

Projet FrenchTeamMSFR

La communauté française qui développe le MSFR (Molten Salt Fast Reactor)

Atelier bilan des 15 et 16 décembre 2016

LPSC/IN2P3/Grenoble

SIMAP/Grenoble-INP

G-Scop/Grenoble-INP

INOPRO-IAO/PME

SUBATECH/IN2P3/Nantes

IPN/IN2P3/Orsay

LAGA Institut Galilée, Paris XIII

AREVA

EDF

Daniel Heuer, Michel Allibert, Delphine Gérardin, Elsa Merle

Olivier Doche

Jean-Marie Flaus

Hervé Rouch, Olivier Geoffroy

Lydie Giot

Sylvie Delpech, Nicole Barré, Gabriéla Duran, David Rodrigues

Olivier Lafitte

Bernard Carluéc, Stéphane Beils, Alain Gerber

David Lecarpentier, Enrico Girardi

Réacteurs nucléaire à combustible liquide

Quelles sont les contraintes sur le type de liquide ?

- **Transparence aux neutrons**
- **Température de fusion pas trop élevée**
- **Température d'ébullition suffisamment élevée**
- **Tension de vapeur faible**
- **Bonnes propriétés thermiques et hydrauliques**
- **Stabilité du liquide sous irradiation**
- **Solubilité des éléments fissiles et fertiles suffisante**
- **Pas de production de radio-isotopes difficilement gérables**
- **Possibilité d'un retraitement du combustible**

Au final seuls les fluorures de Lithium 7 sont possibles

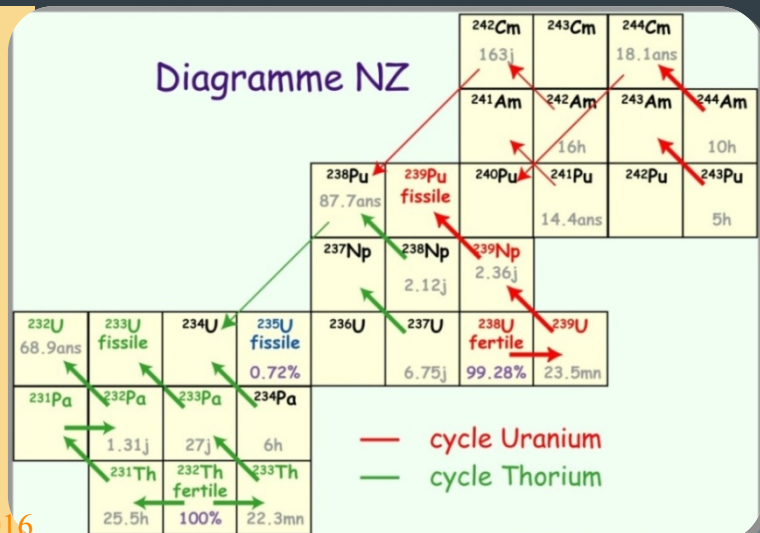
Réacteurs à sels fondus

Les propriétés neutroniques du fluor sont défavorables au cycle uranium

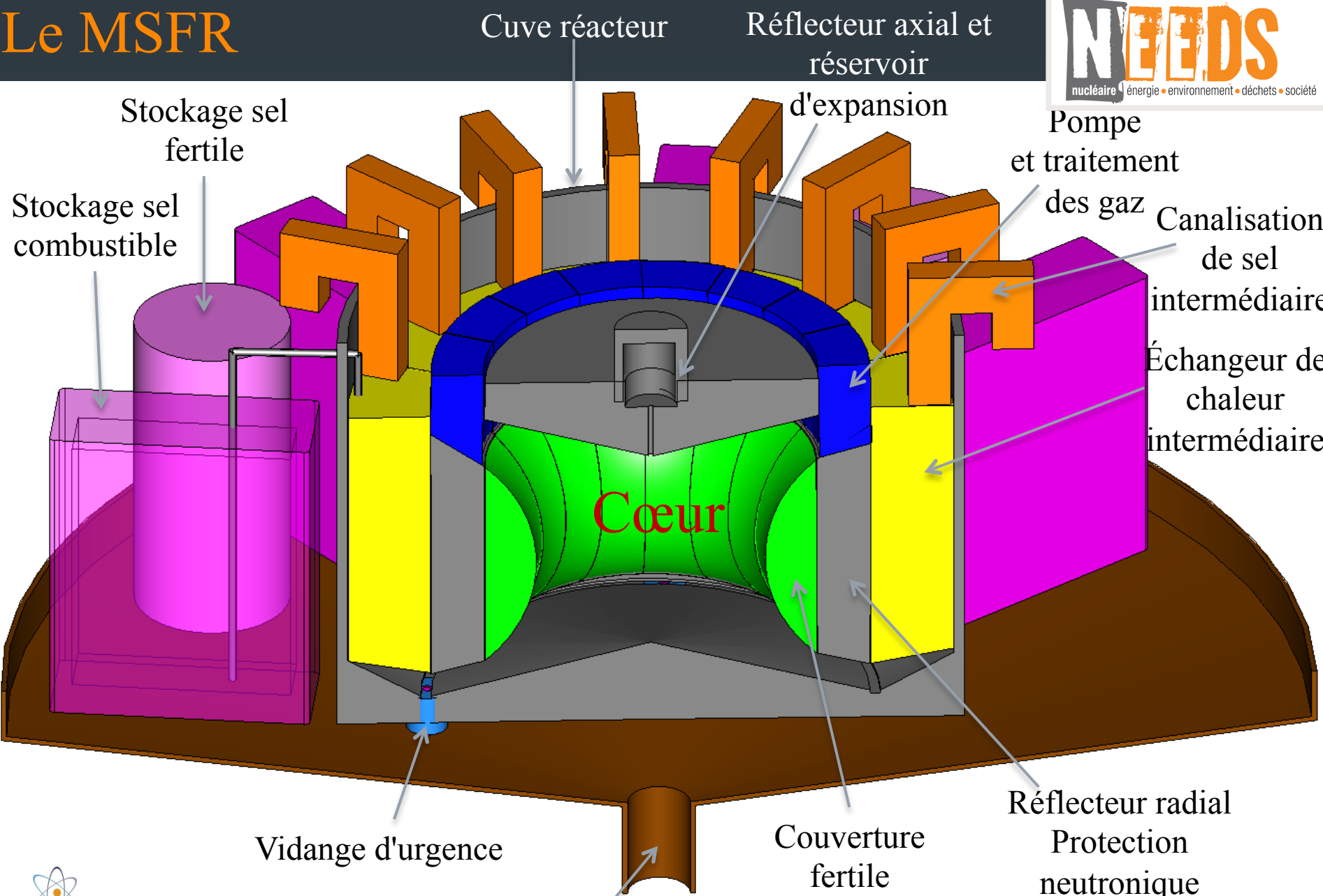
Cycle Thorium

Quels sont les avantages d'un combustible liquide ?

- **Homogénéité du combustible (pas de plan de chargement)**
- **Chaleur produite directement dans le caloporteur**
- **Possibilité de reconfigurer le cœur en quelques minutes**
 - Une première configuration permet d'optimiser la production d'énergie en gérant le risque de criticité
 - Une deuxième configuration permet un stockage avec refroidissement passif
- **Possibilité de retraiter le combustible sans arrêter le réacteur**
 - Pas de réserve de réactivité
 - Meilleure gestion des produits de fission neutrophages
 - Besoin d'un seul inventaire fissile initial



Le MSFR



Collecteur de sel combustible pour la vidange d'urgence

Le MSFR de référence

- Sel initial : 77,5%⁷LiF- 20%ThF₄-2,5%²³³UF₄
- Température du sel combustible : 650 à 750 °C
- Température maximum des parois : 700 °C
- Puissance : 3 GW_{th} (1,4 GW_{él})

- Inventaire initial d'²³³U par réacteur : 5060 kg
- Inventaire initial d'²³³U par GW_{él} : 3610 kg

- Volume de sel combustible : 18 m³
 - 1/2 dans le cœur
 - 1/2 dans les échangeurs et tuyaux

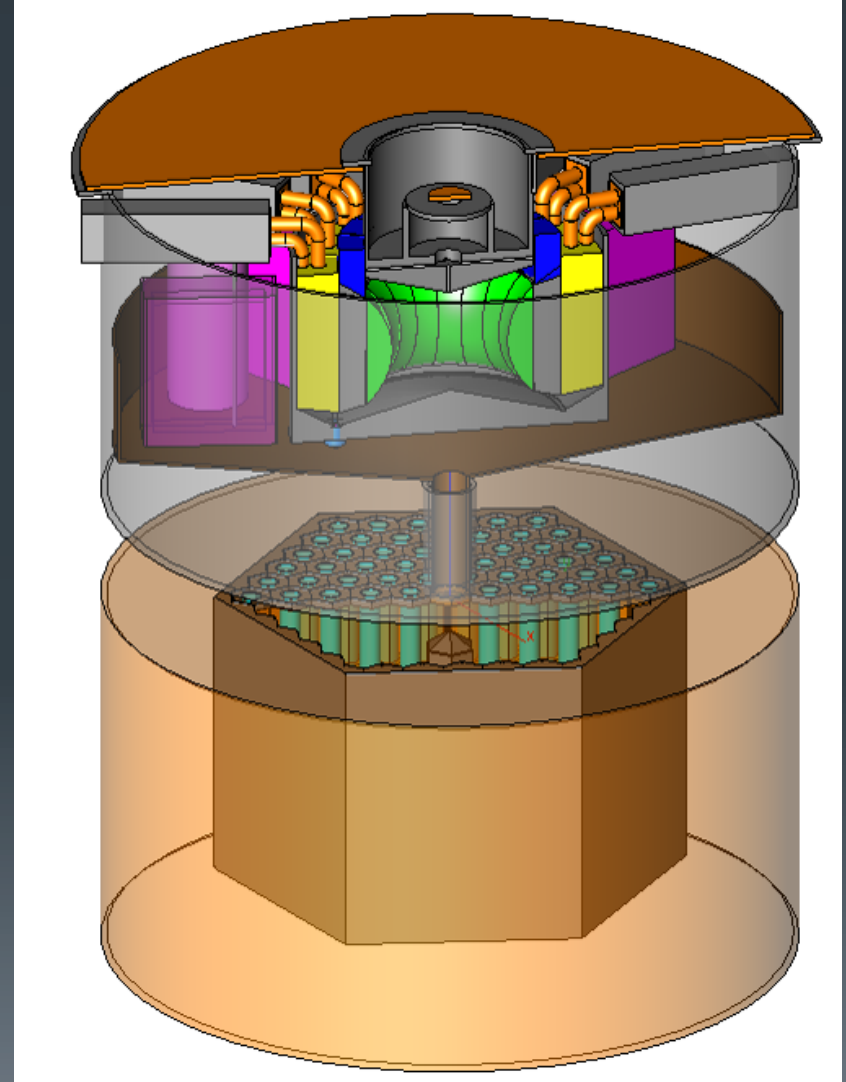
- Retraitement du cœur : 10 à 40 l/j

- Diamètre intérieur moyen du cœur : 2,26 m
- Hauteur moyenne du cœur : 2,26 m

- Epaisseur de la couverture fertile : 50 cm
- Volume de la couverture : 7,3 m³
- Sel de la couverture : 77,5%⁷LiF,-22,5%ThF₄
- Retraitement de la couverture : 40 l/j

- Coefficient de contre réaction: 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 : 50 à 95 kg/an
- Temps de doublement : 55 à 100 ans



Le projet FrenchTeam MSFR



- Reconstitution d'une partie de la communauté mise en place par le PCR-ANSF de PACEN
 - Ce projet a permis à ses partenaires de se coordonner, préparer et obtenir le projet Européen SAMOFAR entièrement orienté autour des études de sûreté du MSFR
 - Il a aussi permis de répondre à des demandes d'informations sur le MSFR par des instances nationales et internationales
 - Agence Internationale de l'Énergie Atomique
 - Groupe d'experts Risk and Safety Working Group du Forum International Gen-IV
 - Groupement Consultatif Français de Sûreté
- 10 partenaires concernés par l'étude du MSFR (sujets étudiés en 2016)
 - LPSC (équipe MSFR) - Coordination
 - Études de sûreté, résistance à la prolifération
 - SIMAP Grenoble-INP
 - Action d'un champ magnétique sur l'écoulement du sel combustible
 - AREVA
 - Rédaction d'un document de synthèse sur les RSF : "Motivations et choix de base pour le concept de réacteur à sels fondus"
 - EDF
 - Expert industriel
 - IRSN (jusqu'en 2015)
 - Expert sûreté
 - IPN-Orsay, IN2P3 (depuis 2016, avant: projet ChimieMSFR)
 - Chimie du zirconium et de l'iode dans le sel combustible
 - SUBATECH Nantes, IN2P3 (depuis 2016)
 - Échauffement par rayonnement gamma
 - G-SCOP Grenoble-INP
 - Analyse systémique de risque appliquée au MSFR
 - INOPRO-IAO (PME) (non financé en 2016)
 - Géométries alternatives
 - LAGA Institut Galilée Université Paris XIII (depuis 2016)
 - Cinétique pointuelle analytique

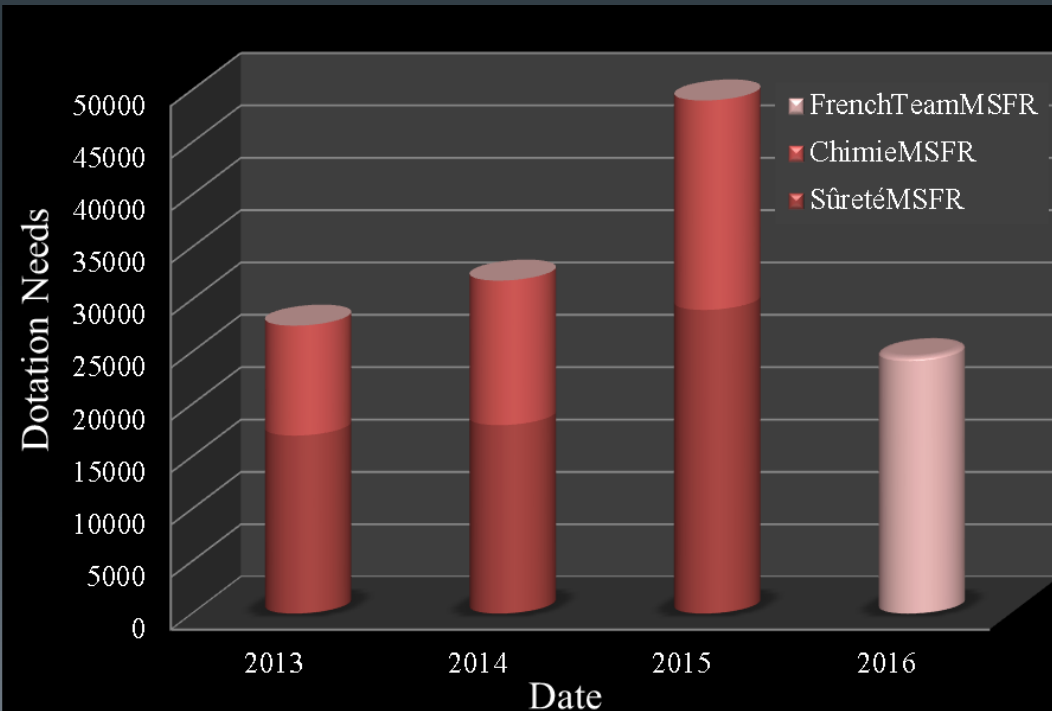
Organisation d'ateliers nationaux
2014 : au LPSC (Grenoble)
2015 : à l'IRSN (Paris)
2016 : à AREVA (Lyon 02/02/2017)

Budget annuel depuis 2013

- Jusqu'en 2015, deux projets représentait le MSFR :
 - SûretéMSFR
 - ChimieMSFR
- En 2016 ces deux projets ont fusionnés
 - Il en a résulté une baisse globale de la dotation !
- Ce budget a été connu début juillet
 - Il était largement trop tard pour organiser des stages M1 ou M2
 - C'était pourtant l'essentiel des demandes

On peut tout de même présenter quelques résultats

Dans ces conditions il n'a pas été possible de réaliser tous ce que l'on souhaitait faire !

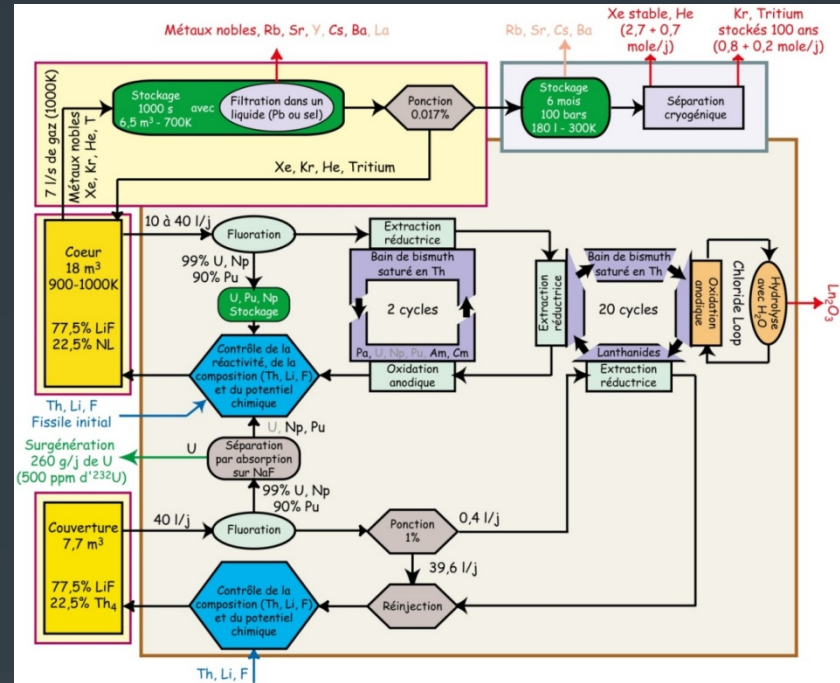


La chimie de l'Iode et du Zirconium

- Présentation par Sylvie Delpech

Interfaçage du code Monte-Carlo évoluant REM couplé à la chimie du combustible (LPSC)

- Dans le cadre d'un stage M1 une interface intuitive à été développer pour facilité l'accès au code REM
 - Exemple avec le couplage à l'unité de retraitement
- L'interface est automatiquement alimentée par toutes les simulations déjà réalisées
 - Le but est de rendre le code REM accessible à l'ensemble de la collaboration



OngletGeneral
BullageCoeur
BullageCouverture
Fluoration
Fluoration2
SeparationLanthanides
Actinides
Usine n°1
Usine n°2
TEST

Veuillez entrer le nom de l'usine

Sélectionnez le composant à ajouter

- Stockage
- Reservoir
- Echangeur
- Pompe
- Injection
- Extraction
- Bullage

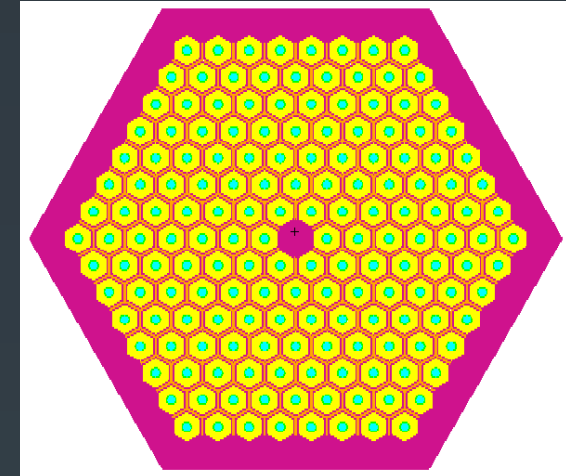
Si vous souhaitez ajouter une usine ...

Cliquez sur supprimer pour supprimer le composant sélectionné ci dessous

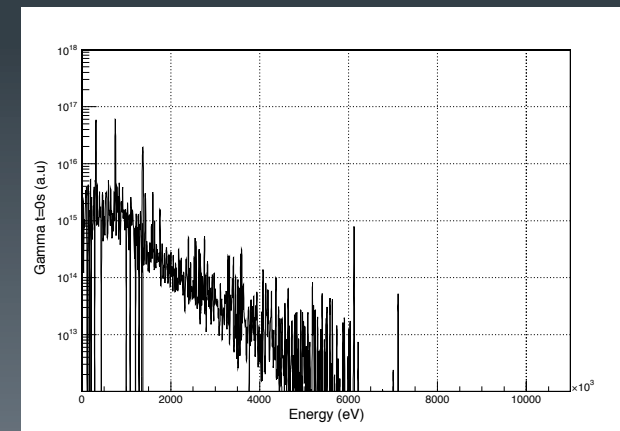
Ok

Transfert de chaleur par gamma (Subatech)

- Le volume de sel dans le réservoir de vidange d'urgence est faible par rapport au volume total
 - Le transfert d'énergie par les gammas devient alors important
 - Le but est d'évaluer la quantité de chaleur directement déposé hors sel par ces gammas
- La méthode suivi consiste à évaluer le spectre gammas en fonction du temps puis de suivre ces gammas dans le réservoir avec le code Monte-Carlo MURE
 - Subatech a déjà une grande expertise en la matière
 - MURE a été utilisé pour calculer le fond gamma dans le réacteur OSIRIS
 - Calcul d'irradiation gammas dans des colis de déchets nucléaires (chaire industrielle)
- Réalisation en 2016
 - Codage de la géométrie du réservoir avec MURE
 - Détermination du spectre gammas en fonction du temps
- Reste à réaliser
 - Le transport des gammas dans le réservoir



Section transverse du réservoir de vidange (MURE)

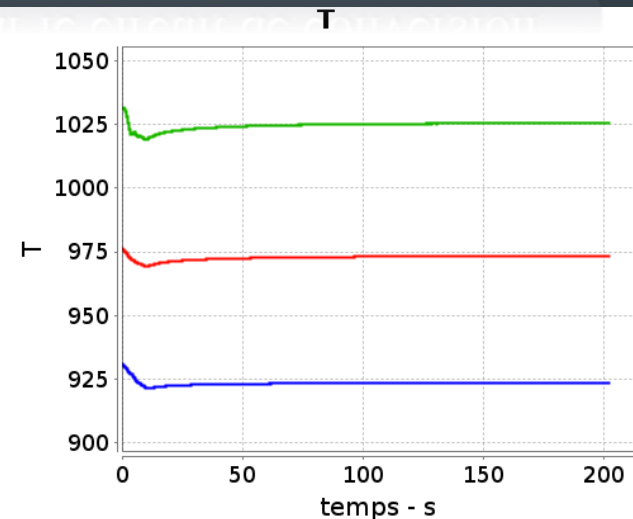
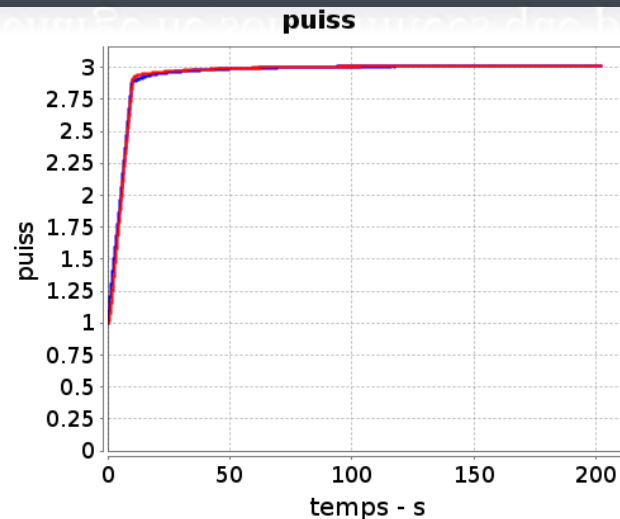
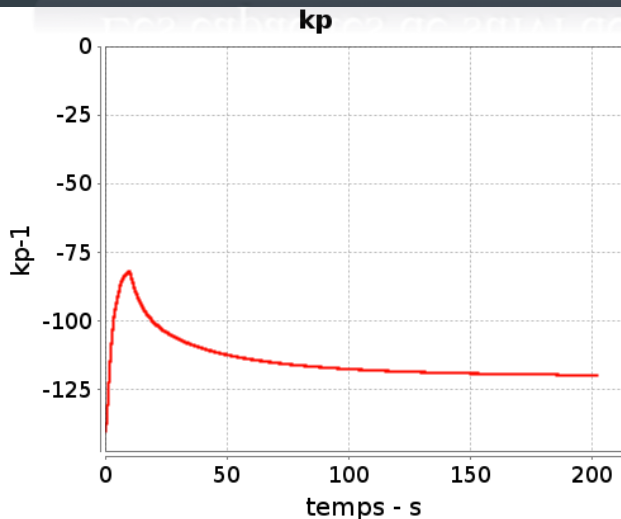


Exemple de spectre gamma

Utilisation du couplage neutronique/thermo-hydraulique développé précédemment (LPSC)

- Suivi de charge de 1 GW à 3 GW en 10 secondes
 - Variation de concert du débit de la pompe et de la température du fluide intermédiaire.
 - Il s'agit de maintenir l'écart de température constant en cœur durant le suivi de charge.
- La puissance en cœur suit parfaitement la puissance demandée
 - Courbes bleue et rouge superposées
- Les températures du sel combustible ne varient que de quelques degrés
 - Les températures des matériaux de structure varient encore moins !

Il est clair que le circuit de conversion ne peut pas suivre un tel rythme
Les capacités de suivi de charge ne sont limitées que par le circuit de conversion



- Les conditions d'attribution du budget ne permettent pas d'être suffisamment efficace
 - Il faudrait un projet thématique pluriannuel
- De 2004 à 2011 on disposait d'un programme (PCR-ANSF) doté de 250 k€ par an
 - Ce programme a permis de mettre en place le projet MSFR
 - Constitution d'une communauté
 - Acquisition des compétences
 - Découverte du concept
 - Obtention du projet Européen EVOL qui a ensuite mené au projet SAMOFARs
 - Ce programme reposait sur un conseil scientifique qui
 - Évaluait les besoins
 - Identifiait et motivait les équipes pouvant satisfaire ces besoins
 - Validait les avancés par la production de documents de synthèse
- Les compétences sont toujours là...