

Systeme de vidange d'urgence : études de thermique et de criticité

DELPHINE GÉRARDIN, DANIEL HEUER, ELSA MERLE, AXEL LAUREAU, MICHEL ALLIBERT, CAROLE SEUVRE
GROUPE MSFR, LPSC-IN2P3-CNRS, 53 RUE DES MARTYRS, 38026 GRENOBLE, FRANCE

ATELIER NEEDS MSFR
2 FEVRIER 2017



Plan

Introduction

- Objectifs des études
- Description du système

I. Etudes dans le réservoir de vidange

- Etudes de thermique dans le réservoir de vidange
- Géométrie du réservoir de vidange
- Etudes paramétriques de criticité dans le réservoir

II. Etudes dans le conduit et le collecteur

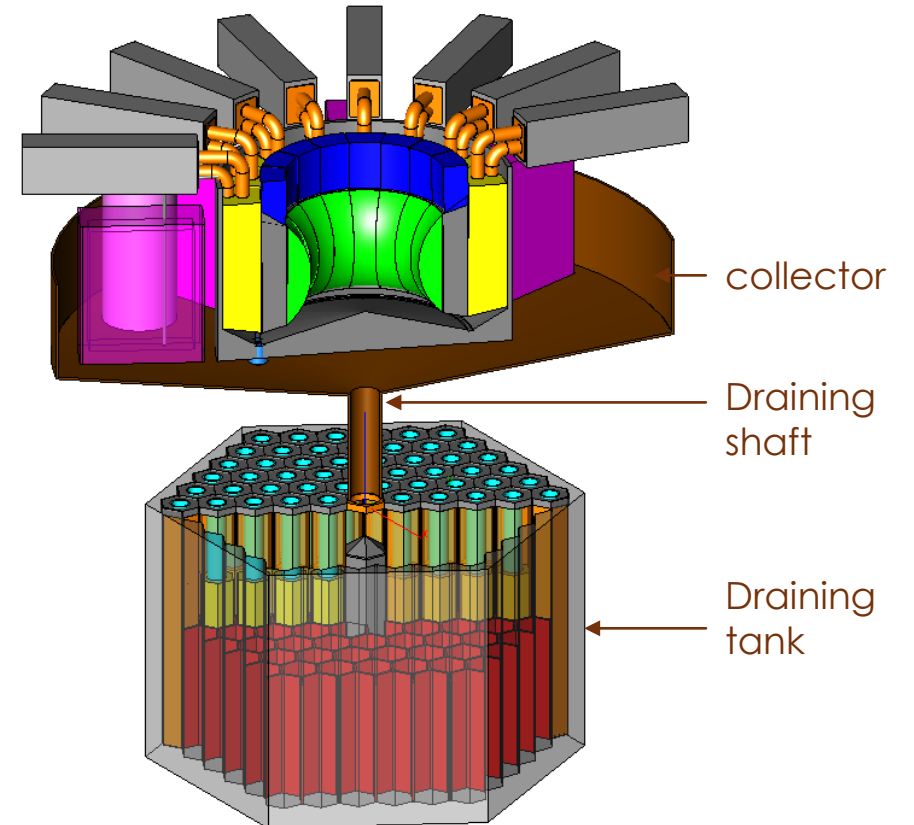
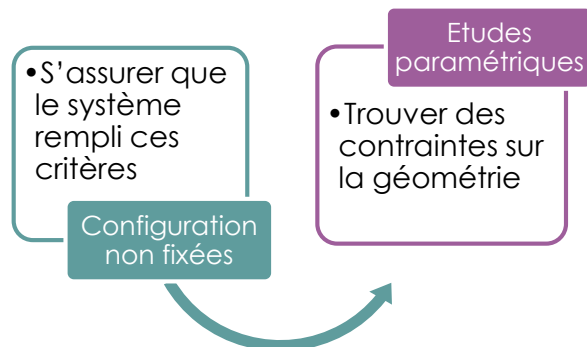
- Etudes de criticité dans le conduit de vidange
- Etudes de criticité dans le collecteur
- Etude de criticité dans le système de transfert

Conclusion & perspectives

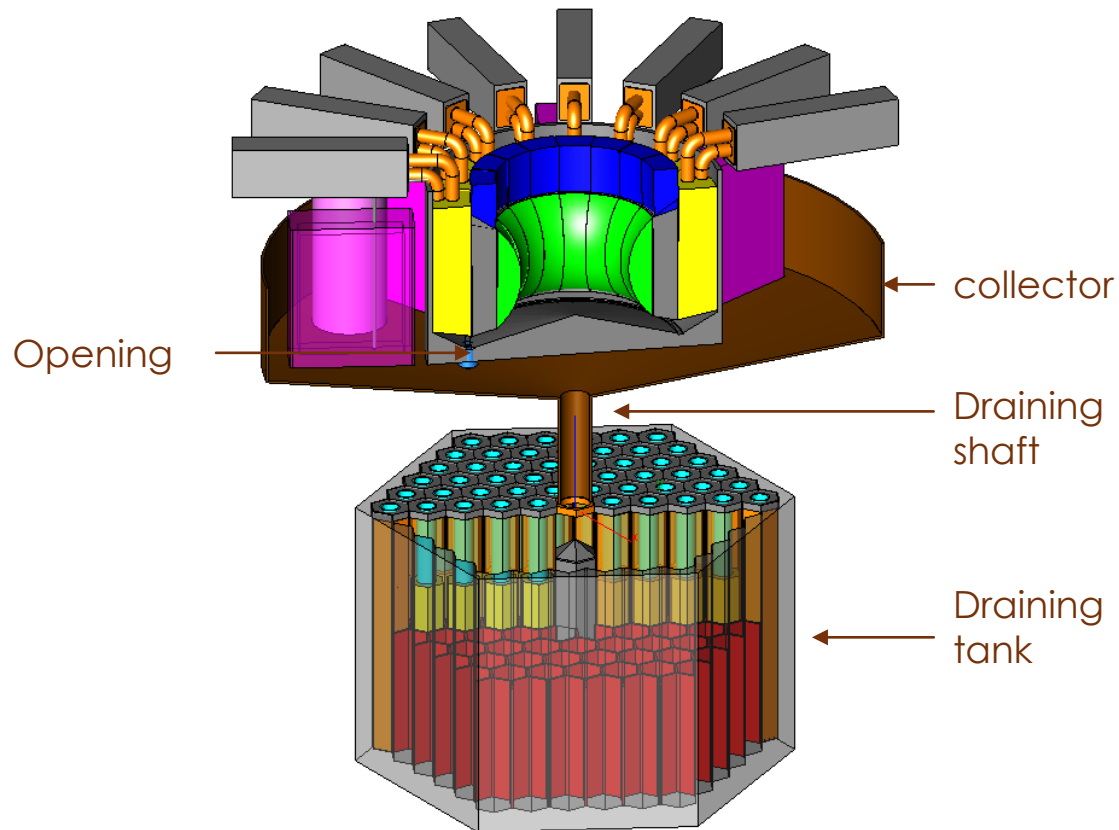
Objectifs des études sur le système de vidange

- ▶ Les 3 fonctions de sûreté doivent être garanties dans chaque système du réacteur (EDS) y compris dans le système de vidange d'urgence
 - ▶ Le système doit être étanche
 - ▶ Le système doit être sous-critique en toute circonstance
 - ▶ Le réservoir doit être capable d'évacuer la puissance résiduelle efficacement même sur une longue période

- ▶ Objectifs de l'étude:



Description du système

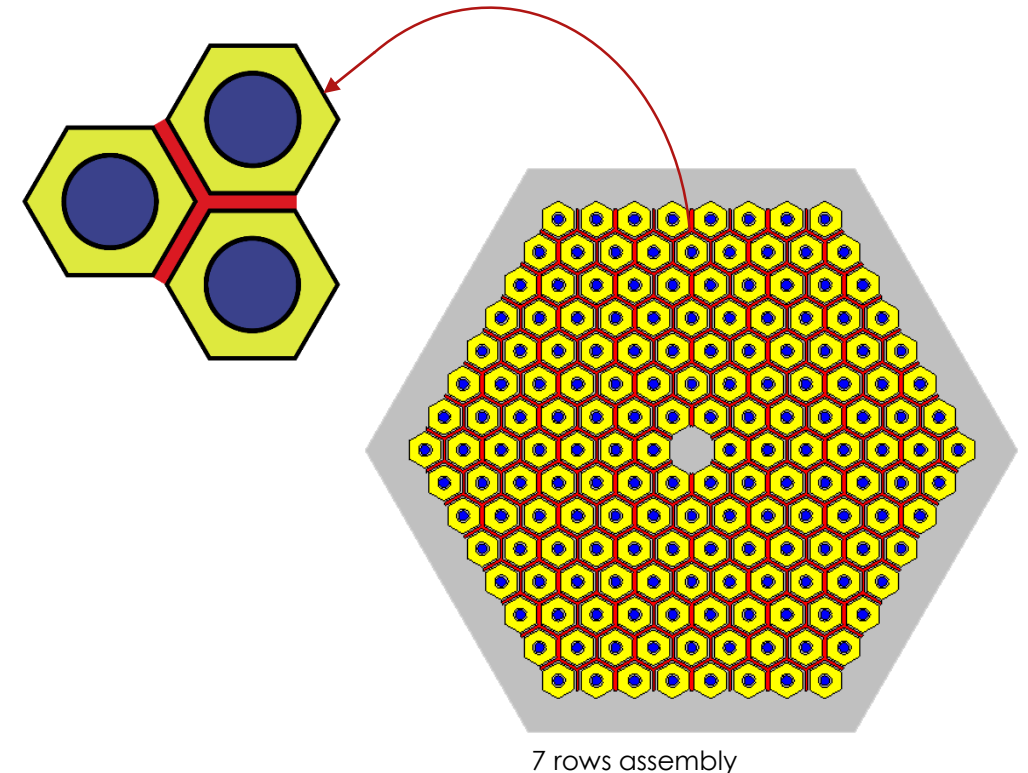


- ▶ En cas de problème en cœur: vidange du combustible dans le réservoir de vidange d'urgence situé sous le cœur
- ▶ Déclenchement de la vidange
 - ▶ Systèmes actifs
 - ▶ Systèmes passifs activés par la température excessive du combustible (autres paramètres pour le déclenchement peut-être à définir)
- ▶ Système de vidange d'urgence
 - ▶ Ouvertures en bas de la cavité cœur
 - ▶ Système de transfert (collecteur et conduit)
 - ▶ Réservoir de vidange

Systèmes
redondants
et fiables

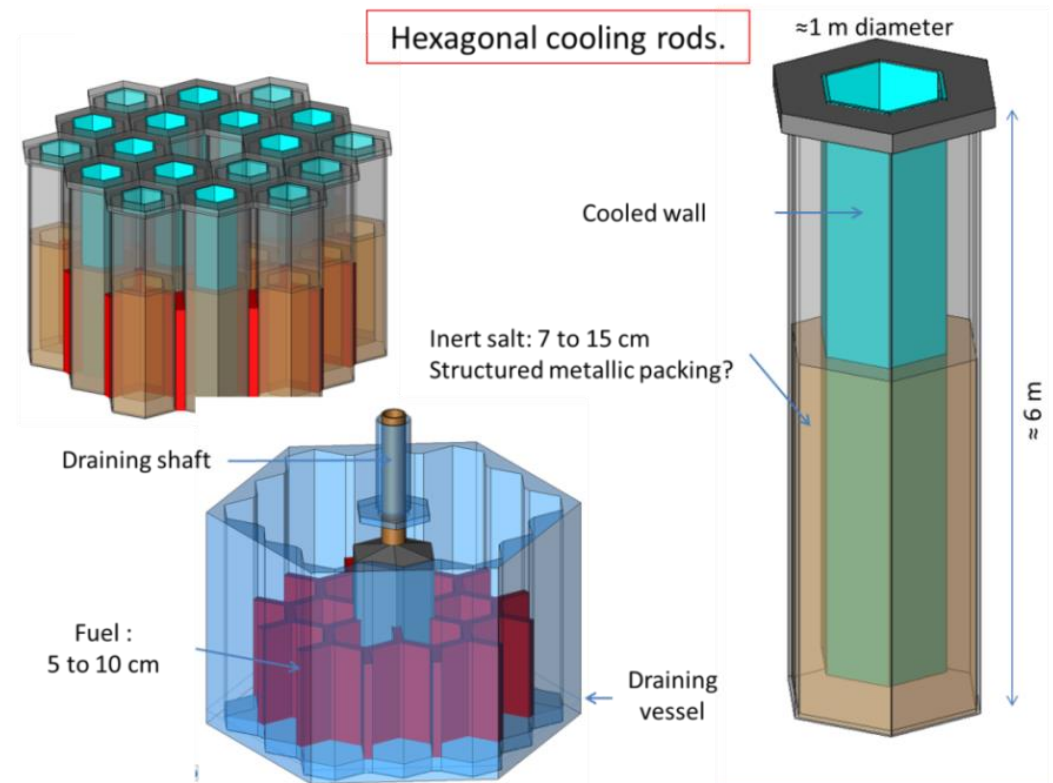
Réservoir de vidange

- ▶ Géométrie du réservoir de vidange
 - ▶ Réservoir hexagonal
 - ▶ Contient des barres de refroidissement hexagonales
 - ▶ **Fluide de refroidissement** (à définir)
 - ▶ **Sel inerte** (à définir)
 - ▶ **Parois métalliques**
 - ▶ **Sel combustible** stocké entre les barres de refroidissement
 - ▶ **Block central et distributeur** permettent de répartir le combustible
 - ▶ Nombre de couronnes = nombre de barres de refroidissement dans un rayon du réservoir



Réservoir de vidange

- ▶ Rôle du sel inerte :
 - ▶ Emmagasiner la chaleur sous forme de chaleur latente de fusion => matériau fusible
 - ▶ Diminuer la puissance à évacuer par le système de refroidissement
 - ▶ augmenter l'inertie thermique du système
 - ▶ Maintenir le sel combustible à l'état liquide plus longtemps



Plan

Introduction

- Objectifs des études
- Description du système

I. Etudes dans le réservoir de vidange

- Etudes de thermique dans le réservoir de vidange
- Géométrie du réservoir de vidange
- Etudes paramétriques de criticité dans le réservoir

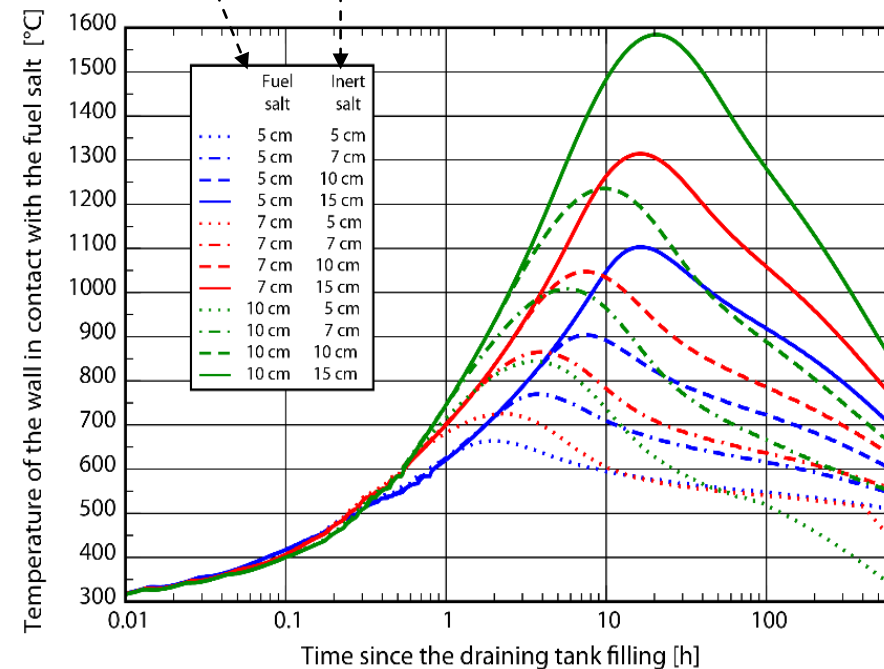
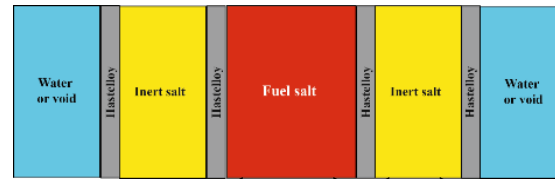
II. Etudes dans le conduit et le collecteur

- Etudes de criticité dans le conduit de vidange
- Etudes de criticité dans le collecteur
- Etude de criticité dans le système de transfert

Conclusion & perspectives

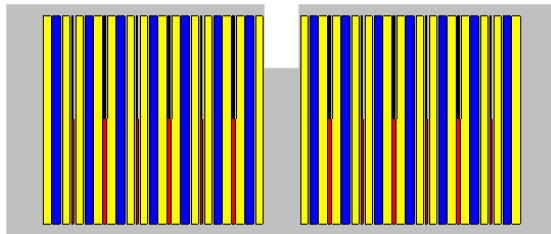
Etudes préliminaires de thermique

- ▶ Calculs préliminaires en 1D
- ▶ Matériaux et paramètres utilisés pour la simulation
 - ▶ Puissance résiduelle dépendant du temps dans le combustible
 - ▶ Sel inerte: LiF-ZrF₄
 - ▶ Convection prise en compte dans les sels (profil de conduction équivalent)
 - ▶ Matériau de structure: Hastelloy N

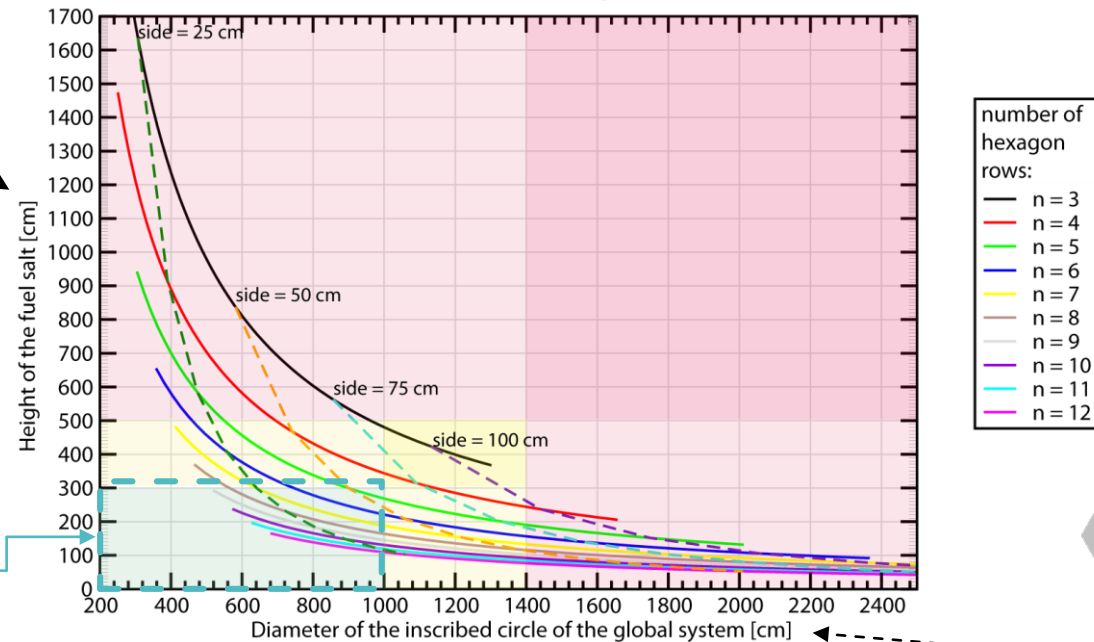


- ▶ Pour limiter l'amplitude des variations de température à la paroi et maintenir le combustible liquide pendant un mois
 - ▶ Epaisseur de sel combustible ≤ 5 cm
 - ▶ Epaisseur de sel inerte ≤ 7 cm ou ajout d'étrésillons métalliques pour augmenter le transfert thermique
- ▶ Calculs plus précis à venir (SIMMER et/ou codes CFD)

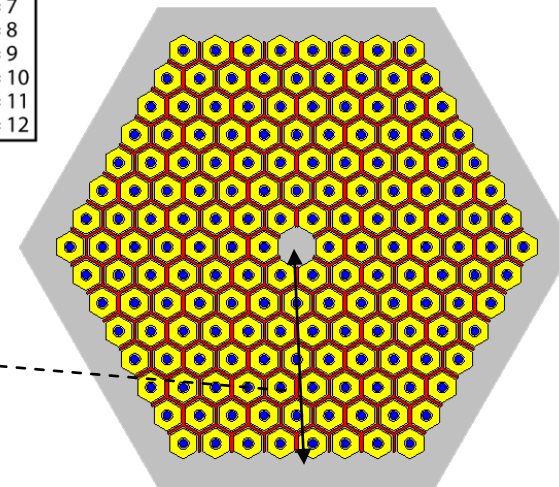
Considérations géométriques



Height of the fuel salt as a function of the size of the global system
for several number of hexagon rows



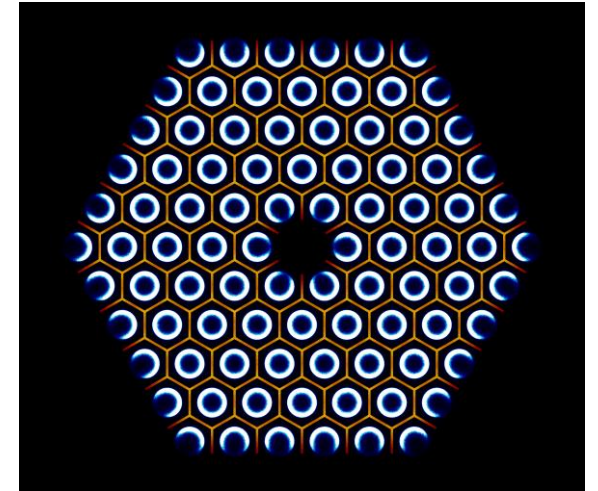
Capacité du réservoir choisie égale au double du volume de sel combustible en cœur soit 36 m³



- ▶ Nombre de couronnes choisi pour avoir un design relativement compacte
 - ▶ Hauteur du sel combustible inférieure à 3 m ;
 - ▶ Diamètre (du cercle inscrit) du système global inférieur à 10 m.

Etudes de criticité dans le réservoir de vidange

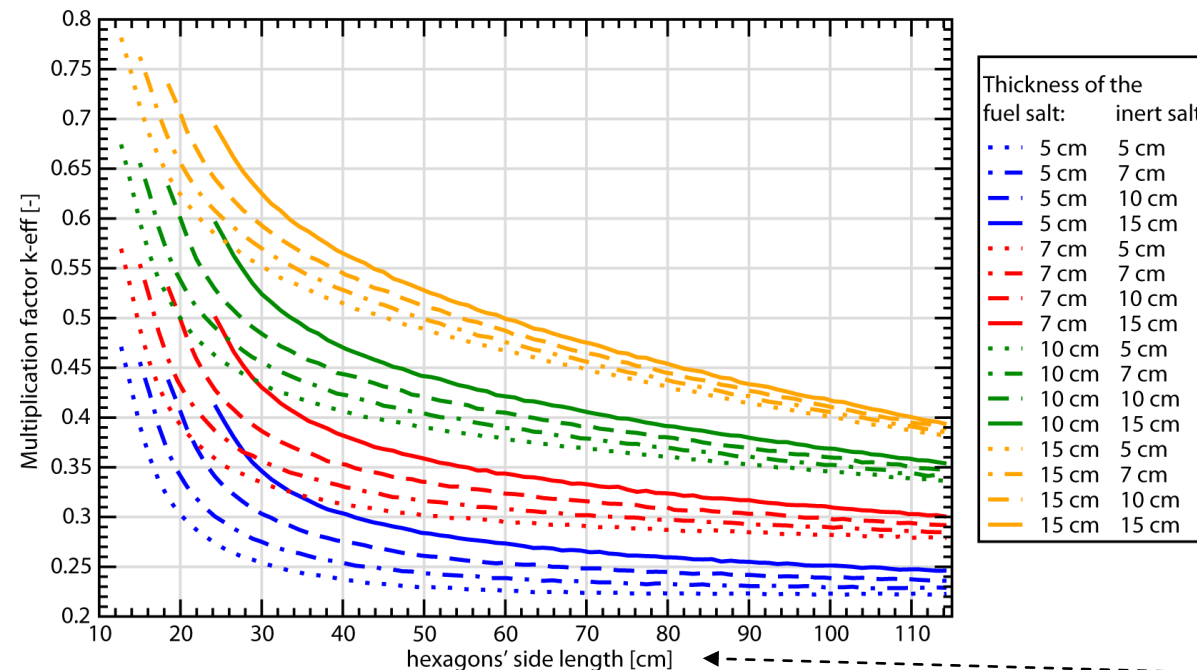
- ▶ Calculs de criticité
 - ▶ Utilisation du code Monte Carlo SERPENT2
 - ▶ Critère limitant :
 - ▶ $k_{\text{eff}} < 0,95$ valeur utilisée en conditions normales dans le bâtiment réacteur et pour la gestion des colis de déchets radioactifs
- ▶ Matériaux utilisés pour la simulation
 - ▶ Combustible : Composition initiale en cœur
 - ▶ Sel inerte : FLiNaK
 - ▶ Matériau de structure : Hastelloy N
 - ▶ Fluide de refroidissement : eau



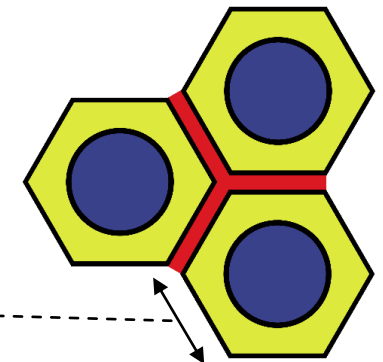
Etudes de criticité paramétriques

- ▶ Paramètres fixés
 - ▶ Epaisseur des parois des barres de refroidissement: 3 cm
 - ▶ Nombre de couronnes : 5
- ▶ Configurations étudiées
 - ▶ Epaisseur de combustible (5cm, 7cm, 10 cm, 15 cm)
 - ▶ Epaisseur de sel inerte (5cm....., 7cm_ _ , 10 cm - . , 15 cm - - -)
- ▶ Paramètre variable
 - ▶ Longueur du côté des barres de refroidissement

Multiplication factor as a function of the hexagons' side length
for different fuel salt and inert salt thicknesses



Toutes les configurations assurent la sous-criticité avec une marge suffisante, même les plus contraignantes (15 cm de combustible)



Plan

Introduction

- Objectifs des études
- Description du système

I. Etudes dans le réservoir de vidange

- Etudes de thermique dans le réservoir de vidange
- Géométrie du réservoir de vidange
- Etudes paramétriques de criticité dans le réservoir

II. Etudes dans le conduit et le collecteur

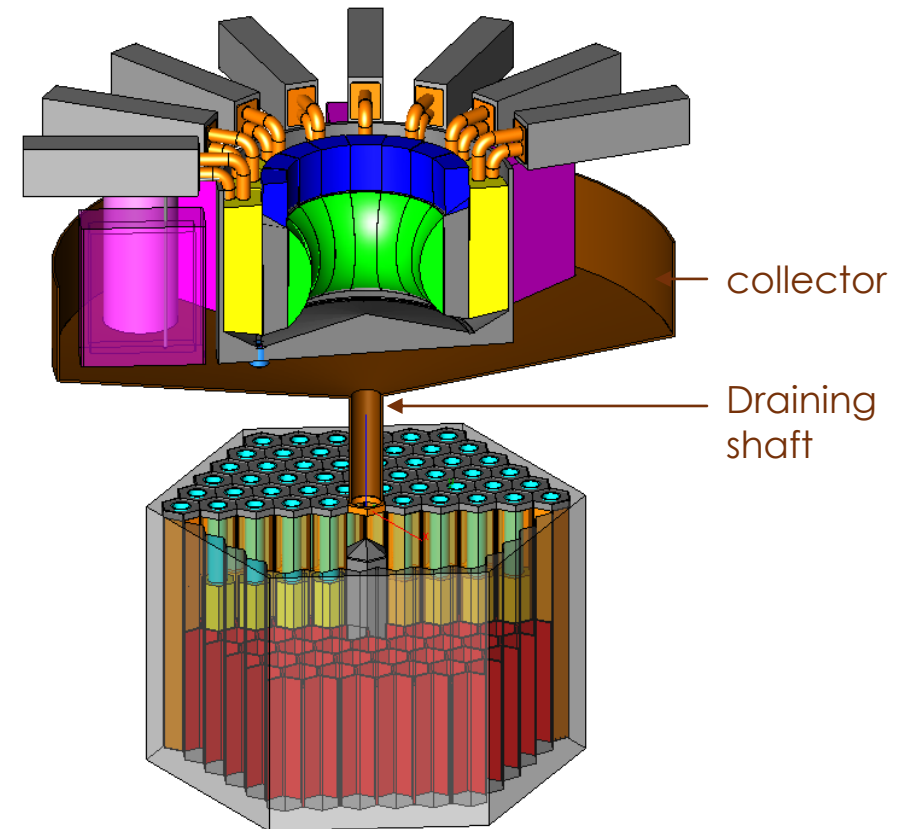
- Etudes de criticité dans le conduit de vidange
- Etudes de criticité dans le collecteur
- Etude de criticité dans le système de transfert

Conclusion & perspectives

Etudes dans le conduit et le collecteur

- ▶ Cas étudié : cas accidentel où un blocage empêche le combustible de s'écouler
 - ▶ Accumulation de combustible dans le conduit et le collecteur

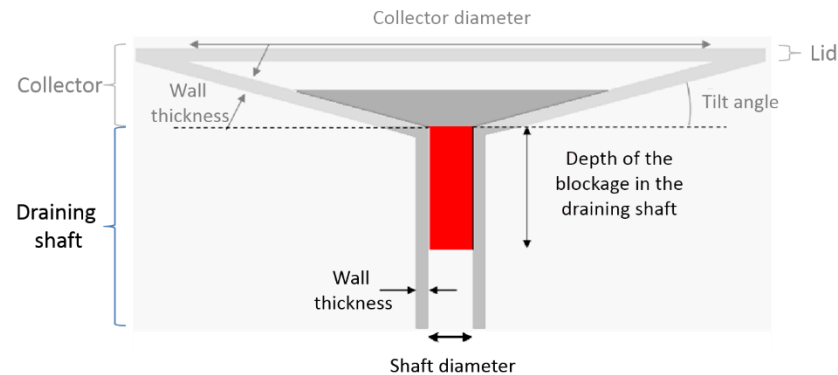
- ▶ Approche
 1. Etude du conduit et du collecteur séparément
 2. Etude du système de transfert dans sont ensemble



Etudes de criticité dans le conduit de vidange

► Géométrie du conduit de vidange

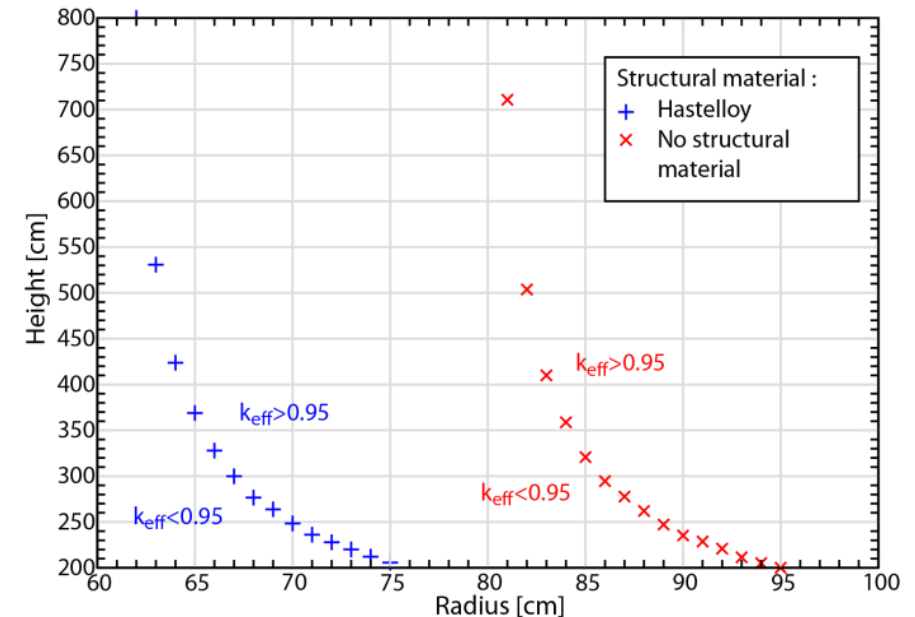
- Cylindre 1 à 2 m de haut
- Rayon entre 15 et 30 cm
- Paroi de quelques centimètres



► configurations étudiées : conduit rempli de combustible

- **Sans parois**
- **Parois en Hastelloy N de 30 cm**

Cas extrêmes

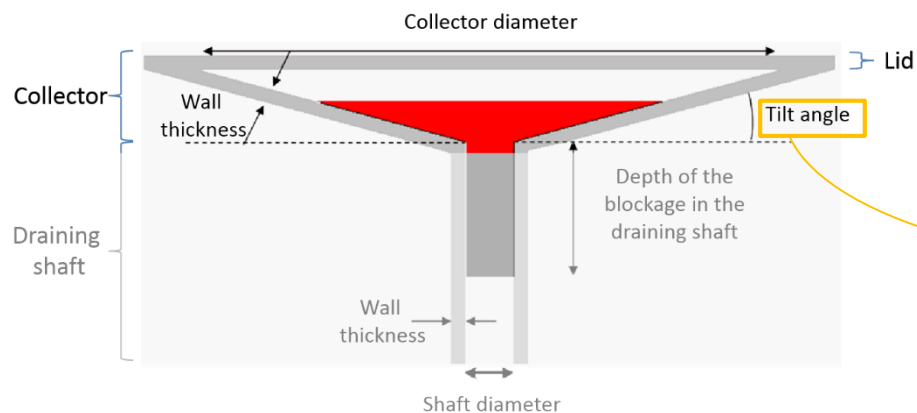


- Les configurations envisagées sont toujours dans la zone sous-critique même avec une épaisseur de paroi de 30 cm

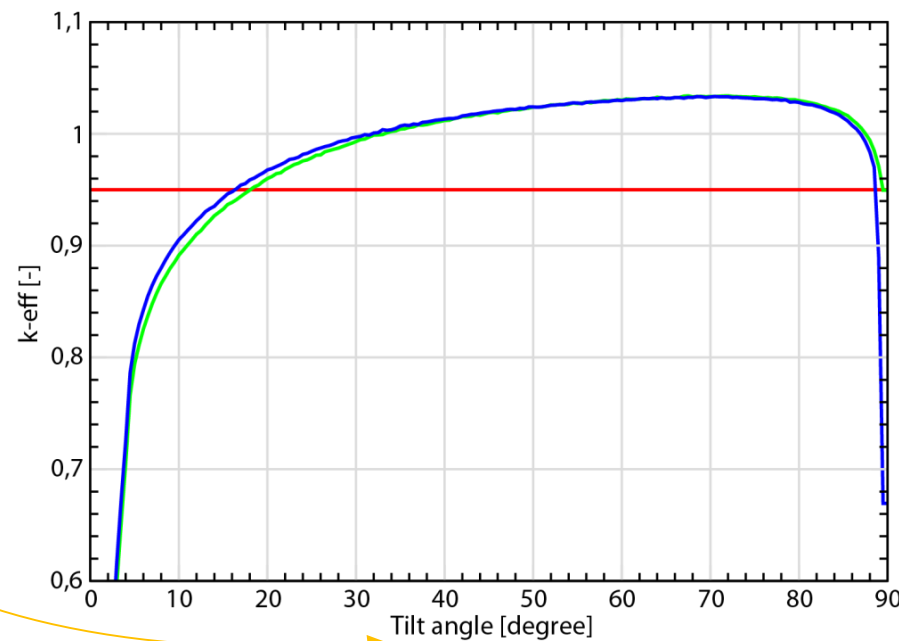
Le conduit ne pose pas de problème de criticité en soi

Etudes de criticité dans le collecteur

- ▶ Géométrie du collecteur :
 - ▶ Cône tronqué menant au conduit
- ▶ Couvercle ajouté pour simuler la réflexion sur les structures situées au dessus (Cœur, ...)



Multiplication factor as a function of the tilt angle

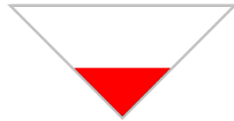


- ▶ Paramètres fixés
 - ▶ Rayon du collecteur : 6 m
 - ▶ Volume du combustible : 18 m³ (rempli partiellement le collecteur)
 - ▶ Epaisseur de paroi : 30 cm
- ▶ Paramètre variable :
 - ▶ Angle d'inclinaison du collecteur

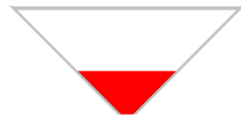
Etudes de criticité dans le collecteur

► Configurations étudiées:

► **Cône simple : rayon nul**



► **Cône tronqué : rayon de 50 cm**



► 2 zones sous-critiques

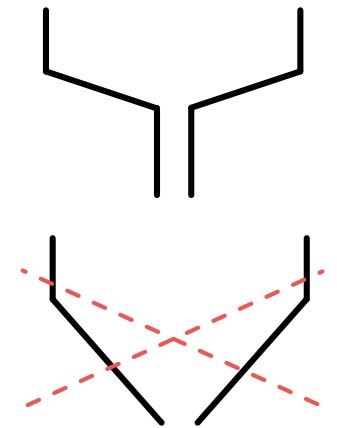
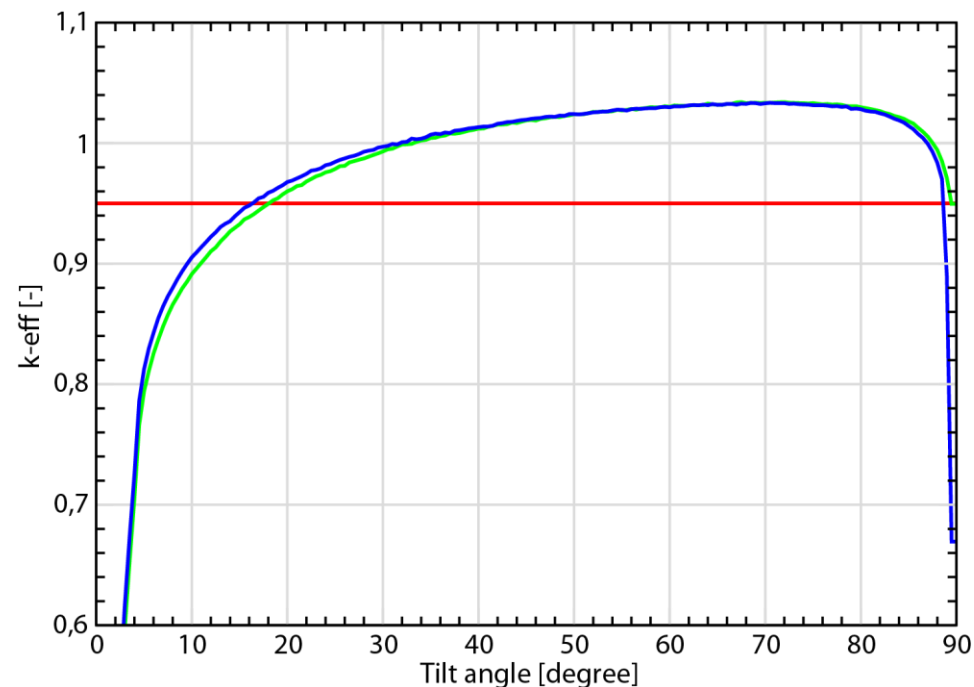
► Pour les petits angles

- Cône simple plus contraignant
- $k_{\text{eff}} < 0,95 \Leftrightarrow \theta < 16^\circ \Leftrightarrow H < 1,7 \text{ m}$

► Pour les grands angles

- Cône simple moins contraignant
- $k_{\text{eff}} < 0,95 \Leftrightarrow \theta > 89^\circ \Leftrightarrow H > 344 \text{ m}$

Multiplication factor as a function of the tilt angle



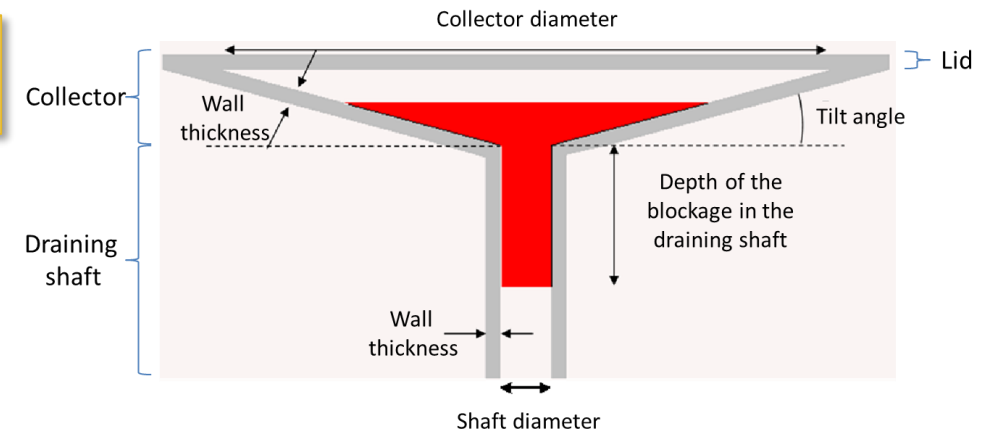
Géométrie sans conduit et avec un collecteur pentu est éliminée

Etudes de criticité dans le système de transfert

Objectif : déterminer s'il existe des conditions plus défavorables quand le combustible distribué entre collecteur et conduit de vidange

- ▶ Configuration étudiée:
 - ▶ Système de transfert dans son ensemble
 - ▶ Rayon du conduit 30 cm et 50 cm
 - ▶ Angle d'inclinaison 10°, 15°, 20°

- ▶ Paramètre variable
 - ▶ Profondeur du bouchon dans le conduit
 - ▶ blocage dans le conduit à une profondeur donnée
 - ▶ Ecoulement lent du combustible

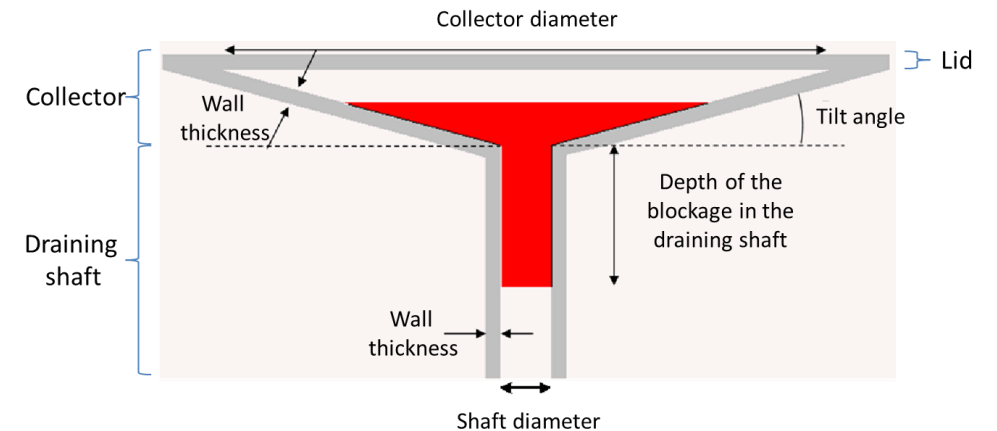


Shaft radius \ tilt angle		10°	15°	20°
30 cm	$k_{\text{eff,max}}$	0.90534	0.94298	0.96727
	Depth of the blockage	70 cm	50 cm	50 cm
	Δp	+767 pcm	+439 pcm	+270 pcm
50 cm	$k_{\text{eff,max}}$	0.91894	0.94792	0.96925
	Depth of the blockage	130 cm	80 cm	70 cm
	Δp	+3287 pcm	+1670 pcm	+984 pcm

Etudes de criticité dans le système de transfert

- ▶ $\Delta\rho$: différence de réactivité entre la situation où tout le combustible est dans le collecteur et la configuration pour laquelle le k_{eff} est maximal
 - ▶ augmente avec le rayon du conduit
 - ▶ diminue avec l'inclinaison du collecteur

- ▶ Apport de réactivité pour un angle d'inclinaison inférieur à 15° n'entraîne pas de dépassement de la limite $k_{\text{eff}} < 0,95$



Shaft radius \ tilt angle		10°	15°	20°
30 cm	$k_{\text{eff,max}}$	0.90534	0.94298	0.96727
	Depth of the blockage	70 cm	50 cm	50 cm
	$\Delta\rho$	+767 pcm	+439 pcm	+270 pcm
50 cm	$k_{\text{eff,max}}$	0.91894	0.94792	0.96925
	Depth of the blockage	130 cm	80 cm	70 cm
	$\Delta\rho$	+3287 pcm	+1670 pcm	+984 pcm

Plan

Introduction

- Objectifs des études
- Description du système

I. Etudes dans le réservoir de vidange

- Etudes de thermique dans le réservoir de vidange
- Géométrie du réservoir de vidange
- Etudes paramétriques de criticité dans le réservoir

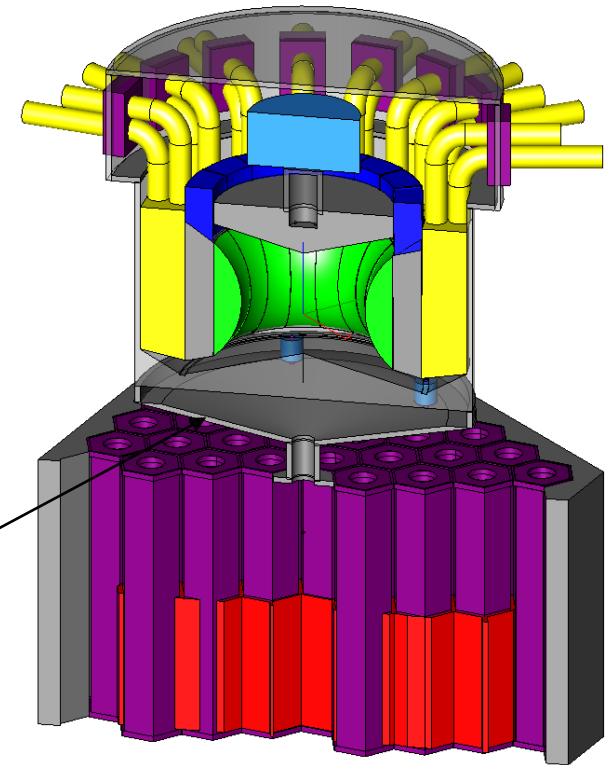
II. Etudes dans le conduit et le collecteur

- Etudes de criticité dans le conduit de vidange
- Etudes de criticité dans le collecteur
- Etude de criticité dans le système de transfert

Conclusion & perspectives

Conclusion & perspectives

- ▶ Réservoir de vidange
 - ▶ Configurations envisagées largement sous-critiques
 - ▶ Des études de thermique plus approfondies doivent être menées
 - ▶ Etudes détaillées des épaisseurs de combustible et de sel inerte (CFD/SIMMER)
 - ▶ Dimensionnement du système de refroidissement (Gaz ?) – Stage printemps 2017
- ▶ Conduit de vidange et collecteur
 - ▶ Configurations du conduit de vidange envisage largement sous-critique
 - ▶ Seules les configurations du collecteur avec un angle inférieur à 15° satisfont le critère $k_{\text{eff}} < 0,95$
- ▶ Le design n'est pas encore fixé => de nouveaux calculs doivent être faits si la configuration choisie est différente de celle étudiée



Merci pour votre attention

Back-up

Approach

- ▶ Criticality computation
 - ▶ Use of the Monte Carlo code SERPENT2
 - ▶ Limiting criteria:
 - ▶ $k_{\text{eff}} < 0,95$ value used for normal conditions in fuel building and for radioactive package waste
- ▶ Procedure used for the parametric studies

Geometry defined with fixed parameters and variable parameters: several configurations obtained by individually varying each parameter

Serpent input files generated automatically thanks to a code written in Java

Serpent calculations have been automated for the variation of each parameter

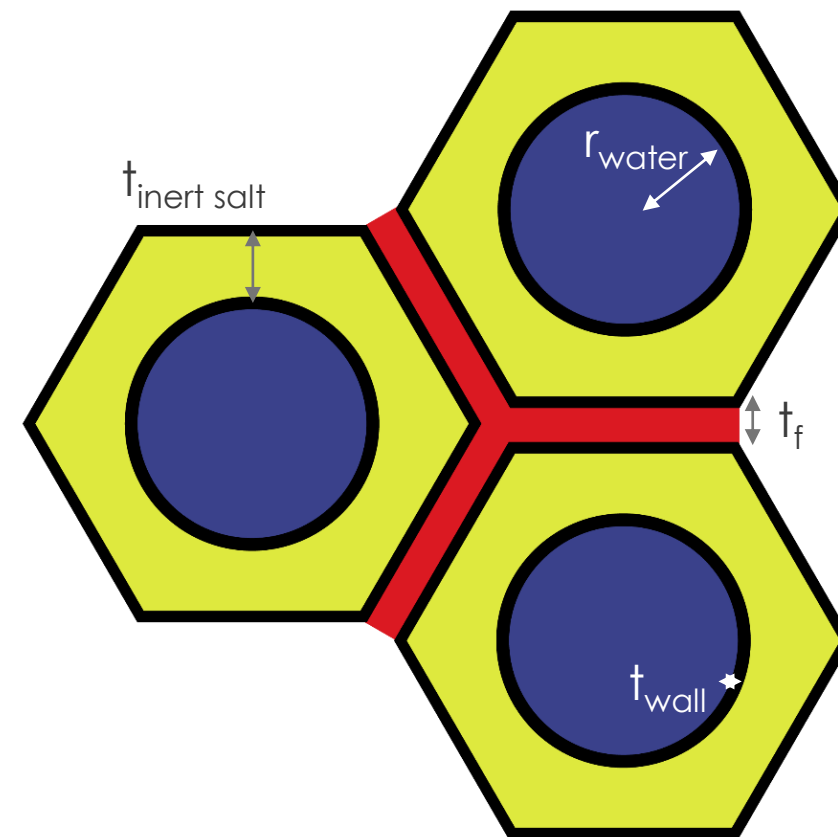
Geometry construction procedure

- ▶ Fixed parameters
 - ▶ Fuel Salt volume $V_f = 18 \text{ m}^3$
 - ▶ Draining tank capacity $2 \cdot V_f = 36 \text{ m}^3$
 - ▶ External tank wall thickness: 20 cm

- ▶ Variable parameters
 - ▶ Water canal radius r_{water}
 - ▶ Inert salt layer thickness $t_{\text{inert salt}}$
 - ▶ Hastelloy wall thickness t_{wall}
 - ▶ Fuel salt layer thickness t_f
 - ▶ Number of rows n

Limiting value based on a reflection about thermal properties

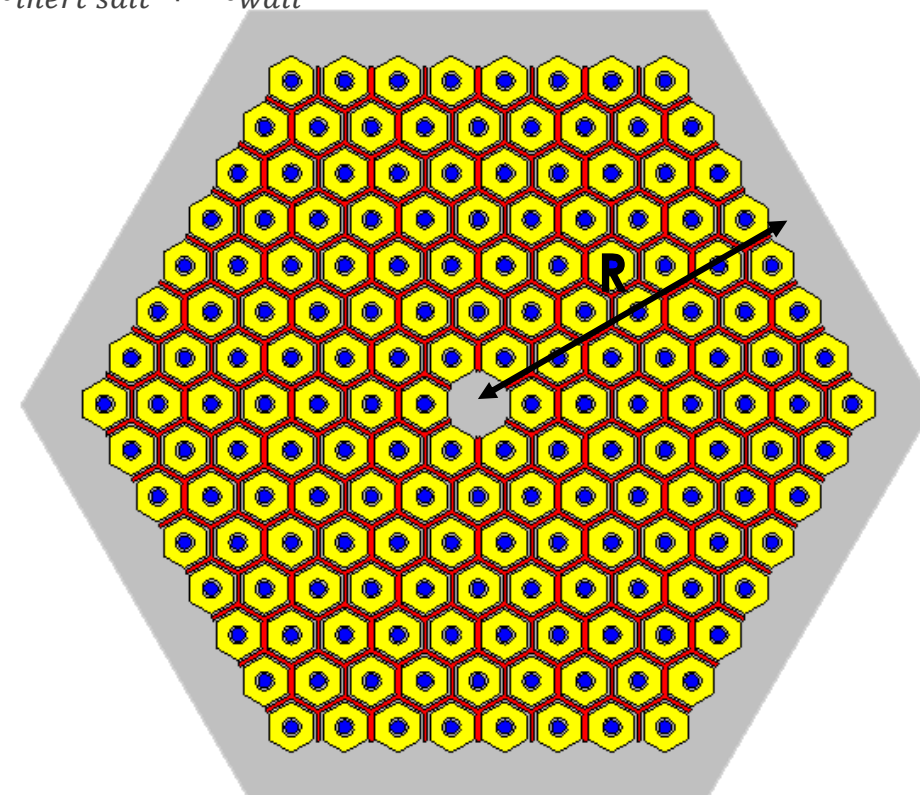
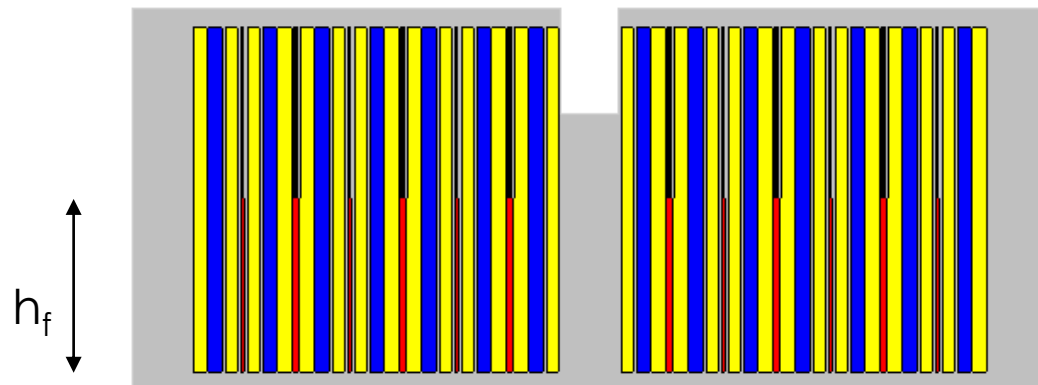
Limited by the global draining tank size



Geometry construction procedure

► Computed parameters:

- Cooling rod radius (radius of inscribed circle diameter) $r = r_{water} + t_{inert\ salt} + 2t_{wall}$
- Cooling rod side (radius of circumscribed circle) $a = \frac{2}{\sqrt{3}}$
- Free surface of fuel salt $S_f = \sqrt{3}t_f(2r(3n^2 + n - 2) + \frac{t_f}{2}(3n^2 - 4))$
- Fuel height $h_f = \frac{v_f}{s_f}$
- Radius of the external hexagonal structure: $R = \frac{r}{\sqrt{3}}(2 + 3 * n)$

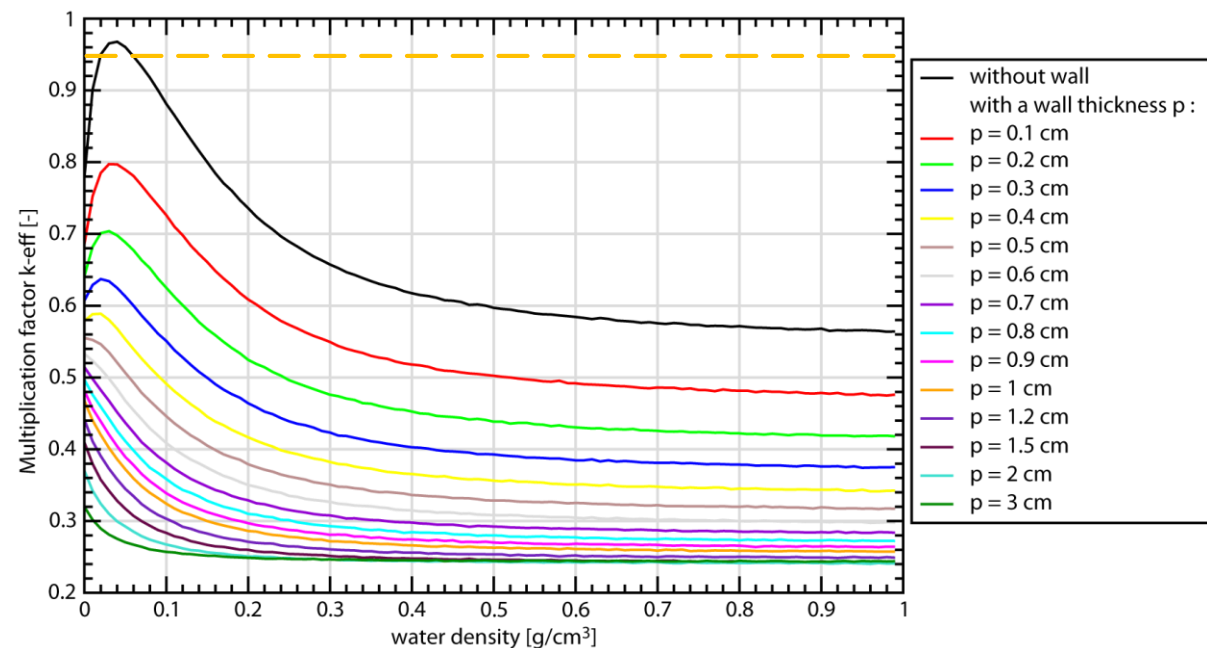


Parametric criticality study

Objective: study the impact of the water vaporization assimilated to a reduction of the water density

- ▶ Fixed parameter
 - ▶ Fuel salt layer thickness : 5 cm
 - ▶ Inert salt layer: 7 cm
 - ▶ Number of rows : 5
- ▶ Configurations studied
 - ▶ Wall thicknesses from 0 mm to 3 cm
- ▶ Variable parameter
 - ▶ Water density

Variation of the multiplication factor as a function of the water density
for different wall thicknesses



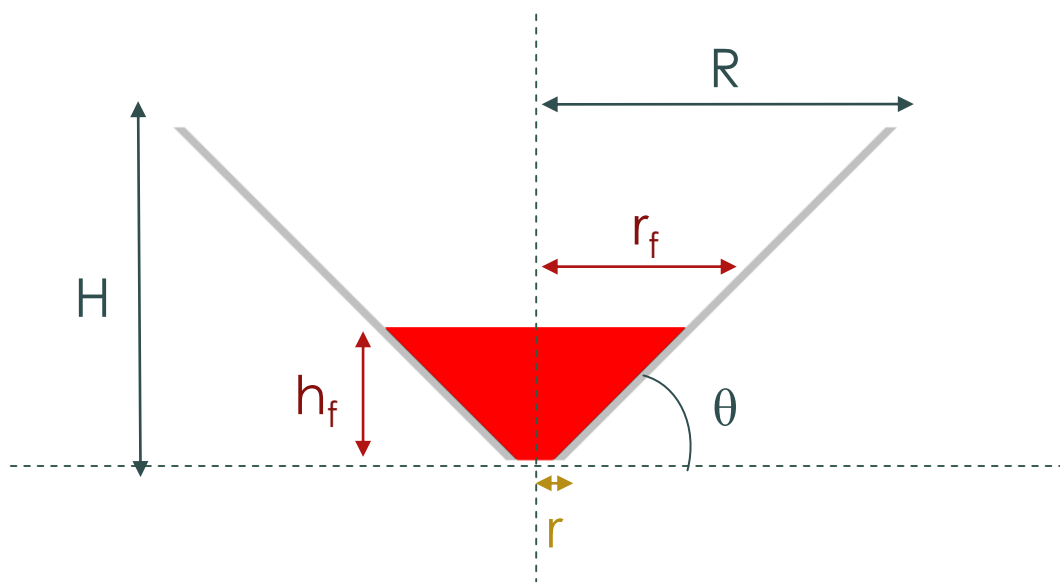
Strong impact of the water density on the multiplication factor

Criticality margin ($k_{\text{eff}} < 0.95$) respected for wall thicknesses ≥ 1 mm

Effect negligible for wall thicknesses in the magnitude of the cm

Collector geometry construction

- ▶ Collector geometry:
 - ▶ Truncated cone that leads to the draining shaft
 - ▶ Smallest radius correspond to the draining shaft radius r



- ▶ Fixed parameters:
 - ▶ Collector radius $R = 6$ m
 - ▶ Fuel salt volume $V = 18$ m³ (partly fill the collector)
- ▶ Variable: tilt angle θ
- ▶ Computed parameters
 - ▶ Collector height $H = (R-r)\tan(\theta)$
 - ▶ Fuel radius $r_f = \left(\frac{3V}{\pi \tan(\theta)} + r^3\right)^{1/3}$
 - ▶ Fuel height $h_f = (r_f-r)\tan(\theta)$