **physiciens**, hétérogènes (combustible séparé du modérateur et / ou du caloporteur)
 - Les réacteurs des **chimistes**, homogènes
- La conception des réacteurs de **hétérogènes** doit s'appuyer beaucoup sur celle des **combustibles** qui sont des objets technologiques très élaborés, sur lesquels reposent les performances de fonctionnement et la sûreté. Le cycle de combustible est par ailleurs compliqué.
- Dans les réacteurs **homogènes**, on supprime l'élément combustible (pas de gaine) qui est sous forme fluide, mais on reporte les difficultés technologiques (notamment l'étanchéité et le confinement) sur **l'enveloppe primaire**. L'avantage majeur est la possibilité de retraiter le combustible « en ligne »

Les RSF sont l'un des 6 « Systèmes » de Gen-IV

Rappel du « Cahier des charges » initial des réacteurs de Gen-IV :

- « déployables » à l'horizon 2030
- Avancées significatives en terme de :
 - Durabilité (déchets, ressources)
 - Sûreté et fiabilité
 - prolifération et protection physique
 - Économie
- Compétitifs sur différents marchés
- Qui s'ouvrent à différentes applications énergétiques non électrogènes: hydrogène, chaleur, dessalement, ...



Schéma du MSR

