



Diffusé le : Voir code barres ci-dessus

Réf. : ENPRTL080174

Entité émettrice: **PR/TL**

Rédacteur : **M. TOMASELLO, G. BALARD**

Nbre de pages : 28

Domaine d'application : **TOUS REP sauf N4**

Nbre d'annexes : 16

Titre : **Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

<b>ENPRTL080174</b>	<b>A</b>	← Référence	E235/062991/ESTECTECHN 7N
		Code Projet →	

Type de document : **Note d'étude**

Mots clés : Perte du RRA, ouverture directe de cuve, arrêt pour intervention, domaine complémentaire.

**Résumé** : Cette note présente la méthodologie pour l'évaluation des délais avant découverte du cœur pour le palier 900, 1300 et EPR, consécutivement à la perte du RRA, en ouverture directe de cuve en API.

Rédacteur		Vérificateur		Approbateur			
				Chef d'entité		Chef de rang	
Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa
<b>M. TOMASELLO</b> <b>G. BALARD</b> 02/07/2010		<b>O. HASCOËT</b>  02/07/2010		<b>VAUDESCAL</b> <b>J.-L.</b> 03/08/2010			

**Evolutions des trois derniers indices**

Cocher s'il y a changement de méthodologie  
Cocher ici s'il y a évolution des données amont

Indice	Date d'approbation	Motif du changement d'indice	Modifications apportées		

Archivage long : OUI  
Livrabale principal : NON

Archivé au FDU : OUI

Copyright EDF 2010

- Confidentiel : L'initiateur établit une liste nominative des destinataires. Chacun d'eux reçoit un exemplaire numéroté et ne peut étendre la diffusion sans l'accord de l'initiateur.
- Dif. Restreinte : L'initiateur établit une liste explicite des destinataires. Le chef de service d'un destinataire peut étendre la diffusion sous sa responsabilité et dans sa Direction (sur la base d'une liste explicite).
- Interne : Ne peut être transmis à l'extérieur d'EDF que par un chef de service.
- Accès libre : Document public.

EDF SEPTEN		Note d'étude <b>ENPRTL080174</b>		Indice <b>A</b>		Page 2/73		
<b>Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve</b>								
<b>FICHE DE GESTION</b>								
Important pour la sûreté (IPS)		OUI <input checked="" type="checkbox"/>		NON <input type="checkbox"/>				
Cette note modifie ou exprime une exigence de Sûreté, de Radioprotection ou d'Environnement ? :								
		OUI <input type="checkbox"/>		NON <input checked="" type="checkbox"/>		Appliquer le processus O4a		
Document HPIC :				OUI <input type="checkbox"/>		NON <input type="checkbox"/>		
Vérification	demandée	OUI <input type="checkbox"/>	Par EDF	<input type="checkbox"/>	En ligne	<input type="checkbox"/>	En cours	<input type="checkbox"/>
Indépendante		NON <input checked="" type="checkbox"/>	Hors EDF	<input type="checkbox"/>	En différé	<input type="checkbox"/>	Effectuée	<input type="checkbox"/>
Responsable vérification (NOM, SERVICE / SOCIÉTÉ) :								
Prédiffusion du présent indice :				OUI <input checked="" type="checkbox"/>		NON <input type="checkbox"/>		
Après de :		VACHER J.L.	PR	FREY L.	CIPN/SN			
		VENEAU T.	PR/TL	BRUNEAU	CIPN/FC			
		RAVEL C.	FC/FF	VERCRUYSSSE K.	CIPN/SN			
		LAVENIR B.	PR/TL					
Existe-t-il un dossier d'étude associé à la note à cet indice ? :				OUI <input checked="" type="checkbox"/>		NON <input type="checkbox"/>		
Contrôle linguistique renforcé :				OUI <input type="checkbox"/>		NON <input checked="" type="checkbox"/>		

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve****SYNTHÈSE**

Cette note présente la méthodologie pour l'évaluation des délais avant découverte du cœur pour les paliers 900, 1300 et EPR, consécutivement à la perte du RRA, en ouverture directe de cuve en API.

La perte du RRA peut être induite par la perte totale des alimentations électriques externes (H3.2), la perte totale de la source froide (H1.2), une brèche entraînant un vortex à l'aspiration du RRA, conduisant au désamorçage des pompes. Une analyse a permis d'identifier la configuration la plus pénalisante, vis-à-vis du délai opérateur, parmi la configuration PREC (phase rupture de l'étanchéité du couvercle) et la configuration suffisamment ouverte (couvercle soulevé). La configuration enveloppe retenue est la perte totale des sources électriques pendant la phase de rupture de l'étanchéité du couvercle.

A configuration fixée, des calculs CATHARE 2 v2.5 ont été ensuite effectués afin d'évaluer le délai opérateur pour la mise en service d'un appoint en eau. Les calculs ont été réalisés selon les règles du domaine complémentaire (pénalisation des paramètres dominants – voir réf. [27]). Les paramètres dominants qui ont été identifiés sont :

- Puissance résiduelle ;
- Modélisation de la rupture d'étanchéité du couvercle ;
- Modélisation des ajutages d'aspersion du dôme ;
- Modélisation des tubes-guide ;
- Coefficients singuliers de perte de charge aux bippasses du cœur, qui influencent la circulation dans le cœur ;
- Coefficients singuliers de perte de charge à la sortie des tubes-guide (sommel), aux bippasses du cœur et aux fuites latérales des cartes-guide des grappes ;
- Valeur de pression de l'enceinte ;
- Echange thermique avec l'enceinte (les parois du primaire sont supposées adiabatiques) ;
- Etat initial de remplissage des épingles du générateur de vapeur.

La méthodologie de calcul a été développée sur le 900 MW. Etant donné que les paramètres dominants restent les mêmes, la méthodologie est applicable à tous les paliers. L'unique paramètre qui change selon le palier est la modélisation des tubes-guide : la méthodologie de pénalisation est alors valable à condition d'adapter cette modélisation en fonction de la géométrie.

Le délai enveloppe avant le dénoyage du cœur pour le palier 900 est de 2 heures et 45 minutes.

Le délai enveloppe avant le dénoyage du cœur pour le palier 1300 est d'1 heure et 40 minutes.

Le délai enveloppe avant le dénoyage du cœur pour le palier EPR est de 56 minutes.

Le délai opérateur enveloppe pourra être valorisé dans une étude probabiliste, pour calculer la probabilité d'échec de mise en service d'un appoint via RCV de la tranche voisine (spécifique au palier 900), sans appoint gravitaire préalable.

**SOMMAIRE**

<b>1. Références .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Introduction .....</b>	<b>8</b>
2.1 Contexte .....	8
2.2 Identification de la demande client .....	8
2.3 Objectif de la note.....	8
2.4 Démarche adoptée.....	9
2.5 Code de calcul .....	9
<b>3. Description physique du transitoire.....</b>	<b>10</b>
<b>4. Choix du transitoire pénalisant.....</b>	<b>12</b>
4.1 Choix de l'initiateur.....	12
4.2 Choix de la configuration d'ouverture .....	13
4.2.1 Configuration entrouverte .....	14
4.2.2 Configuration PREC.....	14
4.2.3 Configuration suffisamment ouverte.....	14
4.2.4 En résumé.....	15
4.3 Détermination de la position du couvercle pénalisante .....	15
<b>5. Identification des paramètres dominants .....</b>	<b>16</b>
5.1 Inventaire en eau primaire initial .....	17
5.2 Température initiale du primaire .....	17
5.3 Puissance résiduelle .....	17
5.4 Echanges avec l'atmosphère de l'enceinte .....	17
5.5 Echanges avec le générateur de vapeur disponible.....	18
5.6 Pertes de charge à la sortie des tubes-guide.....	18
5.7 Pertes de charges aux cartes-guide.....	19
5.8 Pression de l'enceinte .....	20
5.9 Circulation naturelle dans le cœur.....	21
5.10 Pénalisation de la recirculation par les ajutages d'aspersion.....	21
5.11 Modélisation des tubes-guide.....	21
<b>6. Résultats de l'étude.....</b>	<b>23</b>
6.1 Palier CPY (étude de référence) .....	23

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

6.1.1 Paramètres dominants.....	23
6.1.2 Résultats.....	24
6.2 Conditions d'utilisation ou d'application des résultats aux autres paliers	25
6.2.1 Palier 1300 .....	26
6.2.2 Palier EPR.....	27
<b>7. Conclusion .....</b>	<b>28</b>
7.1 Réponse aux objectifs.....	28
7.2 Suites à donner.....	29
<b>8. Annexes .....</b>	<b>30</b>
8.1 Evaluation du débit de vapeur à la fin de la phase d'expulsion .....	30
8.2 Géométrie des tubes-guide.....	30
8.2.1 Palier CP0-CPY.....	30
8.2.2 Palier 1300 .....	33
8.2.3 Palier EPR.....	33
8.3 Pertes de charge dans l'élément TGUIDE (tous paliers) .....	33
8.4 Modélisation du circuit primaire (palier 900).....	36
8.5 Différentes modélisations des tubes-guide (palier 900).....	37
8.6 Evolution du primaire au cours du transitoire (calcul de référence – palier 900)	38
8.7 Sensibilité à la modélisation PIQBREK versus BCONDIT (palier 900).....	45
8.8 Sensibilité à la présence des trous des cartes de guidage (palier 900).....	48
8.9 Sensibilité à la perte de pression aux cartes (palier 900).....	51
8.10 Sensibilité à la perte de pression à la sortie des tubes-guide (palier 900)	54
8.11 Modélisation axiale (réaliste – palier 900).....	57
8.12 Recirculation de l'eau via les bypasses du cœur (palier 900).....	59
8.13 Calcul de sensibilité à la pression de l'enceinte (palier 900).....	63
8.14 Courbes 1300.....	66
8.15 Courbes EPR .....	68
8.16 Comparaison entre l'ouverture du trou d'homme du pressuriseur, le calcul AREVA [5] et l'ouverture directe de cuve.....	70

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve****1. Références**

- [1] Fiche de communication EDF ENFCFF070115 du 27/03/2007 : domaine complémentaire GALICE – étude thermohydraulique support PJC
- [2] Note EDF ENPRTL070040A du 23/08/07 Etudes support aux STE : délais avant découverture du cœur dans les états d'arrêt
- [3] Note EDF ENTTH97043A du 22/08/97 : Perte du RRA en ouverture directe de cuve, niveau au plan de joint de cuve
- [4] Note EDF ENTH94043A du 4/08/1994 : Perte du RRA, piscine réacteur en eau et internes supérieurs en place. Calculs CATHARE 2.
- [5] Note ANP NEPRFDC10085 du 20/09/07 : VD3-900 MWe – Perte du RRA induite par la perte totale des tableaux électriques par mode commun en API – phase court terme
- [6] Note EDF ENSFC9900683 du 23/06/1999 : Transfert de connaissance dans les états d'arrêt – document de synthèse sur le thème « études probabilistes de sûreté »
- [7] Note EDF ENPRTL041874 du 20/12/04 : Transfert de connaissance dans les états d'arrêt – document de synthèse sur le thème « primaire ouvert »
- [8] Note ANP EPCDC1438 du 12/09/05 : Parité MOX 52 – Données et hypothèses d'étude
- [9] Note EDF ENTHFC9012 du 04/05/90 : Représentation des tubes-guide dans CATHARE
- [10] Document standard des spécifications techniques d'exploitation du palier 900 MW CP1-CP2. Chapitre API
- [11] Dossier de système élémentaire palier 900 MW – Traitement et refroidissement eau de la piscine
- [12] RCN AR2 – Arrêt des tranches 900 MW CPY (Lot 93) de l'autorisation de passage sous 4 bars relatifs au primaire en GI
- [13] Note technique CEA SSTHLDASEM2004-067 du 29/06/2005 « CATHARE V2.5 : User guidelines »
- [14] Note CEA SMTHLDMSEM2002096 du 19/09/03 : physical laws of CATHARE revision 6.1 pipe module
- [15] Note CEA SMTHLMTL97016B du 01/07/1998 « Projet SCAR : Jeu de données CATHARE 2 v1.4 pour ciron CP1 »
- [16] Note EDF ENPRTL070001A : Domaine complémentaire 1300 – Evaluation de l'autonomie de l'appoint gravitaire en situation H3.2
- [17] Note ENPRTL070124A EPR – Présentation du jeu de données CATHARE 2 V2.5\_1 réalisé par SEPTEN/PR/TL
- [18] Chisholl, D., two phase flow in pipeline and heat exchangers, Pitman Press Ltd., 1893
- [19] Delhaye, J.M. et al., Thermohydraulics of two-phase systems for industrial design and nuclear engineering, McGraw-Hill, 1981
- [20] Idel'cik I.E., Mémento des pertes de charge, Edition Eyrolles, 1986
- [21] FRA : NFPMRD014 : RPV internal assembly – interfaces with RPV

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

- [22] ANP : NEERFDB1227 : RPV internals – upper internals assembly
- [23] ANP : NEERFDB1282 : RPV internals – CRGA column
- [24] ANP : NEERFDB1308 : RPV internals – general view of internals and part list
- [25] Rapport DSR n°219, GESTION COMBUSTIBLE GALICE, Chapitre VIII, Domaine complémentaire.
- [26] Note EPTADM.475D : CATHARE – Synthesis assessment report
- [27] Note EDF ENSFC0000270 : Redéfinition du domaine complémentaire sur la base de l'utilisation de l'EPS
- [28] Courrier EDF : ENFPFC0101174 Démarche EPS de redéfinition du domaine complémentaire
- [29] Rapport préliminaire de sûreté de Flamanville 3 – édition DAC 2006
- [30] Rapport DES n°305 : « Risques dans les états d'arrêt »
- [31] Note ENPRTL090184 A : EPR FA3 – évaluation des délais avant ouverture des trous d'homme pressuriseur et GV

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

## 2. Introduction

### 2.1 Contexte

Un accident de perte du Refroidissement du Réacteur à l'Arrêt est, jusqu'à présent, géré à l'aide de deux dispositions complémentaires : à court terme, un appoint gravitaire en eau via la piscine BK, à long terme un appoint en eau par motopompe thermique (1300) ou via le RCV de la tranche voisine (900).

La configuration enveloppe de la tranche, qui donne le délai avant dénoyage du cœur pour la valorisation probabiliste des dispositions complémentaires, est l'ouverture du trou d'homme du pressuriseur (voir réf. [5]). La disposition complémentaire court terme est requise car le délai avant découverture du cœur, trou d'homme du pressuriseur ouvert, est de l'ordre d'une heure.

Cependant, d'un point de vue probabiliste c'est l'ouverture directe de cuve qui est prépondérante : on rappelle que le passage à la PTB-RRA primaire suffisamment ouvert est limité à 6 fois par an sur le parc (voir RCN, réf. [12]) avant rechargement. L'ouverture directe de cuve se réalise donc à chaque fois que l'on n'a pas prévu d'intervention sur les GV avant rechargement.

Dans le cadre du domaine complémentaire VD3 900, il a été prévu de mettre à jour l'étude référence [3], dans laquelle on calcule le délai avant découverture du cœur grâce à des bilans d'énergie et de masse, en la remplaçant par une étude d'ouverture directe de cuve à l'aide du code CATHARE (voir réf. [1]).

EDF envisage de supprimer une disposition du Domaine Complémentaire, l'appoint gravitaire à court terme via la piscine BK, si le délai enveloppe avant dénoyage du cœur pour la configuration ouverture directe de la cuve est suffisamment long (1 heure et 30 minutes). La suppression d'une disposition complémentaire permettrait de supprimer toutes les contraintes d'exploitation résultantes.

Les difficultés d'instruction de la validité de CATHARE pour les transitoires en API trou d'homme ouvert (réf. [25]) pourraient être annulées dans le cas où seule l'étude d'ouverture de cuve suffirait d'un point de vue EPS. D'un point de vue EPS, on supposerait l'échec de tous scénarios « perte du RRA trou d'homme du pressuriseur seul ouvert ».

### 2.2 Identification de la demande client

En référence [1], on demande de réaliser une étude thermohydraulique pour la configuration d'ouverture directe de la cuve avant déchargement, de façon à dégager des marges sur le délai opérateur d'appoint au primaire dans cet état.

La demande [1] mentionne que la prestation proposée par AREVA a été refusée pour des raisons de délai et de prix.

Le choix de traiter cette étude en interne a donc été fait.

**Remarque :** Cette étude a été réalisée en 6 mois et donne la méthodologie d'étude pour trouver le délai suffisamment enveloppe avant le dénoyage du cœur pour tous les paliers.

### 2.3 Objectif de la note

Le but de ce document est d'une part de présenter la méthodologie de calcul du délai avant découverture du cœur, consécutivement à la perte totale du RRA induite par petite brèche ou par perte totale des sources électriques (H3), en configuration d'arrêt pour intervention,

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

en cas d'ouverture directe de cuve. D'autre part la note présente les résultats pour les paliers 900 MW<sub>e</sub>, 1300 MW<sub>e</sub> et EPR (mais ne traite pas le N4).

## 2.4 Démarche adoptée

Plusieurs initiateurs de perte du RRA sont étudiés pour chaque configuration (état initial), comme la perte totale des sources électriques, la perte totale des sources froides, une petite brèche sur l'aspiration du RRA, entraînant un vortex. On détermine l'initiateur le plus pénalisant (i.e. qui présente le délai avant dénoyage minimal) grâce à une analyse physique (cf. chapitre 4.1).

L'initiateur étant adopté, on détermine l'état d'ouverture du circuit primaire le plus pénalisant (cf. chapitre 4.2), vis-à-vis du délai avant découverture du cœur, par jugement d'ingénieur. On peut distinguer trois états d'ouverture du réacteur :

- Configuration entrouverte : événements du pressuriseur et du dôme seuls ouverts, couvercle vissé encore en place ;
- Configuration PREC (phase de rupture étanchéité couvercle) : les événements du pressuriseur et du dôme sont ouverts et le couvercle est dévissé, mais encore en place ;
- Configuration suffisamment ouverte : les événements du pressuriseur et du dôme sont ouverts et le couvercle est soulevé.

La configuration et l'initiateur étant adoptées, on détermine les paramètres dominants du transitoire par jugement d'ingénieur et par des calculs de sensibilité CATHARE (cf. chapitre 5). Ces calculs de sensibilité sont effectués à partir d'un cas de référence basé sur le jeu de données SCAR [15]. L'impact des paramètres dominants est mesuré en terme de délai avant dénoyage du cœur.

Au terme de la démarche, les paramètres dominants sont identifiés avec la valeur à imposer, ce qui constitue la méthode pour obtenir des résultats suffisamment enveloppes (chapitre 5).

La méthodologie, mise au point sur CPY (les calculs sont aussi valables pour le CP0), est ensuite déclinée aux autres paliers avec pour cas d'application les paliers 1300 MW<sub>e</sub> et EPR (chapitre 6). L'applicabilité de la méthodologie est possible car les paramètres dominants restent les mêmes pour tout palier. La méthode de pénalisation tient compte des différences géométriques des tubes-guide entre les paliers 900, 1300 et EPR, pour lesquels des choix opportuns de modélisation ont été effectués.

## 2.5 Code de calcul

Le code de calcul utilisé est CATHARE 2 V2.5, qui est qualifié pour décrire les phénomènes à basse pression et en présence d'incondensables (réf. [26]).

Le modèle du circuit primaire retenu dans l'étude est, pour le palier 900, une version simplifiée du jeu de données SCAR [15].

Les jeux de données 1300 est issu de la référence [16], qui a été transmise à l'ASN.

Le jeu de données EPR est celui de la note [17], dans lequel les tubes-guide sont modélisés avec un volume sans fuites latérales. Le jeu de données n'a pas été modifié : compte tenu de la géométrie réelle [21], en particulier de l'absence des trous aux cartes de guidage des grappes de contrôle, la modélisation actuelle est jugée satisfaisante.

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

### 3. Description physique du transitoire

L'évolution du transitoire de perte totale du RRA se déroule en trois phases, identifiées dans la note [3] :

**Phase d'échauffement :**

L'échauffement des parties chaudes du circuit primaire conduit jusqu'à la température de saturation. Les parties froides, telles branches, boîtes à eau et downcomer, restent à la température initiale de 60 °C. Dans cette phase il n'y a pas de perte de masse ;

**Phase d'expulsion :**

On a l'ébullition de l'eau dans la cuve. L'ébullition de l'eau cause une dilatation du primaire due au taux de vide dans la cuve.

Une petite fraction de la vapeur prend la place de l'air dans les épingles GV, une autre petite fraction sort par les événements du pressuriseur, mais la majorité de la vapeur s'accumule sous la plaque de support des tubes-guide. A cet instant, le débit volumique d'eau et de vapeur expulsées vers le dôme est plus faible que le débit volumique de vapeur produit dans le cœur, donc la pression monte. Ce déséquilibre disparaît progressivement au fur et à mesure que les cartes de guidage (voir annexe 8.2) se dénoient et laissent un exutoire à la vapeur. Une fois qu'un nombre suffisant de cartes de guidage est dénoyé, l'équilibre entre débit de vapeur produit et débit sortant est atteint et la pression se stabilise.

Pendant cette phase on a la vidange des boîtes à eau GV et des branches chaudes. L'expulsion dure jusqu'à l'obtention, dans le plénum supérieur, d'un taux de vide dit « d'équilibre ». **Le concept de taux de vide à l'équilibre est illustré en figure 15** Erreur ! Source du renvoi introuvable. ;

**Phase de vaporisation résiduelle :**

Une fois que les tubes-guide sont découverts et qu'on a atteint le taux de vide à l'équilibre, la vapeur produite dans le cœur s'échappe par les tubes-guide sans entraîner le liquide. L'expulsion de liquide se termine et la puissance est évacuée entièrement par évaporation du réfrigérant primaire (phase de vaporisation résiduelle). La vaporisation conduit à terme au découverture du cœur et à l'échauffement des gaines.

**NOTA :** On remarque que si toute la masse primaire s'évapore pour évacuer la puissance résiduelle (sans expulsion) le temps avant dénoyage du cœur serait

$$t = \frac{(m_{init} - m_{fin}) \cdot (h_{100}^{vap} - h_{100}^{liq})}{P_{RES}}$$

Où :

on néglige l'échauffement de l'eau et des masses métalliques de 60°C à saturation ;

- $P_{RES}$  est supposée constante à 13 585 kW (hypothèse pénalisante) ;
- $m_{init}$  est l'inventaire primaire au début du transitoire (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), soit 155 tonnes ;
- $m_{fin}$  est la masse qui reste dans la cuve au début de l'échauffement des gaines (découverture du cœur), qui peut être observée sur la courbe (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) ; elle est de 58 tonnes environ.

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

On aurait alors  $t = 4 \text{ h } 28 \text{ min}$  . Les expulsions d'eau réduisent ce temps à 2 heures et 45 minutes environ sur le 900 (calcul pénalisé – voir annexe 8.13).

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

## 4. Choix du transitoire pénalisant

Remarque : l'application a été faite sur le cas du 900.

### 4.1 Choix de l'initiateur

Les trois initiateurs à prendre en compte sont :

1. perte totale des alimentations électriques ;
2. perte totale de la source froide ;
3. petite brèche.

L'initiateur de perte totale de la source froide ne diffère pas, d'un point de vue physique, de l'initiateur de perte des sources électriques : le déroulement des deux transitoires est absolument équivalent. On retient l'initiateur de perte des sources électriques car dans celui-ci les moyens d'appoint en eau sont plus limités (indisponibilité de l'appoint automatique RCV).

Le transitoire de perte du RRA par brèche et vortex n'a pas été explicitement étudié dans cette note. Les brèches à considérer sont, selon les EPS 900, celles de taille comprise entre 3/8 de pouce et 2 pouces.

Si la brèche se trouve en aval des vannes d'isolement du circuit RRA, la conduite demande d'isoler la file affectée et l'accident ne dégénère pas en la perte du RRA. Au contraire, si la brèche n'est pas isolable (en amont des vannes d'isolement), la baisse du niveau primaire en absence d'appoint automatique pourrait entraîner la perte du RRA par vortex.

Pour les brèches sur les piquages des tuyauteries primaires et sur les piquages du circuit RRA, non isolables :

- Le système RRA n'est pas perdu immédiatement ;
- Les sources électriques sont disponibles (le RCV est donc disponible).

On peut évaluer le débit à la brèche en considérant que la pression relative qui force l'écoulement est

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h .$$

Si on suppose la brèche sur une des tuyauteries primaires, la colonne d'eau entre le PJC et la génératrice inférieure qui surmonte la brèche est de 2,5 mètres (ce qui est pénalisant, parce qu'elle diminue au cours de la vidange). La formule précédente donne alors

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h = (1000 \cdot 9,81 \cdot 2,5) \text{ Pa} = 24525 \text{ Pa} .$$

Ensuite, un équilibre des pressions nous fournit la relation

$$\rho \cdot g \cdot \Delta h = \frac{1}{2} \rho v^2 .$$

La vitesse à la brèche est de 7,67 m/s. Dans la formule on a négligé le terme de perte de charge par frottement à la tuyère brèche, ce qui maximise le débit. Grâce à la relation

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

précédente, étant donné que  $\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$ , où  $A$  est la surface de la brèche, on obtient pour une brèche de 2 pouces :

$$\dot{m} = \rho \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \cdot A = 14,01 \text{ kg/s} = 50,4 \text{ m}^3/\text{h}.$$

La perte du RRA intervient par vortex, lorsque le niveau est inférieur à la PTB-RRA. La masse d'eau comprise entre le Plan de Joint de Cuve et la PTB-RRA est d'environ 65 tonnes. La perte du RRA par vortex intervient donc au bout de

$$t = \frac{\Delta M}{\dot{m}} \cong \frac{65 \text{ m}^3}{50,4 \text{ m}^3/\text{h}} > 1\text{h } 17\text{min}.$$

Etant donné que les sources électriques sont encore disponibles, la baisse du niveau primaire déclenche l'appoint automatique RCV, qui compense le débit perdu à la brèche. Un initiateur de type petite brèche ne représente pas une configuration pénalisante par rapport à la perte totale des sources électriques.

L'initiateur retenu comme le plus pénalisant est finalement la perte totale des sources électriques (à cause de l'indisponibilité de l'appoint automatique).

**Remarque :** Le moyen d'appoint en eau, couvercle soulevé, est une des pompes ISBP, en cours d'utilisation pour le remplissage de la piscine. La capacité nominale d'une pompe RIS, par exemple de la pompe PTR-002-PO est de 360 m<sup>3</sup> par heure [11]. Elle est donc capable de compenser le débit à la brèche même si la piscine BR est complètement remplie (jusqu'à 19,50 m). Il se peut donc que, pendant la phase de remplissage de la piscine, une petite brèche sur RRA ne soit pas repérée rapidement par les opérateurs.

Enfin, comme la piscine PTR a un volume utile de 1600 m<sup>3</sup> [11], on peut conclure que l'autonomie garantie par la bache PTR est supérieure à 10 heures, sans recirculation sur puisard. Le refroidissement du cœur est garanti par une circulation diphasique qui s'instaure dans le cœur, la vapeur sortant par les tubes-guide des grappes de contrôle, l'eau recoulant dans le downcomer grâce aux ajutages d'aspersion [4].

**Remarque 2 :** si la brèche se trouve sur le circuit RRA, et en particulier au refoulement des pompes RRA, le débit de vidange serait très important : les considérations précédentes ne seraient donc pas valables. En conséquence, cette étude couvre seulement les brèches non isolables sur le circuit primaire.

## 4.2 Choix de la configuration d'ouverture

Cette analyse qualitative permet d'identifier la configuration la plus pénalisante par rapport au transitoire de perte totale des alimentations électriques.

On peut distinguer trois états d'ouverture du réacteur :

- Configuration entrouverte : événements du pressuriseur et du dôme seuls ouverts, couvercle vissé encore en place ;
- Configuration PREC (phase de rupture étanchéité couvercle) : les événements du pressuriseur et du dôme sont ouverts et le couvercle est dévissé, mais encore en place ;
- Configuration suffisamment ouverte : les événements du pressuriseur et du dôme sont ouverts et le couvercle est soulevé.

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve****4.2.1 Configuration entrouverte**

Le réacteur est fermé et dépressurisé, seuls les événements du pressuriseur et du dôme sont ouverts. Cette configuration est dite entrouverte car la taille des ouvertures est inférieure à celle du trou d'homme du pressuriseur, soit 0,1257 m<sup>3</sup>.

D'après la référence [7], cette configuration est moins pénalisante que les configurations PREC et suffisamment ouverte, car les délais avant découverture du cœur sont de l'ordre de 10 heures (un GV est disponible lorsque le primaire est entrouvert, et grâce à la pressurisation il y a un bon échange en caloduc). Elle n'est donc pas davantage étudiée dans cette note.

**4.2.2 Configuration PREC**

Dans la première phase le couvercle est encore en place, le niveau d'eau est stabilisé au niveau bas du Plan de Joint de Cuve, le plus haut niveau compatible avec les opérations d'ouverture. A noter que l'ouverture directe de cuve ne s'effectue jamais à la PTB-RRA mais toujours au PJC (voir Règles de Conduite Normale, référence [12]). On commence ensuite à desserrer des goujons du couvercle, cette phase est appelée PREC (phase de rupture étanchéité couvercle).

Deux hypothèses sont retenues :

- **Cas 1** : Une fois que le couvercle est dévissé, un jeu de quelques millimètres entre le couvercle et la cuve met en communication le primaire et l'enceinte. La vapeur produite dans la cuve suite à la perte du RRA peut s'échapper via ce jeu. Si la section est suffisamment large (du même ordre que celle du trou d'homme du pressuriseur), le circuit primaire ne se pressurise pas au cours du transitoire.
- **Cas 2** : Le jeu n'est pas suffisant pour laisser passer le débit produit. Ce cas comporte une pressurisation du circuit primaire jusqu'au soulèvement du couvercle. Le poids du couvercle étant de 54 tonnes, posant sur une surface A de 7,48 m<sup>2</sup>, cela fait que la pression relative nécessaire pour son soulèvement soit

$$p_C = \frac{m_C g}{A} = \frac{54000 \cdot 9,81}{7,48} \frac{kg}{ms^2} = 70,820 \text{ KPa} = 0,708 \text{ bar} .$$

Dans ce cas le primaire se pressurise jusqu'à 1,7 bars, ensuite le couvercle se soulève, se comportant comme une soupape. Une augmentation de la pression tasse le niveau cuve, en réduisant le taux de vide à l'équilibre pendant l'expulsion d'eau (voir calculs de sensibilité en annexe 8.13). Le **cas 2**, où le couvercle se soulève sous effet de la pression, est positif d'un point de vue thermohydraulique, car les expulsions d'eau sont réduites. Comme des expulsions d'eau plus importantes réduisent le délai opérateur, vu que la masse d'eau disponible pour l'évaporation est moindre, le **cas 1** est plus pénalisant que le **cas 2**.

**Le cas pénalisant pour cette configuration d'ouverture est donc le cas 1 (section de passage équivalente à celle du trou d'homme pressuriseur ouvert).**

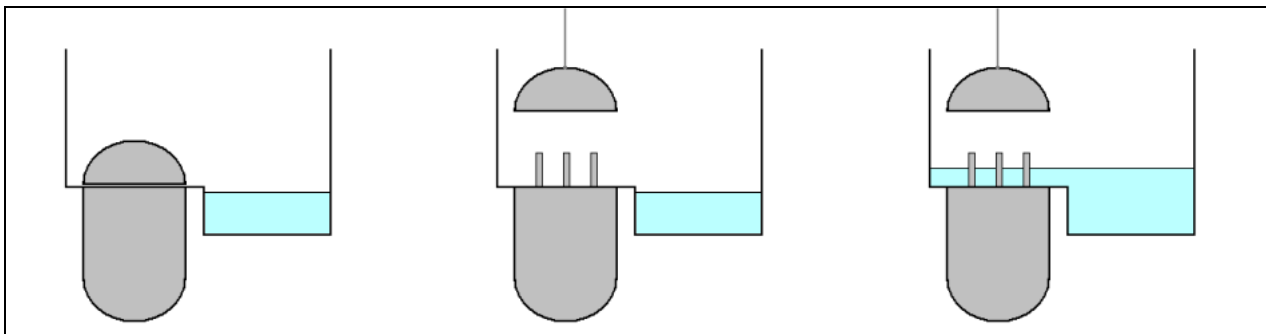
**4.2.3 Configuration suffisamment ouverte**

Une des phases les plus critiques est le début des opérations de soulèvement : suite au desserrage des goujons, le couvercle est soulevé à 11,60 m, soit à 60 cm environ au-dessus

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

du PJC (voir [12]). La piscine BR est encore complètement vide<sup>1</sup> ; le batardeau de la piscine a déjà été enlevé. En cas de perte du RRA l'eau occupe la partie de la piscine dont le niveau se situe au-dessous du PJC, n'ayant pas la possibilité d'échanger avec le cœur via les ajutages d'aspersion du dôme.

On remplit ensuite la piscine jusqu'à 11,30 m, soit 30 cm environ sur le PJC.



Une fois que l'eau de la piscine couvre la partie supérieure du réacteur, en cas de perte du RRA, le refroidissement du cœur est assuré par échauffement de l'eau dans la piscine. Au début le refroidissement est garanti par le thermosiphon monophasique, ensuite par l'eau qui rentre via les ajutages d'aspersion de l'espace annulaire, la vapeur sortant par le tube-guide, en caloduc. Le délai avant découverture est alors de l'ordre de 100 heures [4], pour une piscine BR pleine.

**En configuration suffisamment ouverte, la phase la plus critique en cas de perte de sources électriques est lorsque le couvercle est « enlevé » et la piscine est encore vide.**

#### 4.2.4 En résumé

D'après l'analyse précédente, deux situations nécessitent une analyse complémentaire :

1. phase de rupture de l'étanchéité du couvercle (cas 1 du chapitre 4.2.2) ;
2. primaire suffisamment ouvert, couvercle enlevé et piscine BR vide (4.2.3).

Cette analyse est présentée au chapitre suivant.

#### 4.3 Détermination de la position du couvercle pénalisante

On effectue un premier calcul de sensibilité CATHARE basé sur le jeu de données SCAR **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, qui permettra de choisir la configuration d'ouverture pénalisante parmi les deux.

Si le couvercle est soulevé de 60 cm au-dessus du PJC, cela équivaut, étant donné le diamètre de la base du couvercle de 377,7 cm, à libérer une section de passage de

$$60 \text{ cm} \cdot \pi \cdot 377,7 \text{ cm} = 7,10 \text{ m}^2.$$

La section de passage totale à la sortie des tubes-guide est au contraire

<sup>1</sup> L'eau de la piscine ne doit jamais toucher le couvercle. Dans le cas contraire cela rendrait nécessaire une intervention de décontamination avant les opérations de maintenance.

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

$$53 \cdot 15,7 \text{ cm}^2 = 0,083 \text{ m}^2.$$

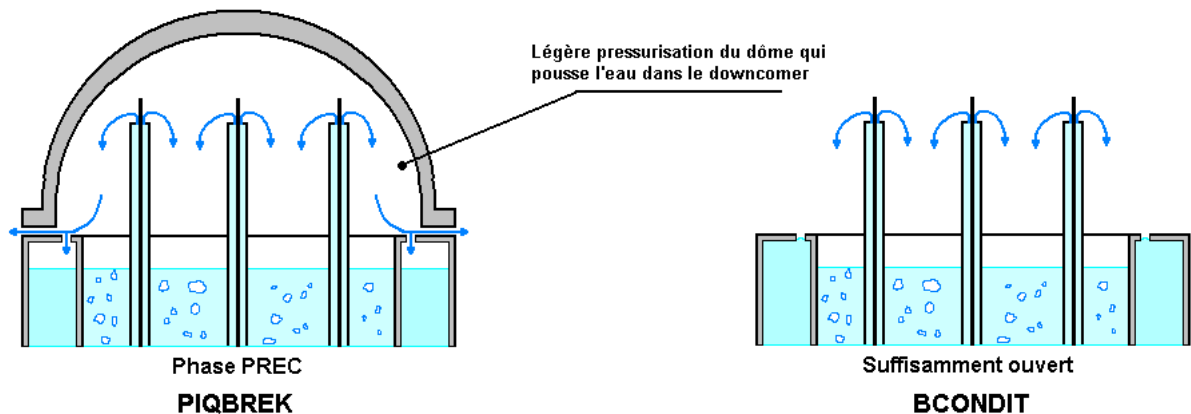
Cette section, calculée dans le cadre du projet SCAR [15], tient compte des quelques tubes-guide sans grappe. La section est du même ordre de grandeur que la section du trou d'homme du pressuriseur.

Dans cette configuration, correspondant au cas suffisamment ouvert, le couvercle ne peut pas interagir ni avec les tubes-guide, ni avec les ajutages d'aspersion. Cette situation a été modélisée avec une condition limite de type BC4C à la sortie des tubes-guide et aux ajutages d'aspersion du couvercle. La condition limite BC4C permet de faire rentrer de l'air en cas de débit inverse.

Si le couvercle est dévissé mais encore en place (phase PREC), la section de l'ouverture est comparable à la section de passage du trou d'homme du pressuriseur. Cette configuration, différente par rapport à celle où le couvercle est enlevé, a été modélisée avec une brèche de type PIQBREK sur le volume représentant le dôme de la cuve.

Durant le transitoire, la vapeur expulsée via les tubes-guide occupe alors le volume du dôme, qui se pressurise légèrement par rapport à l'extérieur.

Cette pressurisation par la vapeur, via les ajutages de l'espace annulaire, modifie l'équilibre manométrique des niveaux dans la cuve. A masse constante, dans le cas PREC le niveau dans le cœur est légèrement plus haut, car le niveau dans le downcomer est tassé par la pressurisation du couvercle via les ajutages.



Les résultats de calculs correspondants à ces deux configurations sont présentés en annexe 8.7. Ces résultats montrent que la configuration PIQBREK est très légèrement pénalisante, et sera donc retenue pour la suite de l'étude.

**Au final, le transitoire étudié est la perte totale des sources électriques lorsque le couvercle est dévissé et encore en place.**

## 5. Identification des paramètres dominants

Les paramètres dominants, qui influencent au premier ordre le transitoire, doivent être pénalisés pour respecter les règles d'étude du domaine complémentaire (réf. [28]). Dans ce transitoire, on peut classer les paramètres dominants en deux catégories : ceux *a priori* (inventaire en eau, puissance résiduelle), ne nécessitant pas de vérification, et ceux nécessitant un calcul de sensibilité, tels que la modélisation du couvercle, la modélisation des internes supérieurs, en particulier du plénum *etc.*, et la perte de charge à la sortie des tubes-guide.

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

### 5.1 Inventaire en eau primaire initial

Au moment de l'ouverture de la cuve, le niveau cuve est *a minima* au Niveau Bas du Plan de Joint de Cuve, le plus bas niveau compatible avec les opérations d'ouverture. Les épingles GV peuvent être remplies en eau ou vides. L'hypothèse pénalisante est de considérer les épingles vides.

**Remarque :** même si les épingles sont pleines, seulement la partie inférieure est remplie d'eau. Dans la partie supérieure, lorsque la pression dans le tube atteint la valeur de 0,2 bars, qui est la pression de saturation pour l'eau à 60 °C, les épingles sont pleines de vapeur. La masse stockée dans les épingles lorsqu'elles sont pleines est, compte tenu de la saturation de l'eau (60°C  $P_v = 0,2$  bars, 8 mètres au-dessus du PJC l'eau devient vapeur), de 16 m<sup>3</sup> environ par générateur de vapeur.

### 5.2 Température initiale du primaire

Selon les Spécifications Techniques d'Exploitation pour le palier 900, la température du primaire doit être comprise entre 10 °C et 60 °C [10]. La distribution de température dans le circuit primaire dépend du débit de fonctionnement du RRA. La température du réfrigérant primaire est supposée être uniforme à 60 °C au début du transitoire, ce qui est pénalisant.

### 5.3 Puissance résiduelle

L'ouverture directe de la cuve est effectuée lorsqu'il n'est pas prévu d'intervention dans la boîte à eau des générateurs de vapeur. L'ouverture directe de la cuve peut être réalisée au plus tôt 2 jours après la convergence. La puissance deux jours après convergence, selon la note [8], est de 0,48% (SERMA +2 $\sigma$ ) de la puissance thermique nominale :

$$P_t = 2775 \text{ MW} .$$

La puissance nominale du cœur avant convergence doit être pénalisée à 102% PN :

$$P_t = 2830,5 \text{ MW} ;$$

Ensuite la puissance résiduelle se calcule en multipliant la puissance nominale pénalisée par 0,48% :

$$P_r = 2830 \text{ MW} \cdot 0,0048 = 13,5864 \text{ MW} .$$

La puissance résiduelle est gardée constante pendant toute la durée du transitoire : la décroissance de la puissance résiduelle n'est pas prise en compte.

A noter que, pour envelopper 95% des cas de façon unilatérale, on pourrait se contenter d'une incertitude sur la puissance résiduelle de +1,645  $\sigma$ .

### 5.4 Echanges avec l'atmosphère de l'enceinte

Les parois du circuit primaire sont supposées être parfaitement calorifugées : les échanges thermiques avec l'enceinte sont ainsi négligés, mais pas les échanges avec le circuit primaire. Si on prenait en compte l'échange thermique avec l'enceinte, le débit de vapeur produit serait moins important, en conséquence les délais opérateur seraient légèrement rallongés.

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve****5.5 Echanges avec le générateur de vapeur disponible**

Dans l'étude en référence [3] on a supposé qu'un générateur de vapeur était plein d'eau au début du transitoire.

Selon la note [3], pendant les phases d'expulsion d'eau, la vapeur remplace le liquide dans les boîtes à eau et se mélange à l'air dans les épingles GV. La puissance est alors transférée au secondaire par caloduc (la vapeur se condense en échauffant le secondaire, puis elle retombe dans la boîte à eau chaude). La température de la vapeur dans le primaire (100°C) n'est pas suffisante pour faire évaporer l'eau secondaire. Néanmoins, l'eau secondaire se réchaufferait de 60 °C jusqu'à saturation, sans s'évaporer. Le délai gagné grâce aux échanges avec le générateur de vapeur est alors de l'ordre de 20 minutes.

$$t = \frac{M_{SECOND} \cdot C_p \cdot \Delta T}{P_{RES}} = \frac{92000 \cdot 4,186 \cdot 40}{13790} s = 1117s$$

Cette hypothèse a été contestée par l'IRSN dans le rapport DES n°305 [30], vu que l'échauffement de l'eau secondaire peut très probablement être concomitant à la phase d'expulsion. Le délai de 20 minutes n'est donc pas additionnable au délai total. Cependant, comme l'étude [3] négligeait complètement la durée de la phase d'expulsion (hypothèse conservatrice) l'IRSN n'a pas remis en cause le délai total.

De plus, les STE indiquent qu'un GV doit être disponible seulement en état entrouvert [10]. Toutefois, il n'existe pas de distinction explicite dans les STE entre l'état entrouvert et l'état PREC.

Afin d'être conservatif, on a choisi de ne pas modéliser le circuit secondaire dans le jeu de données CATHARE. On ne valorise donc pas de source froide complémentaire pendant le transitoire. Egalement, la capacité calorifique des tubes GV (dont les masses métalliques ne sont pas modélisées) n'est pas valorisée.

**5.6 Pertes de charge à la sortie des tubes-guide**

La seule voie de communication possible entre le plénum supérieur et le couvercle est constituée par l'ouverture située au sommet des tubes-guide, permettant le passage de la tige de commande de la grappe de contrôle. En ouverture directe de cuve en API, la grappe de commande se trouve dans l'assemblage de combustible, en conséquence la sortie au sommet est un diaphragme annulaire, avec section de 10,57 cm<sup>2</sup> pour chaque tube [9].

L'effet de la perte de pression à la sortie des tubes est complexe. D'un côté une perte de pression supérieure tasse le niveau cuve, en réduisant le taux de vide à l'équilibre et en conséquence les expulsions massiques aux tubes-guide. D'un autre côté, si la perte de charge est forte, la pressurisation de la cuve due à l'accumulation de vapeur dans le plénum supérieur cause une remontée du niveau dans le downcomer, ce qui entraîne l'expulsion d'eau par les ajutages d'aspersion vers la brèche.

Le coefficient singulier de perte de charge a été calculé en annexe 8.3. Ce calcul indique que le coefficient singulier réaliste est compris entre **3** et **6**.

Comme terme de comparaison, on peut utiliser le gadget FLOW LIMITER [14], qui est utile lorsqu'on rencontre un changement brusque de section avec des conditions soniques.

Un calcul de sensibilité au coefficient singulier, qui compare plusieurs coefficients avec le gadget FLOW LIMITER, est présenté en annexe 8.10. Ce calcul montre que la perte de charge est favorable vis-à-vis du délai opérateur. Pour pénaliser suffisamment ce paramètre, étant donné que le délai opérateur augmente avec la perte de charge, on retient une valeur de **2,5**.

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

## 5.7 Pertes de charges aux cartes-guide

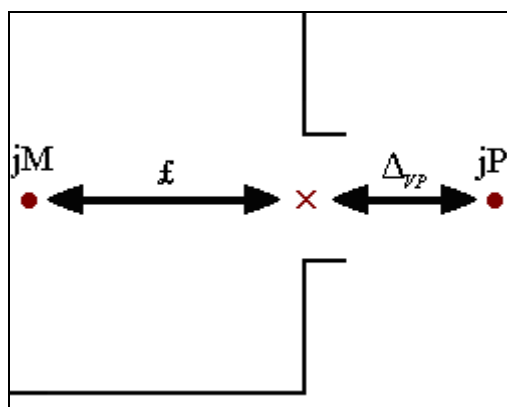
Une première analyse qualitative du transitoire montre que la perte de pression aux ajouements des cartes-guide est un paramètre dominant du transitoire.

En effet, la vapeur produite pendant le transitoire s'accumule dans le plénum supérieur. La vapeur rentre ensuite dans les tubes-guide, via les trous aux cartes, en entraînant l'eau qui est au-dessous de ces trous. Comme la section d'une seule rangée de trous est trop faible pour permettre à toute la vapeur de sortir, d'autres rangées sont découvertes, jusqu'à l'atteinte d'un équilibre : la section de passage est alors suffisante pour évacuer toute la vapeur.

Il est évident que, si la perte de charge aux trous des cartes est élevée, il est nécessaire de dénoyer plus de rangée pour l'atteinte de cet équilibre, et donc il y a plus d'eau entraînée. Cependant, un calcul de sensibilité au coefficient singulier de perte de pression aux trous des cartes-guide, présenté en annexe 8.9, indique que les délais avant dénoyage du cœur ne changent pas en fonction de ce paramètre.

Ce fait n'est pas dû à la physique du transitoire, mais à la façon dont CATHARE calcule la perte de charge à une jonction volume-volume.

Une jonction est décrite, dans CATHARE, comme un point vecteur et deux points scalaires, qui représentent les propriétés thermohydrauliques de deux volumes connectés.



La détermination de la différence de pression entre les deux jonctions s'effectue en tenant compte des pertes de charge pour les phases liquide et vapeur avec l'équation suivante, appelée *natural pressure equation* :

$$P_{jM} - P_{jP} = \frac{1}{2} \zeta_{Lj} (1 - \alpha_{Gj}) \rho_{Lj} v_{Lj}^2 + \frac{1}{2} \cdot \zeta_{Gj} \alpha_{Gj} \rho_{Gj} v_{Gj}^2$$

Dans l'équation,  $\zeta$  est le coefficient singulier de perte de charge. Une fois la différence de pression déterminée, le code résout l'équation de quantité de mouvement suivante (cf.[14]) :

$$\begin{aligned} \mathfrak{f}_j^* \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\alpha}_{Lj} \bar{\rho}_{Lj} v_{Lj}) \right] + \bar{\alpha}_{Lj} \bar{\rho}_{Lj} \frac{v_{Lj}^2}{2} + \frac{\mathfrak{f}_j^* g}{2} \alpha_{Lj} \rho_{Lj} + \bar{\alpha}_{Lj} \Delta P_j + P_j \Delta \alpha_{Lj} = \\ = \mathfrak{f}_j^* \tau_{ij} - \frac{1}{2} \frac{(\mathfrak{f}_j^*)^2}{\omega_j} P_{Fj} C_{Fj} \alpha_{Lj} \bar{\rho}_{Lj} v_{Lj} |v_{Lj}| \end{aligned}$$

Dans le premier membre de l'équation on peut reconnaître les termes de dérivée de la quantité de mouvement, d'énergie cinétique, de gravité et de variation de pression au long de la jonction.

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

Dans l'autre membre il y a un terme de frottement inter-facial et un terme de frottement aux parois de la jonction. La perte de charge singulière rentre seulement dans la *natural pressure equation*.

Dans l'équation de la quantité de mouvement, la perte de charge aux parois, ainsi que le frottement inter-facial, sont calculés tout au long la longueur  $\mathcal{L}^*$ . Cette longueur s'exprime comme :

$$\mathcal{L}_j^* = \mathcal{L} + \Delta_{vp}$$

Où  $\mathcal{L}$  s'appelle *integration length*, ou longueur d'intégration. Le terme  $\Delta_{vp}$  est simplement la longueur d'intégration du volume adjacent.

Pour un volume, la longueur d'intégration est par défaut :

- le 2% de la hauteur du volume, si la jonction est verticale,
- le 10% du diamètre hydraulique du volume, si la jonction est horizontale.

Cette manière de calculer la longueur d'intégration est en général adaptée à toute sorte de jonction, sauf pour les jonctions de petite taille qui relient des volumes relativement gros, tels que le plénum supérieur et les tubes-guide. Dans notre cas, la perte de charge est proportionnelle aux diamètres hydrauliques du plénum supérieur et des tubes-guide, qui sont très grands. En somme, à la place de voir un trou, le code CATHARE calcule la perte de charge sur un long tuyau.

La perte de charge aux parois de la jonction ainsi calculée est tellement importante qu'elle écrase la contribution de la perte de charge singulière.

Pour pallier ce phénomène, on a modifié la routine CATHARE VJONOU.f, qui calcule la longueur d'intégration, de manière à avoir seulement la contribution de la perte de charge singulière. En annexe 8.9, on démontre que la façon dont CATHARE calcule la perte de charge aux jonctions des cartes-guide est pénalisante, vis-à-vis du délai avant dénoyage du cœur.

Le choix de ce coefficient singulier (corrélation classique de CATHARE) est en conséquence pénalisante (2,875) et la modification de la routine VJONOU.f n'a pas été retenue. On peut néanmoins dire qu'elle allongerait le délai opérateur de 700 secondes (12 minutes environ) pour le palier CPY (voir annexe 8.9).

## 5.8 Pression de l'enceinte

Durant le transitoire de perte de refroidissement, l'évolution du primaire conduit au rejet de liquide et de vapeur dans l'enceinte. Ces rejets conduisent à la pressurisation du bâtiment. Des calculs PAREO ont montré, dans la note [7], que la pressurisation dans l'enceinte suite à une perte du RRA, en configuration d'ouverture directe de cuve, peut atteindre la valeur de 1,5 bar en trois heures. La pression de l'enceinte a deux effets différents selon la configuration du circuit primaire considérée.

- Lorsque le trou d'homme du pressuriseur est ouvert, la pressurisation de l'enceinte a un effet négatif pour le délai avant opérateur, car la pression tasse le niveau cuve, induisant un dénoyage précoce [5].
- Dans l'ouverture directe de cuve, d'un côté la pression tasse le niveau, en conduisant au découvrage précoce du cœur ; de l'autre côté, le fait que le niveau soit tassé par la pression réduit le taux de vide à l'équilibre, donc les expulsions massiques. Un calcul de sensibilité est présenté en annexe 8.13. Le résultat de ce calcul indique la

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

valeur de pression enceinte de 1 bar (configuration de référence) comme étant pénalisante.

### 5.9 Circulation naturelle dans le cœur

Le transitoire en annexe 8.6 permet d'observer un phénomène de circulation naturelle via les bypasses du cœur. L'estimation de son rôle est importante pour la pénalisation du transitoire. Un calcul de sensibilité est présenté en annexe 8.12. On conclut que la modélisation axiale du cœur dans CATHARE, qui ne permet pas les écoulements en contre-courant, pénalise suffisamment la circulation naturelle. On retient donc le cas avec coefficients singuliers classiques comme modélisation pénalisée, sans ajouter des pertes de charge supplémentaires. A savoir :

- $\zeta = 6,31$  POUR BYPASS (bypasse du cœur via son enveloppe) ;
- $\zeta = 245$  POUR BPTG (bypasse du cœur via les crayons de guidage des barres de contrôle) ;

### 5.10 Pénalisation de la recirculation par les ajutages d'aspersion

Une fois que l'eau sort des tubes-guide, elle occupe le dôme de la cuve. A ce point, une partie de l'eau sort par la brèche, l'autre partie retourne dans le primaire via les ajutages d'aspersion du dôme. On pénalise en ne prenant pas en compte de retour d'eau dans le réacteur par les ajutages : on modifie alors les jeux de données comme illustré en annexe 8.4 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** En pratique, on fait en sorte que ajutages soit plus haut que le PJC à l'aide d'un petit élément axial, afin que toute l'eau qui sort par les tubes-guide soit définitivement perdue : ce choix de modélisation introduit une pénalisation vis-à-vis du délai opérateur.

### 5.11 Modélisation des tubes-guide

Les tubes-guide ont pour rôle d'abriter les grappes de commande en position relevée et de les guider vers le cœur. Une analyse détaillée de la géométrie, tirée de la note [9], est présentée en annexe 8.2. Plusieurs modélisations ont été envisagées afin d'identifier une configuration réaliste et une configuration suffisamment pénalisée. Les modélisations utilisées sont décrites en annexe 8.5.

Les configurations retenues sont les suivantes :

- Modèle SCAR : configuration de base (figure 7), qui a été utilisée pour une analyse qualitative du transitoire ;
- Modèle avec les tubes-guide étanches (figure 6) ;
- Modèle réaliste : le cas géométriquement le plus proche de la configuration réelle est représenté en figure 9. Cette modélisation représente « l'optimum » qui minimise les expulsions massiques ;
- Modèle pénalisant : les tubes-guide sont modélisés avec un seul volume comportant 7 jonctions latérales aux niveaux des cartes (figure 8).

Les calculs de sensibilité à la modélisation sont présentés en annexe 8.8. A l'issue du calcul de sensibilité, la représentation des fuites aux cartes avec une seule jonction (SCAR) comporte un délai avant découverture plus long que dans le cas réaliste. D'un autre côté, le fait de négliger totalement les fuites latérales est une hypothèse trop pénalisante, au moins

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

pour le palier CPY (la section des trous aux cartes-guide sur le CPY est importante, à différence des autres paliers).

La modélisation la plus réaliste (en figure 9) est celle qui présente le délai associé le plus long (voir annexe 8.11).

La modélisation retenue est celle en figure 8, qui tient compte de la position de chaque carte dans les tubes-guide. Pour pénaliser cette modélisation on néglige une partie de la section de passage de chaque fuite. La section de passage pour une carte-guide est calculée en annexe 8.2.

La géométrie des tubes-guide est l'unique paramètre dominant qui change en fonction du palier. Les pénalisations effectuées sur le 1300 et sur l'EPR sont décrites aux chapitres 6.2.1 et 6.2.2.

## 6. Résultats de l'étude

### 6.1 Palier CPY (étude de référence)

#### 6.1.1 Paramètres dominants

Suite aux résultats des calculs de sensibilité et à l'analyse physique du transitoire la configuration pénalisante retenue est :

- La puissance nominale a été pénalisée à 102%  $P_n$ . Le coefficient de la loi SERMA pour la puissance résiduelle à 2 jours est pénalisé de  $2\sigma$  pour couvrir les incertitudes. L'étude néglige la décroissance de la puissance résiduelle ;
- La modélisation de la rupture d'étanchéité du couvercle est un paramètre dominant et la modélisation pénalisante retenue est celle avec une brèche de type PIQBREK ;
- Dans la configuration retenue, pour que l'eau ne rentre pas par les ajutages d'aspersion, on modifie les jeux de données comme en figure 4 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ;
- Le modèle pour les tubes-guide est celui en figure 8, avec 7 jonctions pour représenter les fuites latérales ;
- La section de fuite latérale, ainsi que le périmètre frottant de la fuite, ont été pénalisés (voir annexe 8.2) ;
- Le coefficient de perte de pression à la sortie des tubes-guide retenu est  $\zeta_{TUBE} = 2,85$ , arbitrairement pénalisé à  $\zeta_{TUBE} = 2,55$  ;
- La valeur de pression de l'enceinte pénalisante est  $p_{ext} = 1$  bar tout au long du transitoire ;
- Le coefficient singulier de perte de pression aux cartes n'est pas un paramètre dominant et on retient la valeur réaliste de 2,875 ;
- Les coefficients singuliers de perte de pression aux bypasses du cœur sont standard ;
- Les parois du primaire sont adiabatiques pour pénaliser le transitoire ;
- Les épingles GV sont vides, ce qui pénalise la masse primaire.

Les paramètres dominants et les pénalisations relatives sont résumés dans le tableau suivant.

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

tableau 1 : paramètres dominants pour le palier CPY

Puissance thermique	2775	MW
Puissance pénalisée (102%)	2830,5	MW
Coeff. SERMA+2 $\sigma$ à 2 jours (gestion PMOX)	0,48%	
Masse d'eau au PJC	157.000	kg
Épingles GV	vides	
Parois du primaire	adiabatiques	
Pression de l'enceinte	1	bar
Température initiale du primaire	60	°C
Modélisation de la sortie des tubes-guide	PIQBREK	
Section PIQBREK	0,12	m <sup>2</sup>
Modélisation des ajutages du downcomer	voir figure 4	
Modélisation des tubes-guide	voir figure 8	
Coeff. singulier à la sortie des tubes-guide	2,55	
Coefficient singulier aux cartes-guide	2,875	
Section de fuite d'une dent pénalisée (voir 8.2)	96	mm <sup>2</sup>
Section de fuite par carte guide (12 dents)	1150	mm <sup>2</sup>
Nombre de cartes-guide	7	
Coefficient singulier aux bippasses du cœur	standard	

**6.1.2 Résultats**

Un calcul CATHARE avec les hypothèses du tableau 1 a donné un délai avant découverture du cœur pour le CPY de 10000 secondes soit **2 heures et 45 minutes** :

- la phase d'échauffement dure 1000 secondes environ, soit 16 minutes et 40 secondes,
- la phase d'expulsion dure 3000 secondes environ, soit 50 minutes,
- la phase de vaporisation résiduelle dure 6000 secondes environ, soit 1 heure et 40 minutes.

Le critère « température du crayon moyen » égale à 500°C est atteint à 11175 secondes soit 3 heures et 6 minutes après le début de l'accident.

A titre de comparaison le même calcul, effectué avec la modélisation la plus réaliste (figure 9), donne un délai de 3 heures et 20 minutes. La durée « réaliste » se décompose de la façon suivante :

- 1000 secondes (16min40) pour la phase d'échauffement,
- 3000 secondes (50min) pour la phase d'expulsion,
- 8000 secondes (2h13min) pour phase de vaporisation résiduelle.

On remarque que l'unique phase du transitoire qui est rallongée est celle de vaporisation résiduelle. En effet, avec le calcul de sensibilité on vise à pénaliser la quantité d'eau

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

expulsée, ce qui a un impact uniquement sur le temps nécessaire pour la vaporisation de l'inventaire résiduel.

Dans le cadre du palier 900, le calcul est valable à la fois pour le CP0 et pour le CPY, compte tenu de la puissance résiduelle qu'on a imposée (la puissance du CP0 est plus faible).

## **6.2 Conditions d'utilisation ou d'application des résultats aux autres paliers**

La méthodologie développée est valable pour tous les autres paliers, car les résultats dépendent exclusivement des paramètres suivants :

- Géométries sensibles : tubes-guide, plénum supérieur, ajutages d'aspersion ;
- Perte de charge à la sortie des tubes-guide ;
- Pression et température initiales ;
- Puissance résiduelle ;
- Masse d'eau dans le circuit primaire, en particulier remplissage des épingles.

L'unique paramètre qui change est la modélisation des tubes-guide. Une modélisation différente pour chaque palier est alors retenue. Compte tenu de l'étanchéité des tubes-guide dans l'EPR, correspondant à la modélisation en figure 7, des calculs de sensibilité à la modélisation géométrique du plénum ne sont pas nécessaires pour ce palier.

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve****6.2.1 Palier 1300**

Les paramètres dominants pour le palier P4 sont reportés dans le tableau suivant.

tableau 2 : paramètres dominants pour le palier P4

Puissance thermique	3800	MW
Puissance pénalisée (102%)	3876	MW
Coeff. SERMA+2 $\sigma$ à 2 jours (gestion GALICE)	0,48%	
Masse d'eau au PJC	179.000	kg
Épingles GV	vides	
Parois du primaire	adiabatiques	
Pression de l'enceinte	1	bar
Température initiale du primaire	60	°C
Modélisation de la sortie des tubes-guide	PIQBREK	
Section PIQBREK	0,12	m <sup>2</sup>
Modélisation des ajutages du downcomer	voir figure 4	
Modélisation des tubes-guide	voir figure 8	
Coeff. singulier à la sortie des tubes-guide	2,55	
Coefficient singulier aux cartes-guide	2,875	
Section de fuite d'une dent pénalisée (voir 8.2)	96	mm <sup>2</sup>
Section de fuite par carte guide (4 dents)	384	mm <sup>2</sup>
Nombre de cartes-guide	6	
Coefficient singulier aux bippasses du cœur	standard	

Le palier P4 présente une géométrie du dôme « en baignoire ». A cause de la forme des internes supérieurs, sur ce palier le fond du volume dôme se situe 0,7 mètres plus bas que le PJC.

La plus faible section de fuite latérale aux cartes-guide influence le délai avant découverture pour le P4, qui est plus faible par rapport au CPY (la quantité d'eau expulsée est plus importante). Le calcul est présente en annexe 8.14.

Le délai avant découverture du cœur pour le palier P4 est de 6100 secondes soit **1 heure et 41 minutes**. Ce délai est décomposable en :

- 1000 secondes d'échauffement (environ 16 minutes),
- 2700 secondes d'expulsion (45 minutes),
- 2400 secondes de vaporisation résiduelle (40 minutes).

Le critère « température du crayon moyen » égale à 500°C est atteint à 8100 secondes soit 2 heures et 15 minutes après le début de l'accident.

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve****6.2.2 Palier EPR**

**Nota important** : Certaines hypothèses utilisées pour le calcul EPR ne sont plus valables aujourd'hui. En particulier, le niveau primaire initial ne se situe pas au PJC mais à la PTB-RRA. De plus, le délai de passage en API est de 21 heures et non de 2 jours : la puissance résiduelle passe donc de 21 MW à 28 MW. Ce calcul serait donc à reprendre : il est présenté par la suite à titre exploratoire.

D'un point de vue qualitatif, le niveau étant à la PTB-RRA, la quantité d'eau disponible est moindre. La phase d'échauffement est raccourcie (ce délai est directement proportionnel à la masse d'eau et inversement proportionnel à la puissance résiduelle). On peut considérer que la durée de cette est diminuée de 4 à 6 minutes. La phase d'expulsion est aussi légèrement raccourcie, car la masse d'eau à la PTB-RRA est de 152 tonnes (voir figure 1 en référence [31]) contre 179 tonnes au PJC. Sur la courbe (figure 58) on peut voir que l'on passe à 152 tonnes au bout de 1000 secondes. La phase d'expulsion débutant à 750 secondes, elle serait raccourcie de 250 secondes soit 4 minutes environ (en considérant que la cinétique d'expulsion reste la même).

Les paramètres dominants pour le palier EPR sont reportés dans le tableau suivant.

tableau 3 : paramètres dominants pour le palier EPR

Puissance thermique	4300	MW
Puissance pénalisée (102%)	4386	MW
Coeff. SERMA+1,645 $\sigma$ à 2 jours	0,48%	
Masse d'eau au PJC	179.000	kg
épingles GV	vides	
parois du primaire	adiabatiques	
pression de l'enceinte	1	bar
Température du primaire	60	°C
modélisation de la sortie des tubes-guide	PIQBREK	
Section PIQBREK	0,12	m <sup>2</sup>
Modélisation des ajutages du downcomer	voir figure 4	
modélisation des tubes-guide	voir figure 6	
Coeff. singulier à la sortie des tubes-guide	2,55	
Coefficient singulier aux cartes-guide	-	
Section de fuite d'une dent pénalisée	-	mm <sup>2</sup>
Section de fuite par carte guide	-	mm <sup>2</sup>
Nombre de cartes-guide	-	
Coefficient singulier aux biphases du cœur	standard	

Comme sur le palier 1300, l'EPR présente une géométrie du dôme « en baignoire ». A cause de la forme des internes supérieurs, sur ce palier le fond du volume dôme se situe 0,7 mètres en dessous du PJC.

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

La géométrie des tubes-guide de l'EPR est présentée en annexe 8.2.3. L'EPR ne présente aucune fuite latérale, car les tubes-guide des grappes sont étanches **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** La cinétique de la vidange suite à la perte du RRA est calculée grâce à la modélisation présentée en figure 6**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Le calcul du délai opérateur est présente en annexe 8.15. Le délai avant découverte du cœur pour le palier EPR est de 3360 secondes soit **56 minutes**, dont :

- 750 secondes d'échauffement (12 minutes et 30 secondes),
- 1000 secondes d'expulsion (16 minutes et 40 secondes),
- 1610 secondes d'échauffement (26 minutes et 50 secondes).

Le critère « température du crayon moyen » égale à 500°C est atteint à 4600 secondes soit 1 heure et 15 minutes après le début de l'accident.

Le délai opérateur sur l'EPR est largement moindre que sur les autres paliers, à cause de la géométrie des tubes-guide. On voit que la phase d'expulsion se termine avec le découverture d'une jonction de section suffisamment élevée, qui est capable d'évacuer le débit vapeur. Sur l'EPR, comme il n'y a pas de fuites latérales, la phase d'expulsion se termine lorsque l'entrée des tubes-guide est découverte, soit à 23 cm de la plaque supérieure du cœur.

Notons qu'à l'heure actuelle le résultat obtenu sur l'EPR ne correspond à aucune condition de fonctionnement complémentaire. En effet, la perte totale des sources électriques en état D (suffisamment ouvert – API), qui pourrait correspondre au calcul, a une probabilité d'occurrence inférieure à  $10^{-8}$  par tranche et par an [29]. Selon les règles du domaine complémentaire, cette probabilité est résiduelle.

La perte totale de la chaîne de refroidissement en état D est gérée à l'aide de la piscine IRWST (In-containment Refuelling Water Storage Tank). La puissance résiduelle est évacuée d'abord par échauffement de l'IRWST, ensuite par évaporation de l'eau de l'IRWST [29]. L'autonomie en cette configuration est de 24 heures. Le calcul du délai opérateur présenté ici pourrait représenter le délai pour la mise en service de deux pompes ISBP qui aspirent dans l'IRWST. Le délai indiqué dans le RPS [29] est de 30 minutes, en accord avec le résultat du calcul.

## 7. Conclusion

### 7.1 Réponse aux objectifs

La méthodologie développée pour l'estimation des délais avant découverte du cœur est valable pour tous les paliers, en tenant compte des différences géométriques dans la modélisation CATHARE des tubes-guide. Les transitoires ont été calculés sans appoint gravitaire. Le transitoire pénalisant est la perte totale des alimentations électriques lors de la phase de rupture de l'étanchéité du couvercle (PREC). Dans ces conditions :

- Le délai enveloppe avant le dénoyage du cœur pour le palier 900 est de 10000 secondes soit 2 h 45 minutes ;
- Le délai enveloppe avant le dénoyage du cœur pour le palier 1300 est de 6100 secondes soit 1 heure et 40 minutes.
- Le délai enveloppe avant le dénoyage du cœur pour le palier EPR est de 3360 secondes soit 56 minutes.

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve****7.2 Suites à donner**

Les résultats obtenus, en particulier le délai avant dénoyage du cœur, sont à valoriser par une étude probabiliste de sûreté. L'étude déterminera la probabilité d'échec de l'équipe de conduite pour la mise en œuvre d'un appoint en eau au primaire :

- du RCV de la tranche voisine pour le palier CPY,
- grâce à une motopompe thermique pour le 1300,
- la gestion des accidents en API/APR sur l'EPR est très différente de celle du parc en exploitation. Par exemple, l'EPR dispose d'une IS automatique sur bas niveau boucle.

Si la probabilité d'échec est suffisamment faible, une disposition complémentaire pour la gestion à court terme de l'accident (un appoint gravitaire via la piscine BK, hors EPR) pourra être supprimée.

A noter que les différentes étapes de l'ouverture directe de cuve ont une durée limitée, ce qui pourrait permettre de raffiner le modèle EPS pour dégager des marges.

## 8. Annexes

### 8.1 Evaluation du débit de vapeur à la fin de la phase d'expulsion

On peut estimer à la main le débit vapeur produit dans le cœur, qui sera une donnée utile ensuite pour pouvoir calculer les coefficients de perte de charge. A partir de la puissance résiduelle, de 13,32 MW, et de la chaleur latente d'évaporation à 100 °C et 1 bar égale à 2256,404 kJ/kg-K, si on fait l'hypothèse que toute la puissance est évacuée par vaporisation :

$$W_v = \frac{P_r}{\Delta H_{lv}} = \frac{13320}{2256,40} \frac{kg}{s} = 5,9 \frac{kg}{s}$$

qui correspond, avec une densité de 0,60 kg / m<sup>3</sup>, à un débit volumétrique de vapeur de

$$Q_v = \frac{W_v}{\rho} = 9,87 \frac{m^3}{s} .$$

### 8.2 Géométrie des tubes-guide

Un paramètre dominant du transitoire est la représentation des tubes-guide de grappe de contrôle dans CATHARE. Plusieurs modélisations, de la plus simplifiée à la plus réaliste, ont été testées, afin d'identifier une modélisation pénalisante. La géométrie des tubes-guide est décrite dans la note [9].

#### 8.2.1 Palier CP0-CPY

Dans le plénum supérieur il y a au totale 53 tubes-guide, qui peuvent être représentés avec un seul élément de poids 53.

Le tube, dont la longueur est de 3 mètres environ, présente sur la **partie inférieure** des lumières pour le passage du débit qui balaye le cœur. La partie inférieure va de la plaque supérieure du cœur à la génératrice inférieure des branches chaudes. La surface totale des lumières de débit est de 0,1 m<sup>2</sup> environ, assez grande pour assurer le même niveau d'eau à l'intérieur et à l'extérieur des tubes-guide et pouvoir intégrer le volume de la partie basse des tubes dans le plénum.

Au-dessus, dans la **partie intermédiaire**, qui va jusqu'à la plaque qui garantit l'étanchéité du couvercle, les tubes présentent 7 rangées de 12 trous qui servent à la mise en place des 7 cartes de guidage. Une carte de guidage est une plaque carrée, de 2 centimètres d'épaisseur environ, qui sert à maintenir la grappe de contrôle en position. Pour pouvoir être fixé au tube-guide, cette plaque présente 12 dents triangulaires, qui s'enfilent dans une rangée de 12 trous. Les dents sont assemblées aux trous grâce à des lignes de soudure.

La distance entre chaque carte-guide est de 317,5 mm.

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

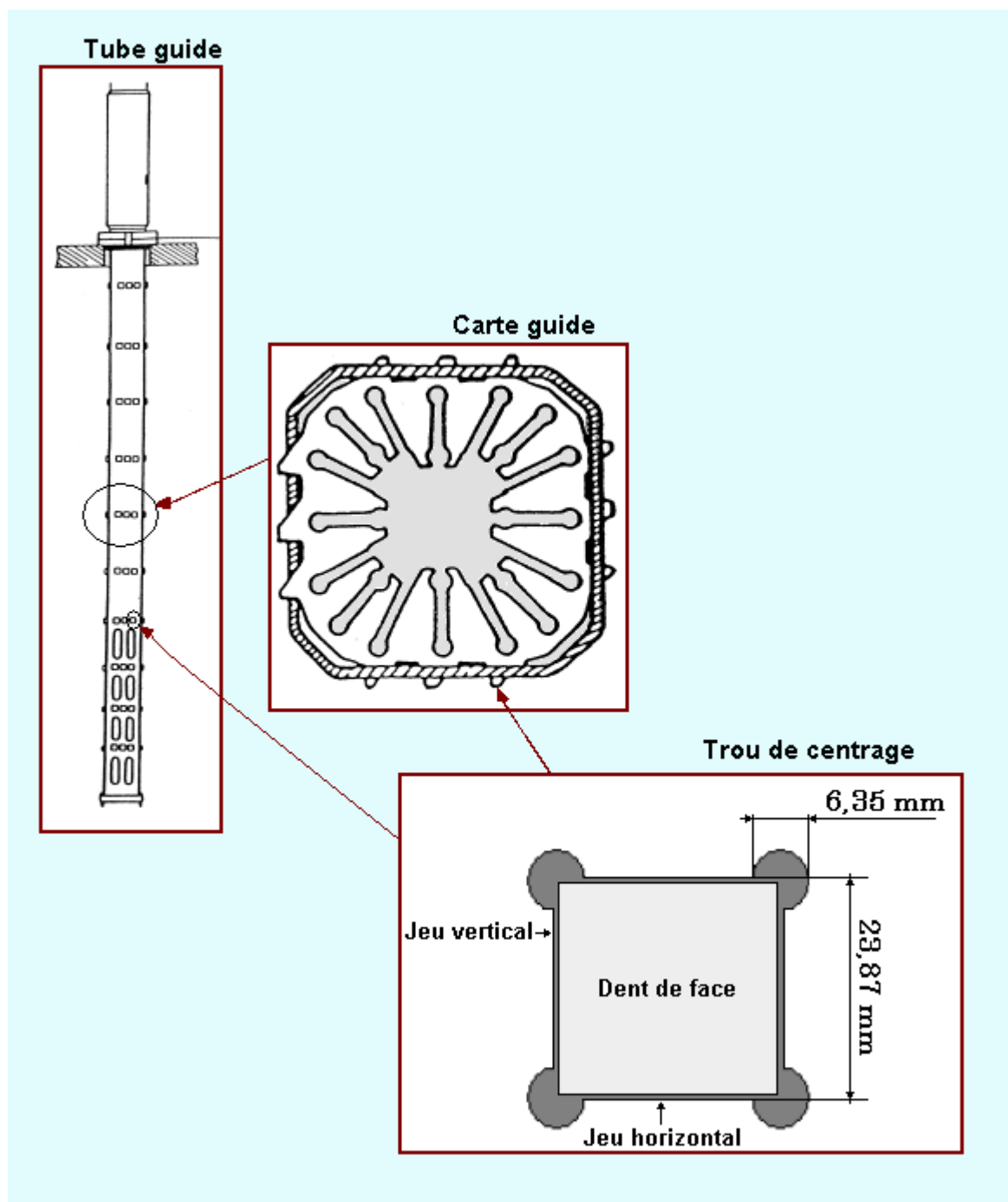


figure 1 Géométrie d'un tube-guide

En vue d'une modélisation détaillée des fuites latérales on calcule ci-dessous la section de passage, le périmètre et l'encombrement d'un trou de positionnement.

Les jeux verticaux et horizontaux qui existent entre une carte de guidage et son orifice de positionnement sont faibles et ils ne sont pas facile à évaluer, car ils dépendent de la longueur de la soudure. Le jeu de la dent triangulaire est plus important mais toujours difficile à évaluer. En conséquence, on prend comme minorante la **section** de passage des 4 trous de centrage aux 4 coins de l'orifice. Etant donné le diamètre d'un trou de centrage  $d = 6,35 \text{ mm}$  on a :

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

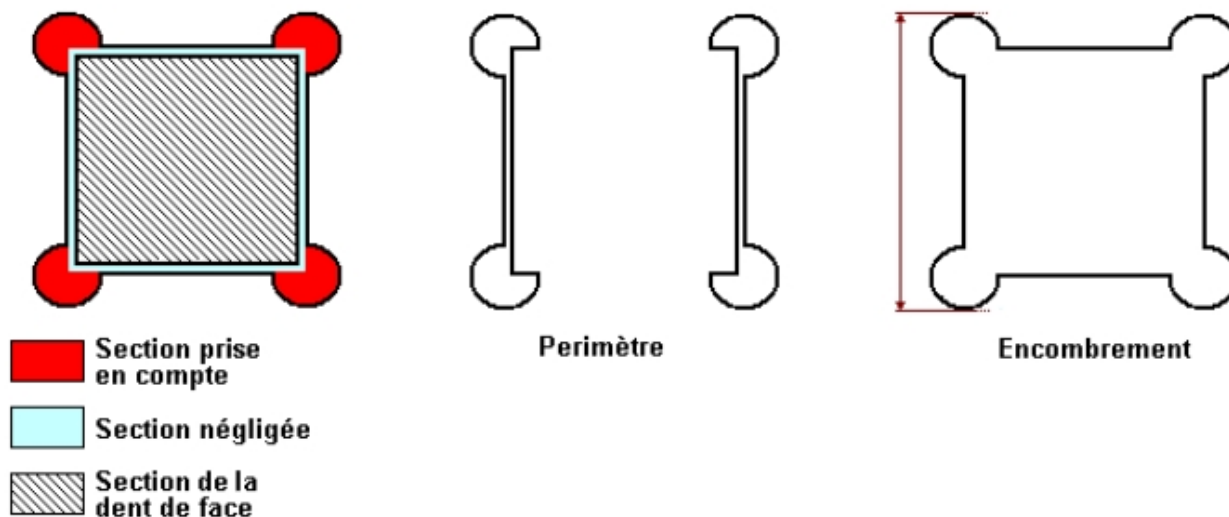
$$SECT = 4 \frac{3}{4} \frac{\pi}{4} 6,35^2 \text{ mm}^2 = 96 \text{ mm}^2 .$$

Chaque carte étant maintenue par 12 dents, la section totale pour une carte entière est 1150 mm<sup>2</sup>. Pour l'ensemble de 7 cartes la section de passage est 100 cm<sup>2</sup> environ.

Le **périmètre frottant** d'un trou est représenté dans la figure ci-dessous. Il se calcule à partir de la hauteur du trou carré, soit 23,87 mm, et du diamètre. Le périmètre est

$$PERI = (4 \cdot 23,87 + 4 \cdot \pi \cdot 6,35) \text{ mm} = 129,9 \text{ mm} .$$

Ce périmètre est pénalisé car il tient en compte du jeu latéral, où on a négligé l'écoulement. Pour une carte entière le périmètre total est 718,17 mm. L'**encombrement** est la plus grande dimension d'un trou, comme dans la figure ci-dessous. La largeur du trou carré étant 23,87 mm, l'encombrement est 30,22 mm.



La **partie supérieure** du tube-guide, au-dessus de la plaque supérieure des internes supérieures (qui sépare le couvercle du plénum), présente un seul orifice, le passage de la tige de commande de la grappe de contrôle. La grappe reste dans l'assemblage de combustible pendant le rechargement ; pour cela le trou de sortie est en pratique un diaphragme annulaire (la tige de commande reste dans le trou lorsque les internes supérieures sont en place) dont la section est de 10,57 cm<sup>2</sup>.

On peut faire les considérations suivantes à partir de la géométrie :

- Le volume de la partie basse, étant donnée sa section de passage, peut être intégré au plénum supérieur ;
- Le volume de la partie supérieure étanche peut être schématisée comme un volume ou un axial ; dans ce dernier cas, pour modéliser la contraction de section, on doit se servir d'un gadget, CATHARE, le *FLOW LIMITER*, qui simule aussi la perte de charge singulière.

Le rôle des trous sur lesquels on soude les cartes de guidage est un paramètre dominant : pour cela différentes modélisations sont proposées (annexe 8.5).

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

## 8.2.2 Palier 1300

Sur le 1300, il y a 73 tubes-guide. Chaque tube présente 6 cartes de guidage, également espacées de 317,5 mm ; chaque carte est tenue par 4 dents triangulaires ; les trous de centrage présentent les mêmes caractéristiques. Par rapport au palier CPY, la section de fuite pour chaque carte est  $384 \text{ mm}^2$ , le périmètre frottant est 239,38 mm.

## 8.2.3 Palier EPR

Dans le plénum supérieur de l'EPR il y a au total 89 tubes-guide, de section  $0,0401 \text{ m}^2$ . Dans la partie inférieure, les tubes ne présentent aucune fuite latérale. L'ouverture, qui met en communication les tubes avec le plénum, est à  $0,230 \text{ m}$  de la plaque supérieure du cœur. La section d'entrée d'un tube est  $0,082 \text{ m}^2$  (section verticale entre la plaque supérieure du cœur et les tubes-guide – voir figure 2).

Coté couvercle, la voie de communication est constituée par un orifice annulaire (à cause de la présence de la tige de commande), dont la section est  $11,5 \text{ cm}^2$ .

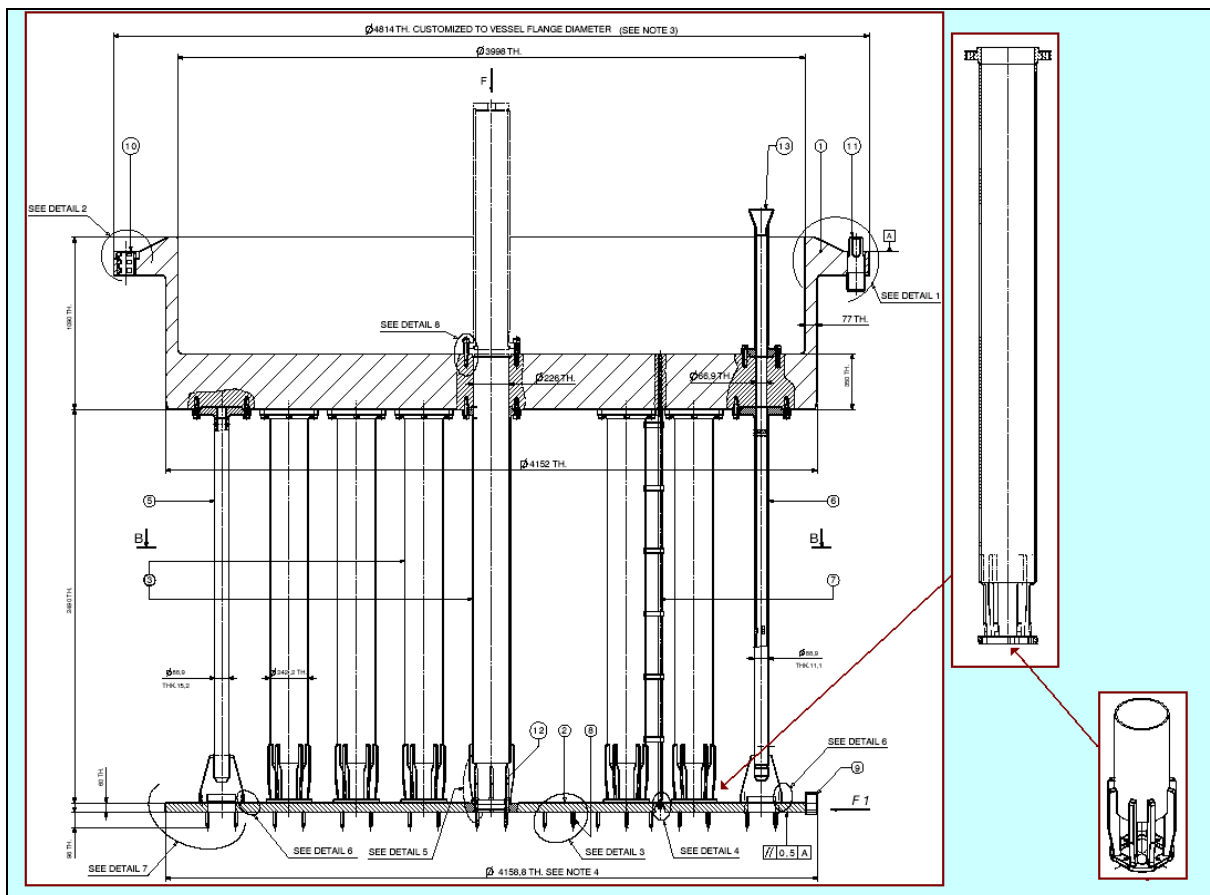


figure 2 Géométrie des tubes-guide de l'EPR. Trait de la référence [22]

## 8.3 Pertes de charge dans l'élément TGUIDE (tous paliers)

Le calcul suivant se base sur des valeurs issues du palier 900, mais il est aussi valable pour les autres paliers (le coefficient de perte de charge lorsque l'écoulement est turbulent ne dépend pas du Reynolds).

Le coefficient de perte de charge singulier à la sortie des tubes-guide peut être évalué à partir des corrélations pour les diaphragmes. En se basant sur le débit de vapeur à la fin de

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

la phase d'expulsion calculé au chapitre 8.1. Etant donné que la section de passage d'un tube-guide est de  $0,027 \text{ m}^2$ , on obtient la vitesse de la phase vapeur :

$$v_v = \frac{Q_v}{A} = \frac{9,8688}{0,027925 \cdot 53} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 13,32 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

Où  $\alpha$  est supposé, en première approximation, égal à 0,5.

La viscosité dynamique de la phase vapeur est de  $12,2692 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , ainsi le nombre de Reynolds est

$$\text{Re} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \frac{\rho}{\mu} v = 206050.$$

Du mémento des pertes de charge [20], on prend le coefficient de perte de charge singulière associé à un diaphragme. Si le régime d'écoulement est turbulent, on a alors :

$$\zeta = \frac{2\Delta p}{\rho v^2} = 2,85.$$

Enfin il y a encore la contribution due au multiplicateur diphasique pour un orifice, qui peut être évaluée par la formule de Beattie [18] :

$$\Phi^2 = \left[ 1 + x \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) \right]^{0,8} \left[ 1 + x \left( \frac{\rho_L \mu_L}{\rho_G \mu_G} - 1 \right) \right]^{0,2}.$$

On rappelle que le multiplicateur diphasique s'utilise comme un coefficient de proportionnalité entre les pertes de pression en écoulement monophasique et diphasique :

$$\Phi^2 = \frac{\left( \frac{2\Delta p}{\rho v^2} \right)_{2P}}{\left( \frac{2\Delta p}{\rho v^2} \right)_{1P}}.$$

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

Les valeurs du multiplicateur de Bettie en fonction du taux de vide sont résumées dans le tableau suivant :

taux de vide (modèle homogène) $\alpha$	titre $x$	multiplieur $\Phi_{LO}^2$		densité $\rho$	viscosité $\mu$
0	0	1		kg/m <sup>3</sup>	kg/ms
0,01576902	0,00001	1,0781594	Liquide	958	281
0,13819926	0,0001	1,53282196	Vapeur	0,598	12,26
<b>0,34811047</b>	<b>0,00033</b>	<b>2,34930145</b>			
0,54018864	0,00066	3,39567021			
0,61805654	0,001	4,44038707			
0,94680872	0,01	31,4611597			
0,99503108	0,1	301,075348			
0,99950088	0,5	1499,32807			
1	1	2997,14321			

Vis-à-vis des valeurs du multiplicateur, on peut conclure que la valeur du coefficient de perte de charge singulier de 2,85 représente une minoration du coefficient réel, qui couvre les incertitudes du calcul, en permettant aussi de négliger les éventuels tubes-guide sans tige. Le coefficient réel serait plutôt de l'ordre de

$$\zeta \cdot \Phi_{LO}^2 \cong 2,349 \times 2,85 \cong 6.$$

Une étude de sensibilité à la perte de pression est nécessaire, car la pressurisation du système, tassant le niveau cuve, peut avoir pour conséquences :

- Une diminution du taux de vide dans le plénum supérieur et en conséquence une diminution des expulsions massiques de liquide pendant la phase d'expulsion ;
- Un découverture précoce du cœur par tassage de l'émulsion dans le cœur.

Le calcul donnant le délai opérateur a été effectué avec un coefficient singulier de perte de charge de **2,5**.

### Perte de charge aux fuites latérales

Pour une ouverture dans une paroi de surface illimitée (liaison entre deux grands volumes) le coefficient de perte de charge [20] se calcule grâce à

$$\zeta = \frac{\Delta H}{\frac{\rho g v_0^2}{2}} = \zeta' + \tau + 1 + \zeta_F,$$

Où  $\tau$  tient compte de la forme de la paroi, de son épaisseur, et  $\zeta_F$  du frottement sur toute la profondeur de l'ouverture. En négligeant l'épaisseur des tubes-guide,  $\zeta_F$  est nul.

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

Le coefficient est dans ce cas **2,85**. Un calcul de sensibilité a révélé une influence nulle de la perte de charge aux cartes sur le délai ; il est présenté en annexe 8.9.

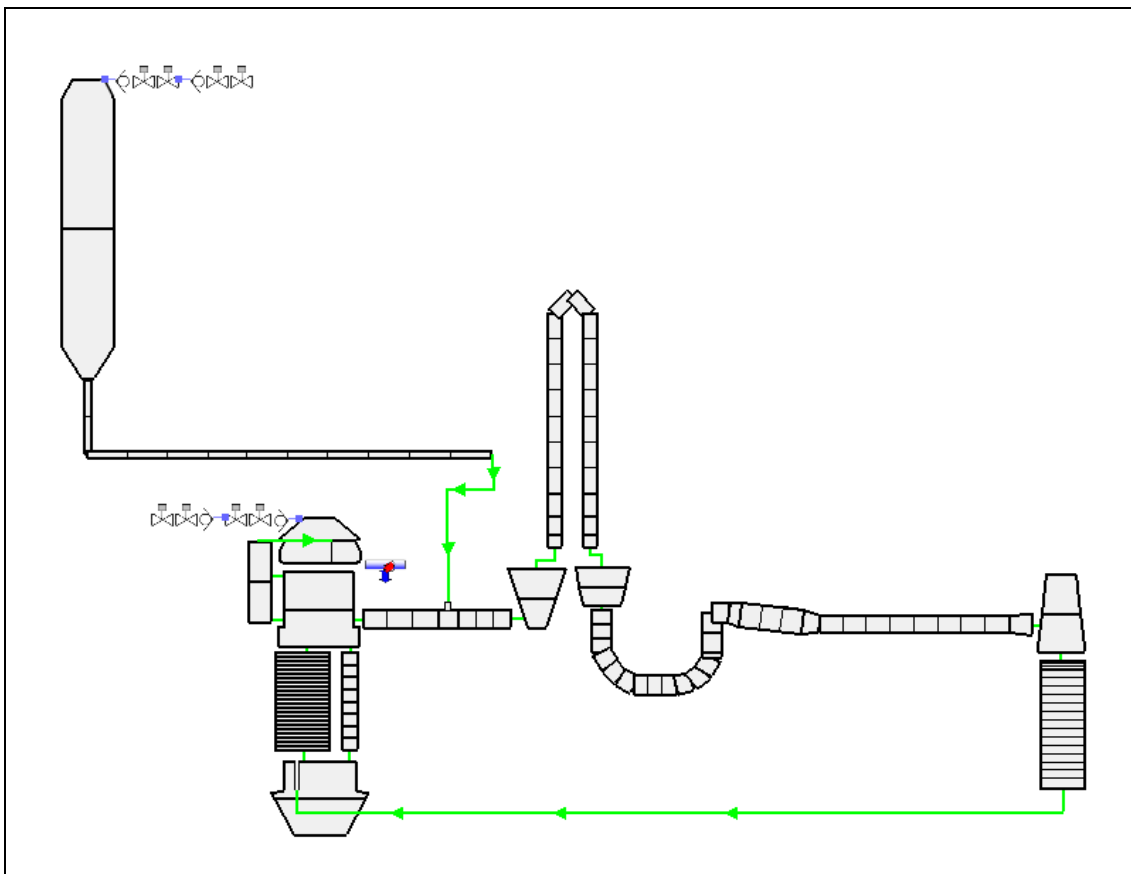
**8.4 Modélisation du circuit primaire (palier 900)**

figure 3 Modélisation du circuit primaire dans le jeu de données SCAR

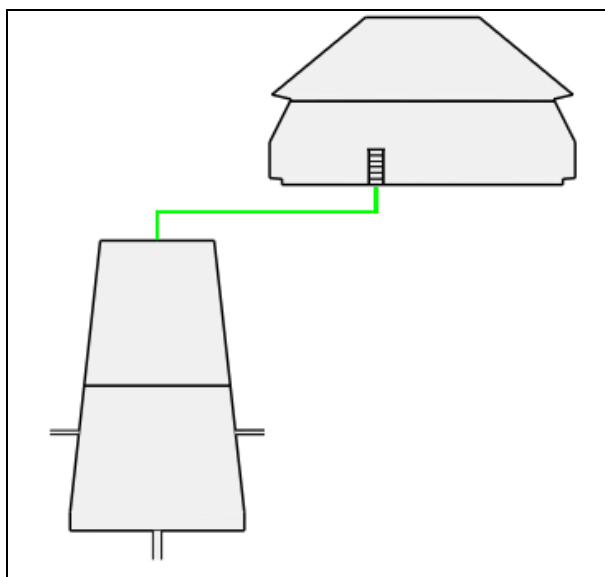


figure 4 Modélisation des ajutages d'aspersion pour la configuration PIQBREK. L'introduction d'un élément axial aux ajutages empêche l'eau de rentrer dans le downcomer

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

## 8.5 Différentes modélisations des tubes-guide (palier 900)

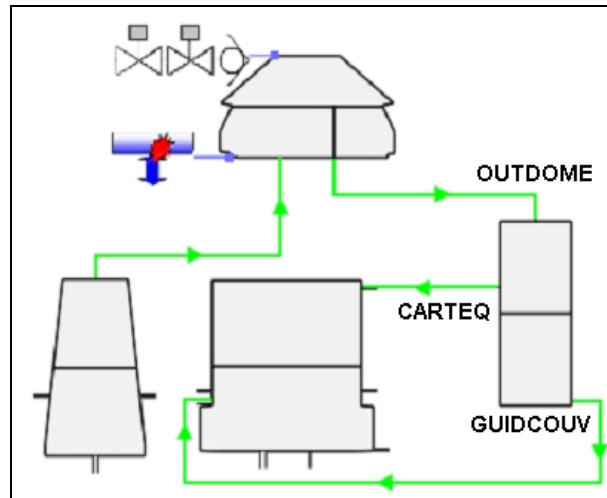


figure 5 Noms des jonctions des tubes-guide

La figure ci-dessous donne les noms des jonctions des tubes-guide. On peut imaginer plusieurs modélisations pour représenter la géométrie des tubes-guide, qui est décrite en annexe 8.2.

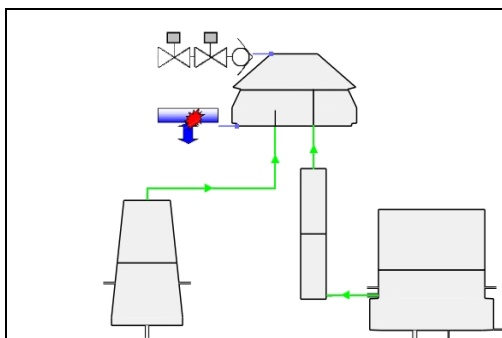


figure 6 Modélisation étanche

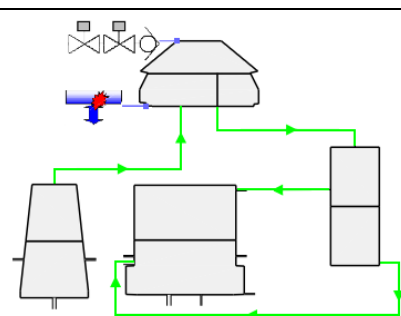


figure 7 Modélisation volume

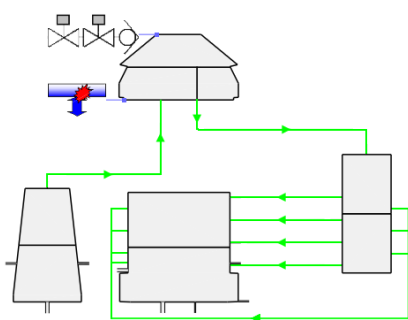


figure 8 Modélisation avec 7 jonctions

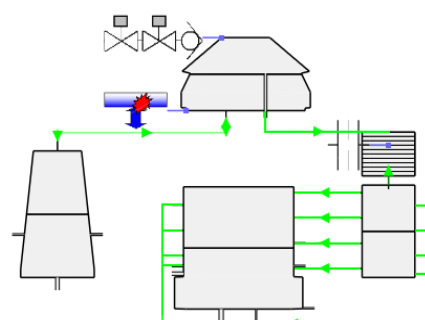


figure 9 Modélisation axiale

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve****8.6 Evolution du primaire au cours du transitoire (calcul de référence – palier 900)**

Ce premier transitoire est issu d'un calcul avec le jeu de données SCAR. Ce jeu de données utilise le modèle en figure 7.

On observe d'abord l'évolution de l'inventaire en masse primaire pendant le transitoire (figure 10). Selon la variation de la masse primaire, d'abord rapide, ensuite lente, on peut distinguer la phase d'expulsion du liquide, la phase de vaporisation résiduelle et la phase d'échauffement de gaine (où le débit de vapeur se réduit). La dérivée de la masse primaire (voir figure 11 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) quantifie la vitesse de vidange. A la différence de la note [3] on n'observe pas la phase d'échauffement, cet aspect sera discuté ultérieurement.

Un facteur qui influence le transitoire est bien sûr l'écoulement dans les tubes-guide. Les paramètres qui influencent au premier ordre l'écoulement vont influencer le transitoire, car le délai dépend de la phase d'expulsion d'eau. En figure 18 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, on présente les débits aux jonctions des tubes-guide ; on rappelle que dans ce cas de référence les tubes-guide sont modélisés par une seule carte, avec une position correspondante à la dernière des cartes.

La courbe en figure 18 montre le débit de vapeur dans les tubes-guide. On voit qu'au début du transitoire, tant que la jonction GUIDCOUV (voir figure 20) est en eau, la vapeur rentre par les cartes, pour ensuite sortir par OUTDOME. On remarque aussi que cette phase est instable : les débits oscillent à cause de l'entraînement d'un mélange diphasique eau-vapeur.

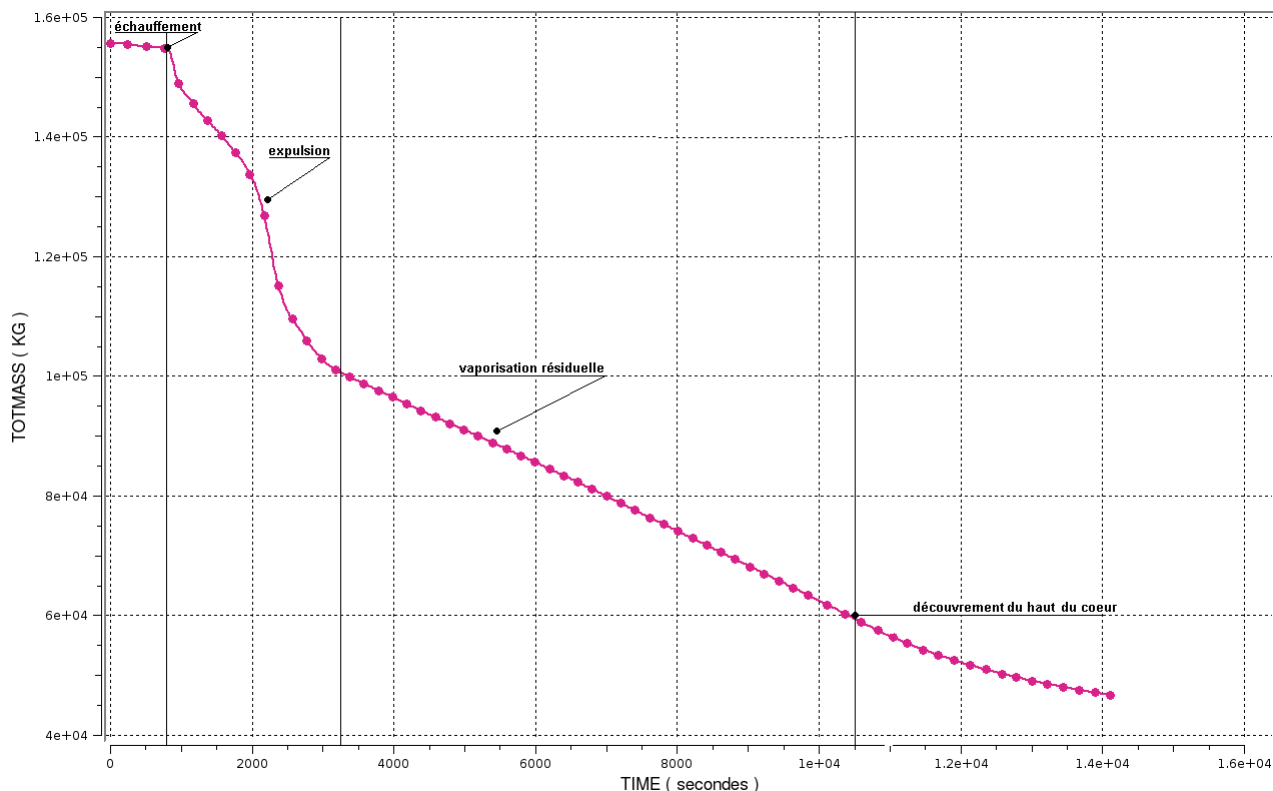


figure 10 Masse stockée dans le circuit primaire

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

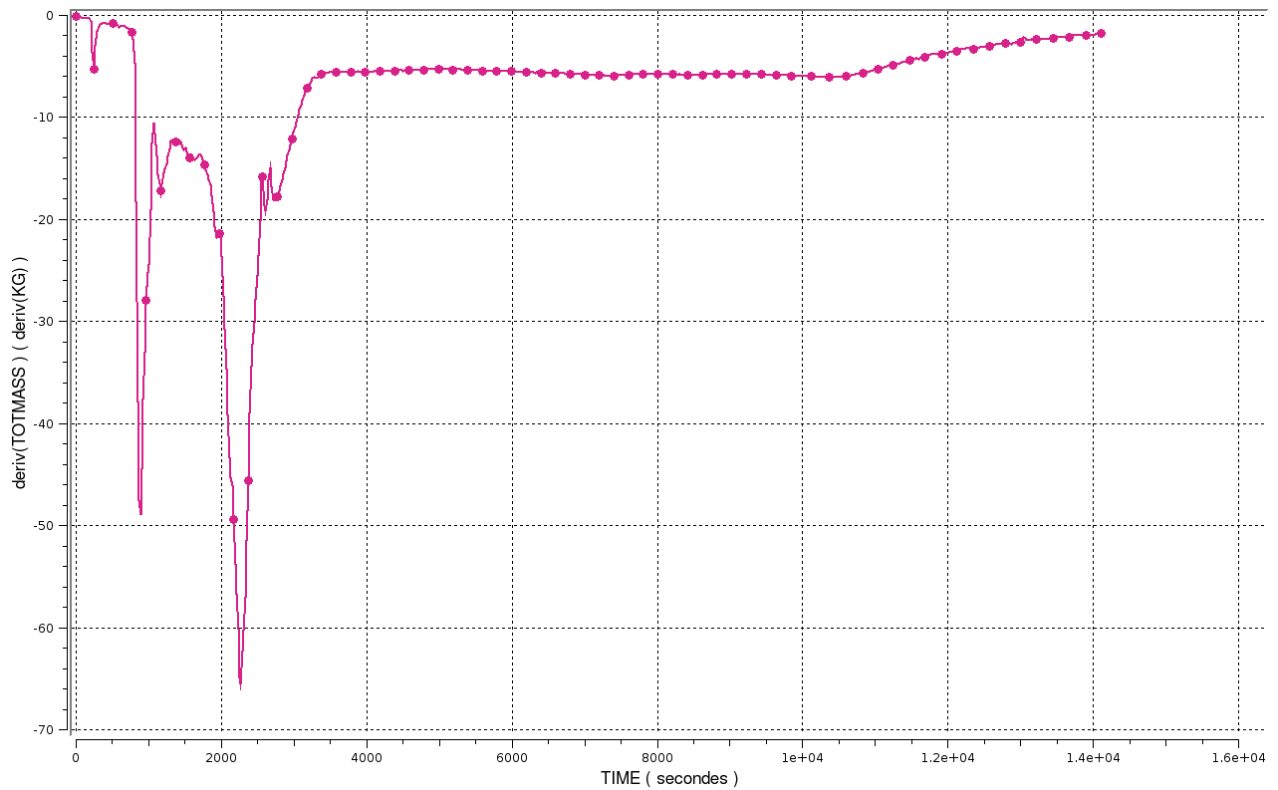


figure 11 Dérivée de la masse dans le primaire

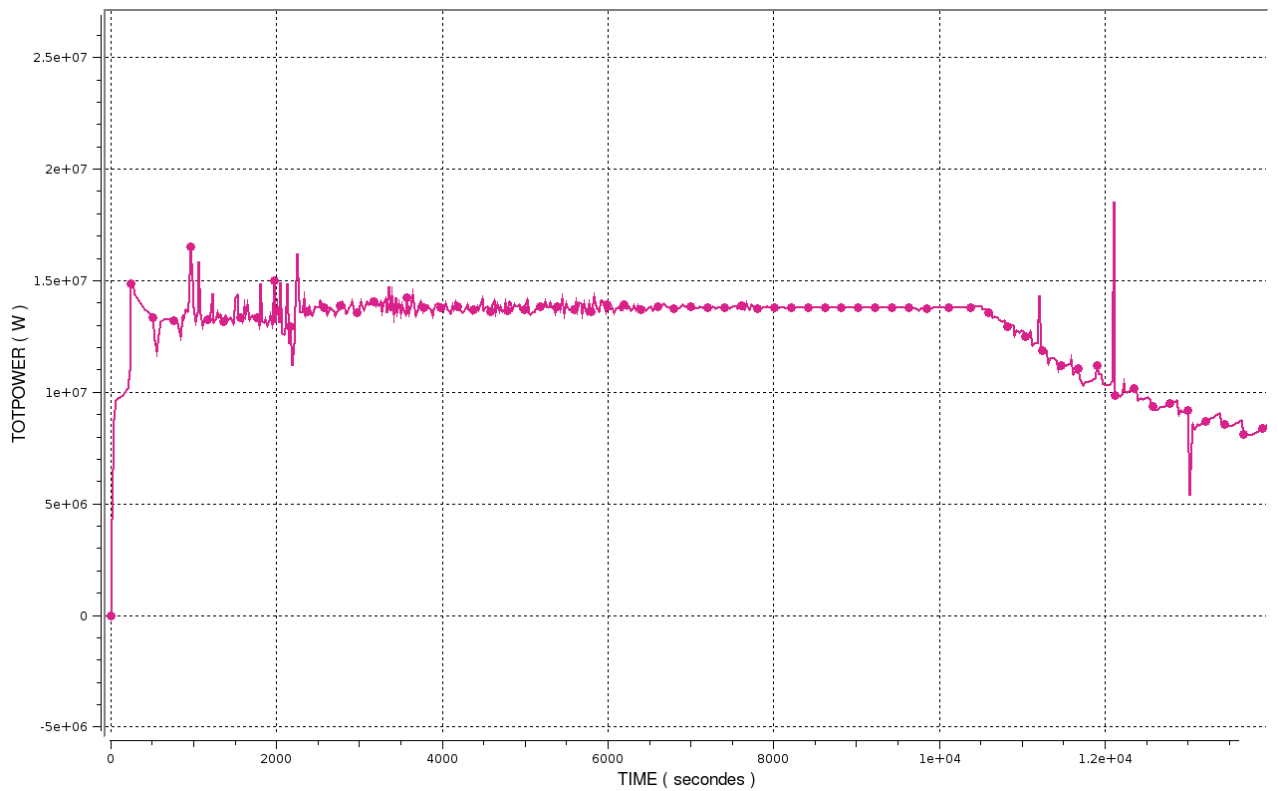


figure 12 Puissance échangée dans le cœur

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

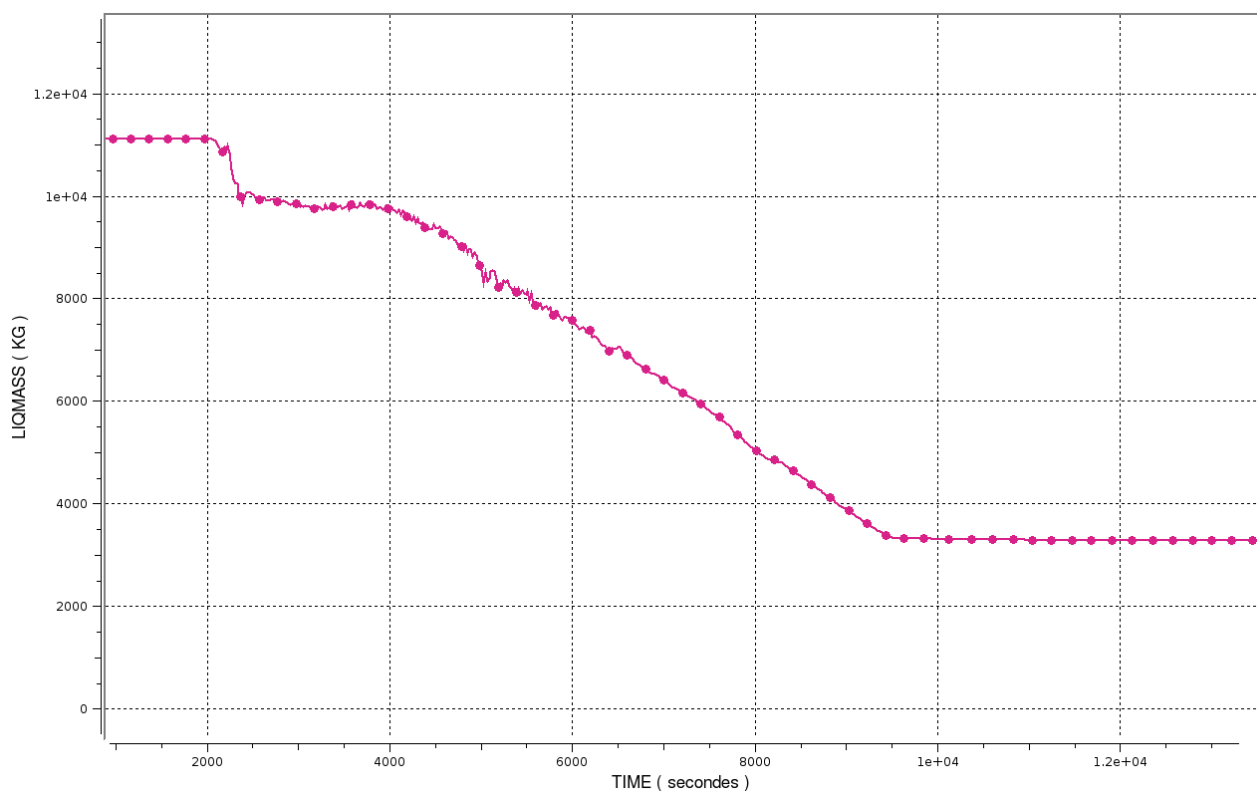


figure 13 Masse dans une branche froide. A la fin du transitoire, on peut observer que les branches en U sont restées pleines ; elles n'ont pas contribué au refroidissement du cœur

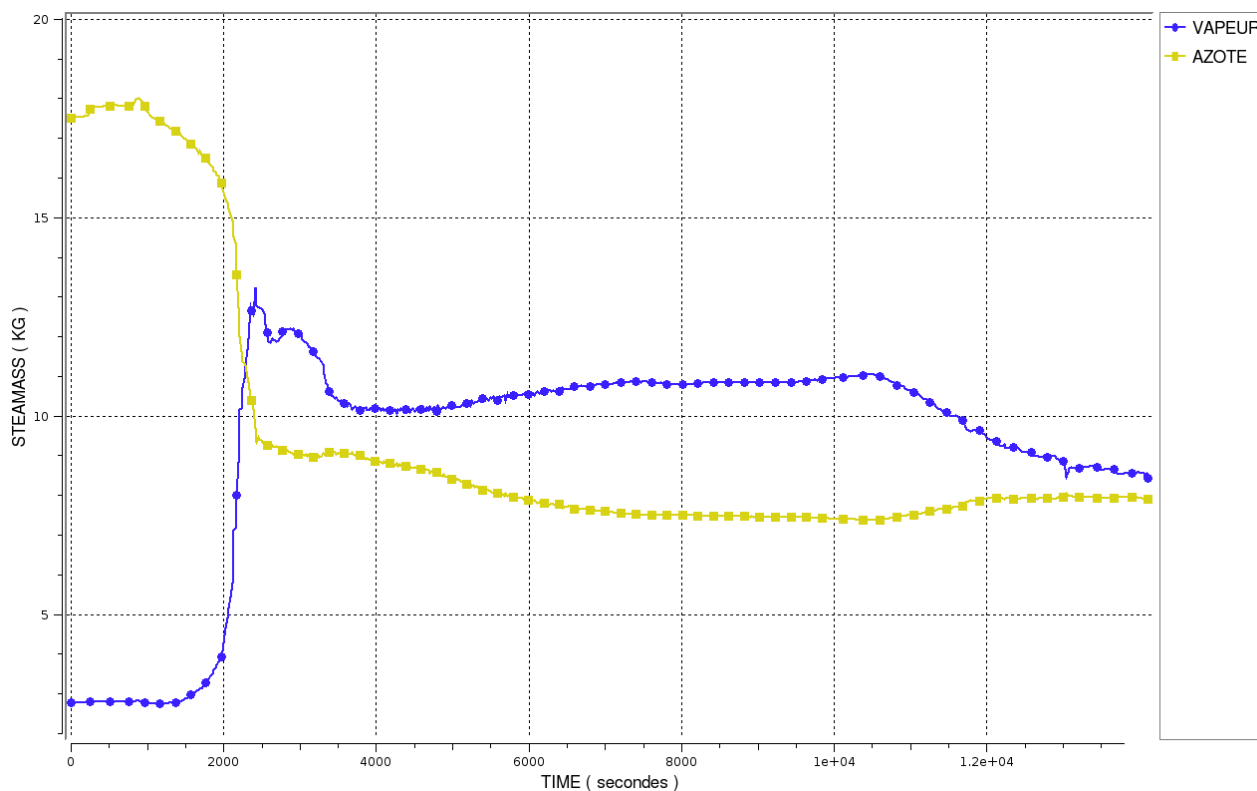


figure 14 Masses de vapeur et d'azote stockées dans chaque générateur de vapeur

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

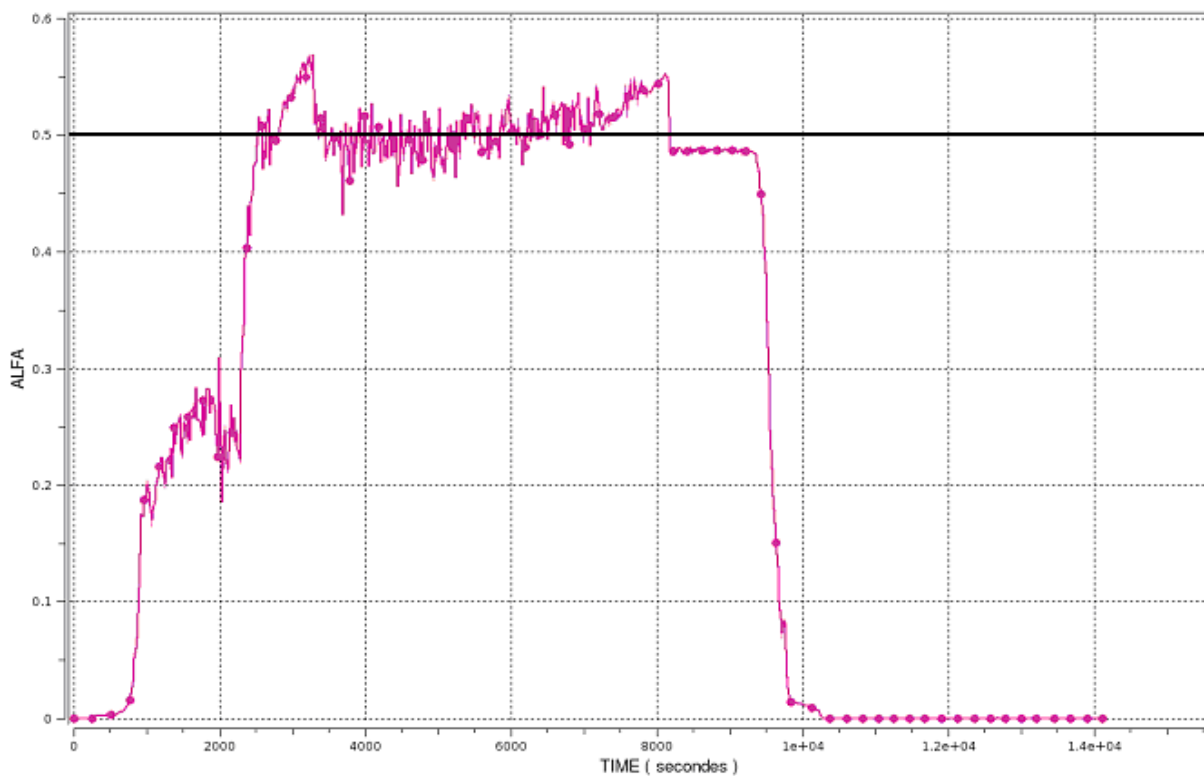


figure 15 Taux de vide dans le plénum supérieur. On remarque l'atteinte d'une valeur d'équilibre autour de 0,5

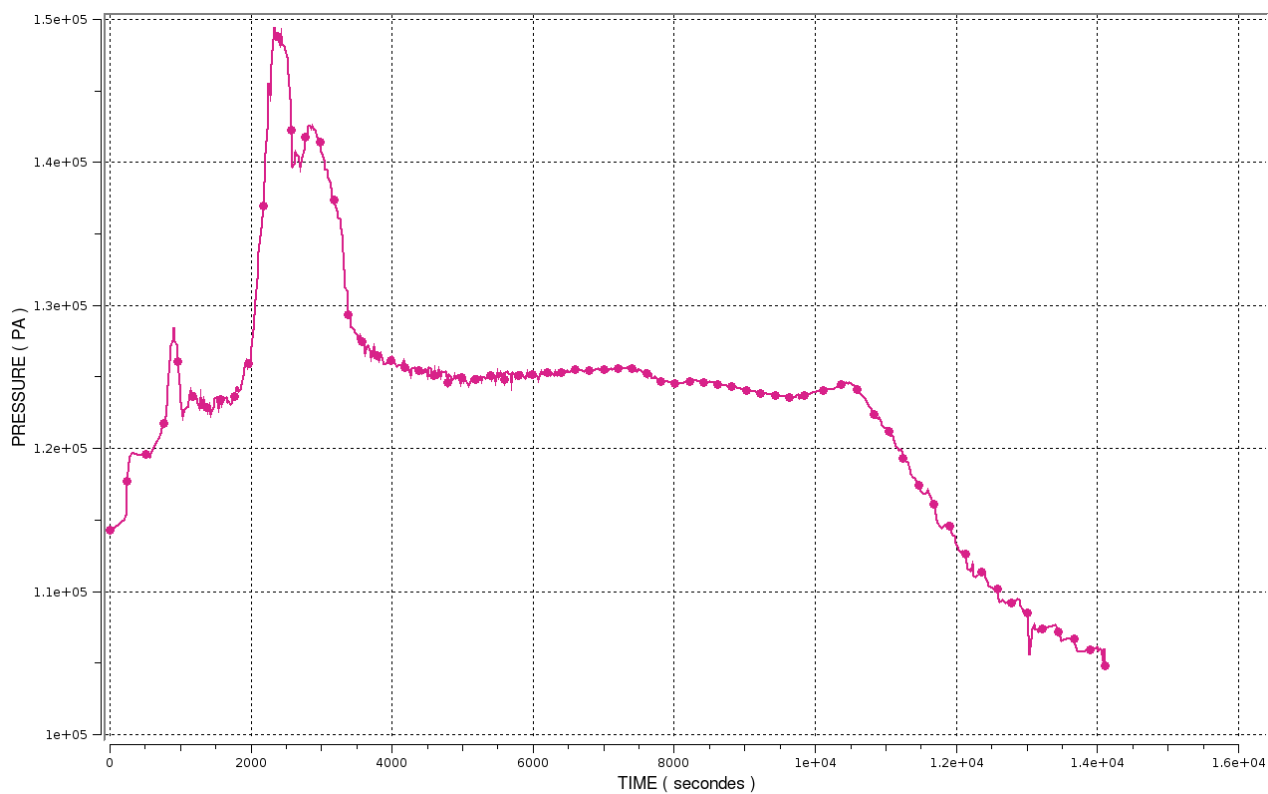


figure 16 Pression du plénum supérieur

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

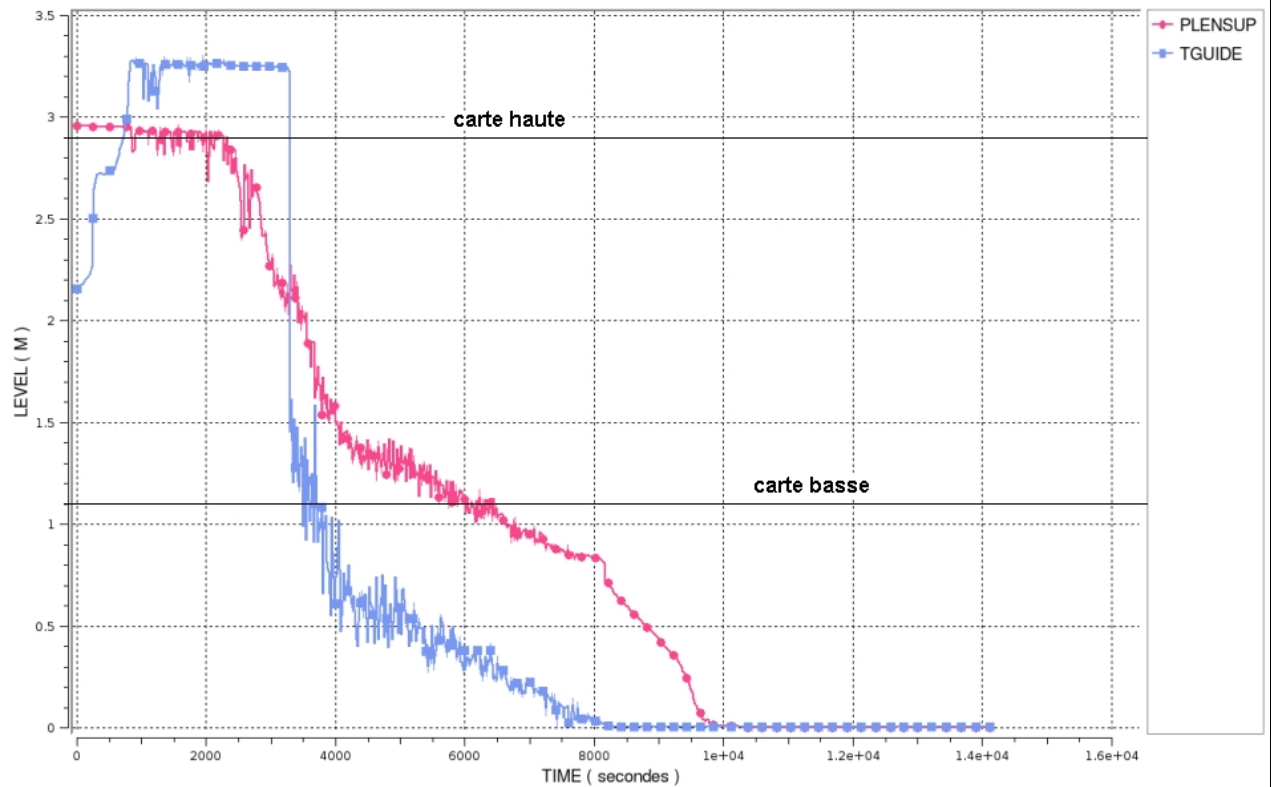


figure 17 Niveaux dans les tubes-guide et dans le plénum supérieur

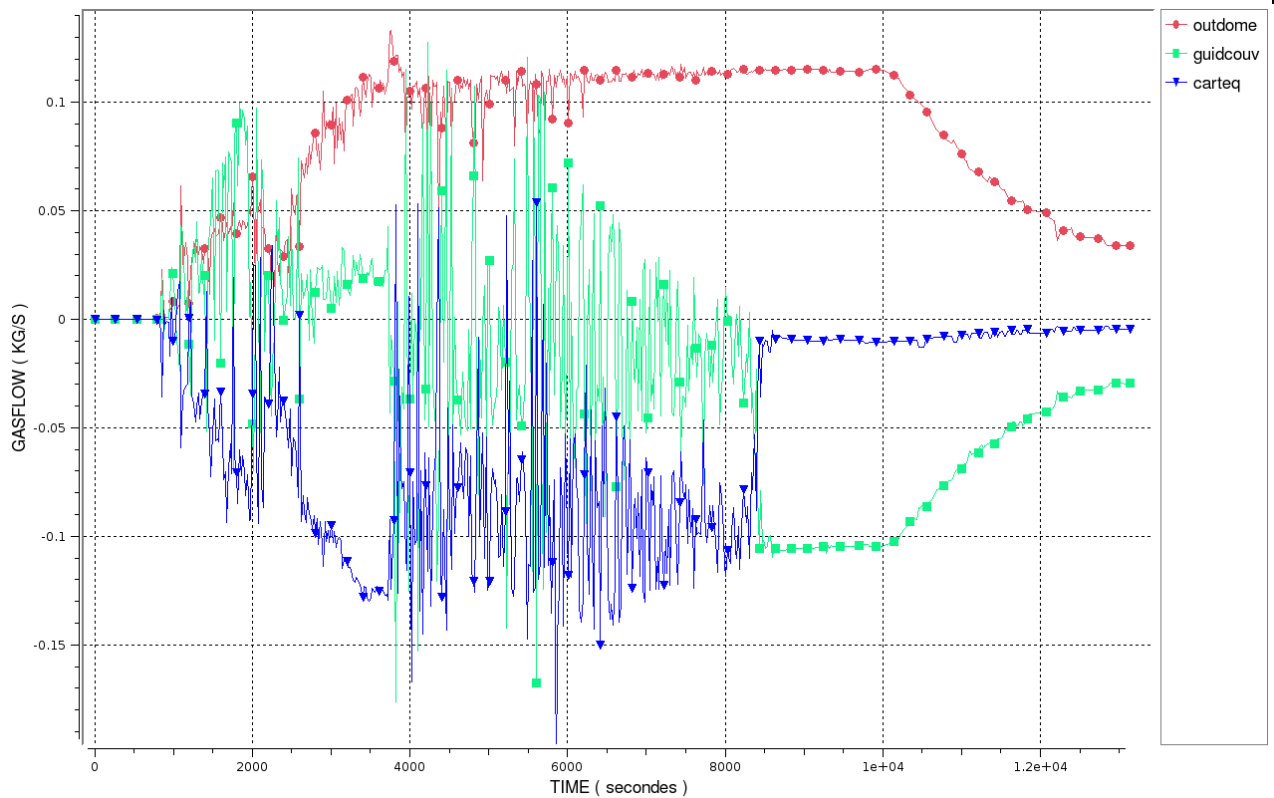


figure 18 Débit de la phase gazeuse dans les tubes-guide

Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

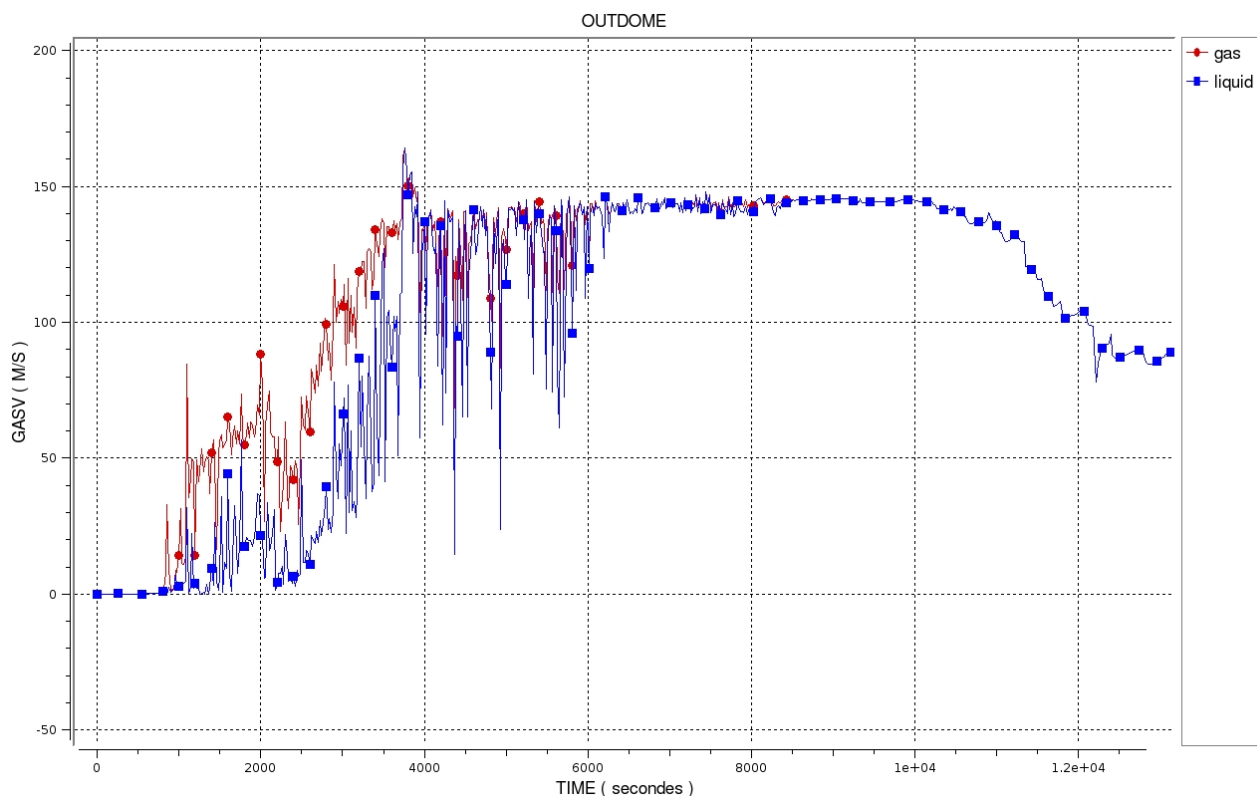


figure 19 Vitesses à la jonction OUTDOME

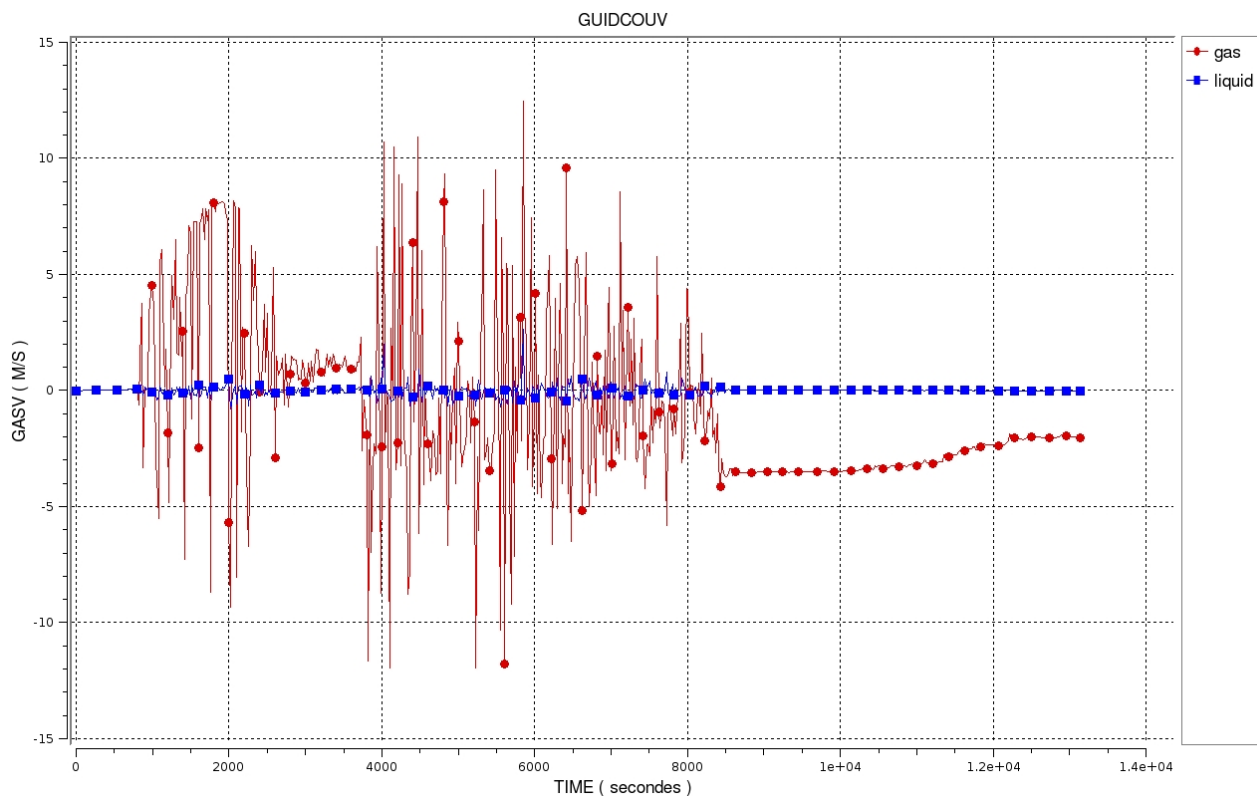


figure 20 Vitesses à la jonction GUIDCOUV

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

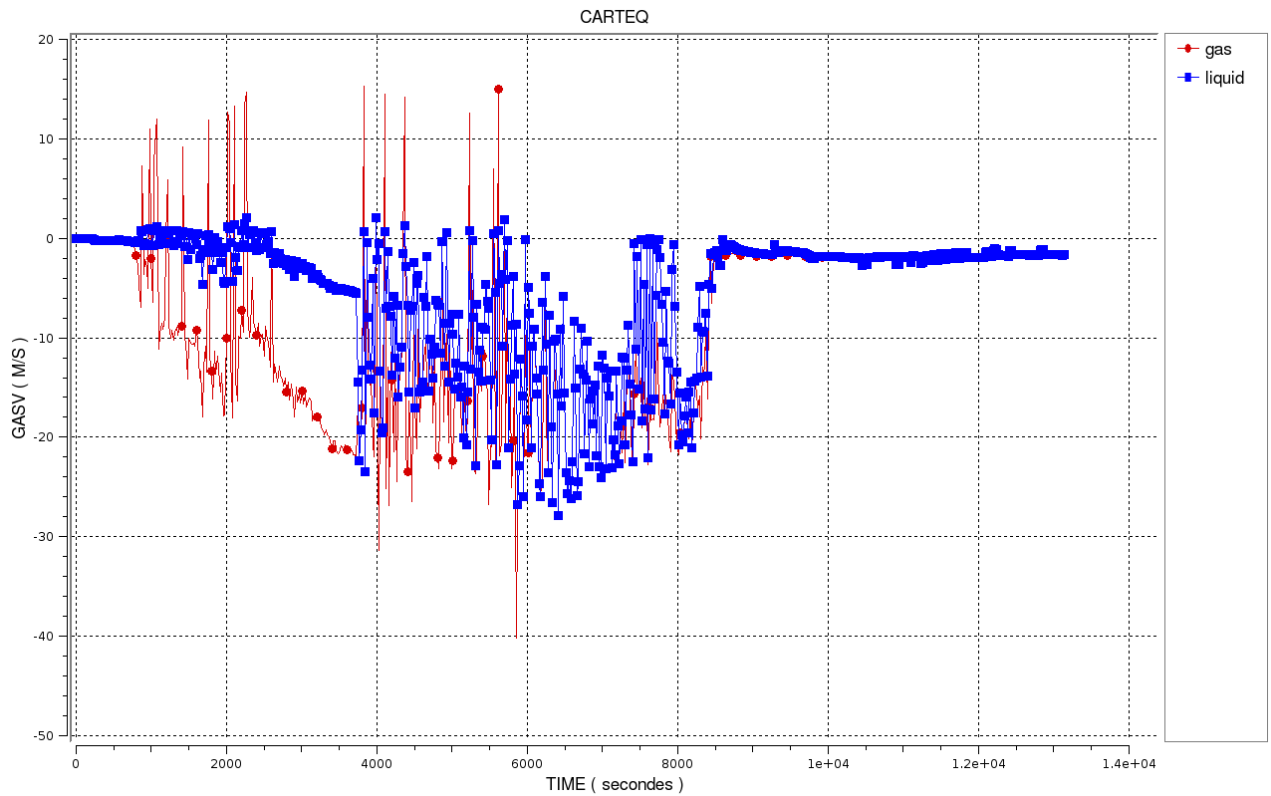


figure 21 Vitesses à la jonction CARTEQ

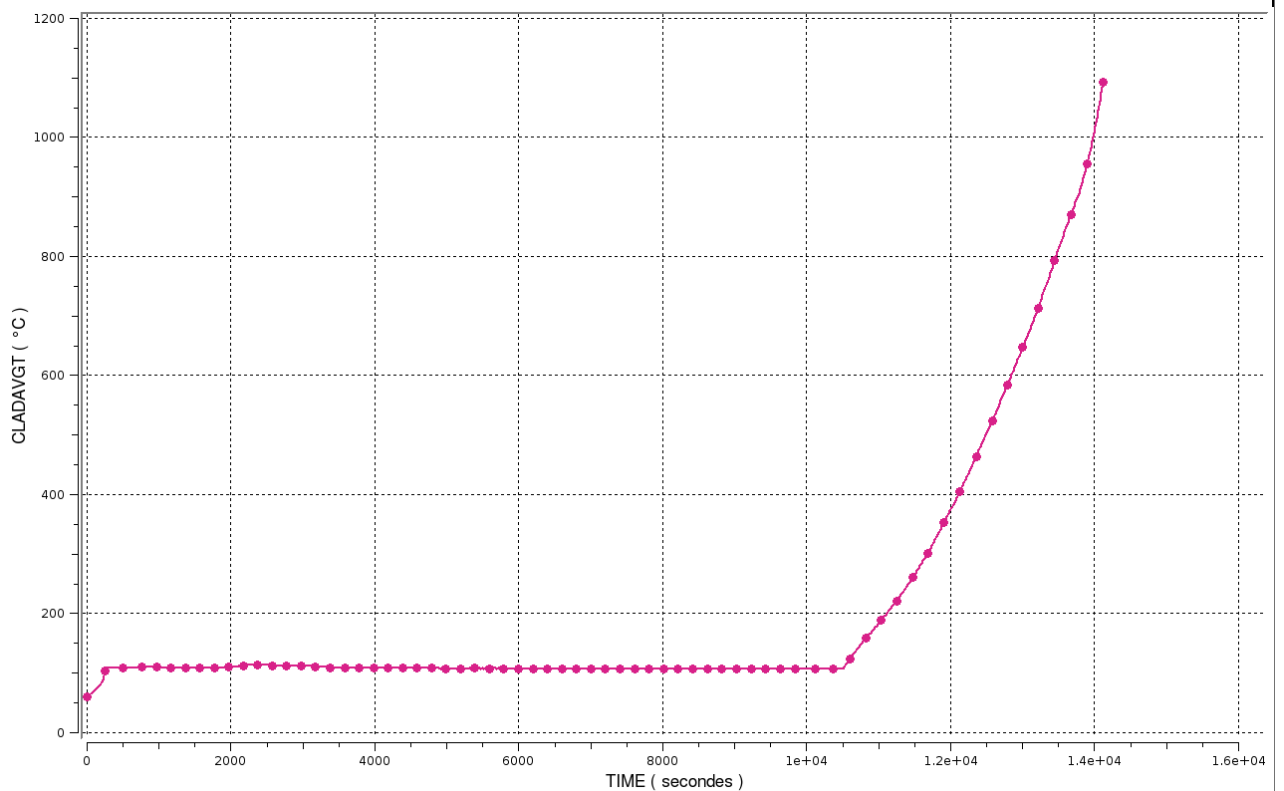


figure 22 Température au point chaud de la gaine du crayon moyen

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve****8.7 Sensibilité à la modélisation PIQBREK versus BCONDIT (palier 900)**

Les deux situations sont presque équivalentes. On retient la modélisation PIQBREK qui présente un délai avant dénoyage légèrement inférieur.

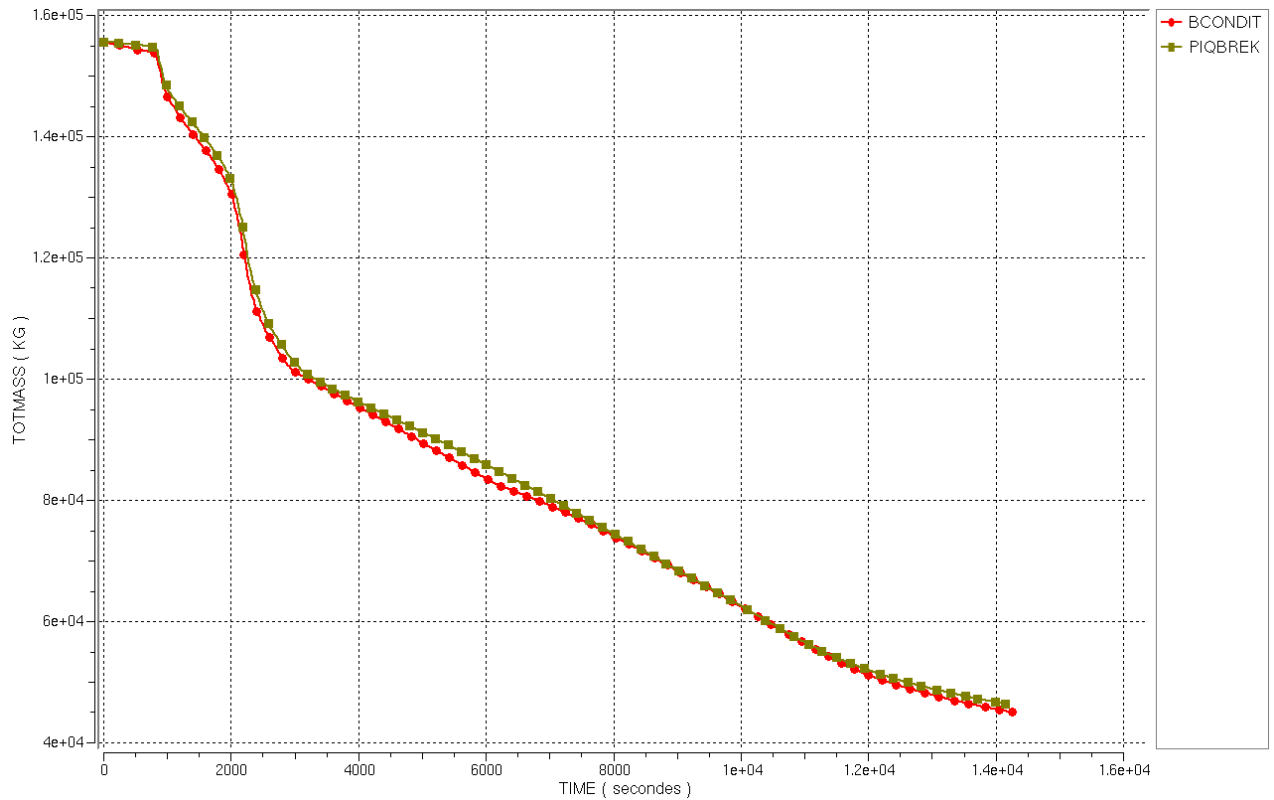


figure 23 Masse stockée dans le circuit primaire au cours du transitoire.

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

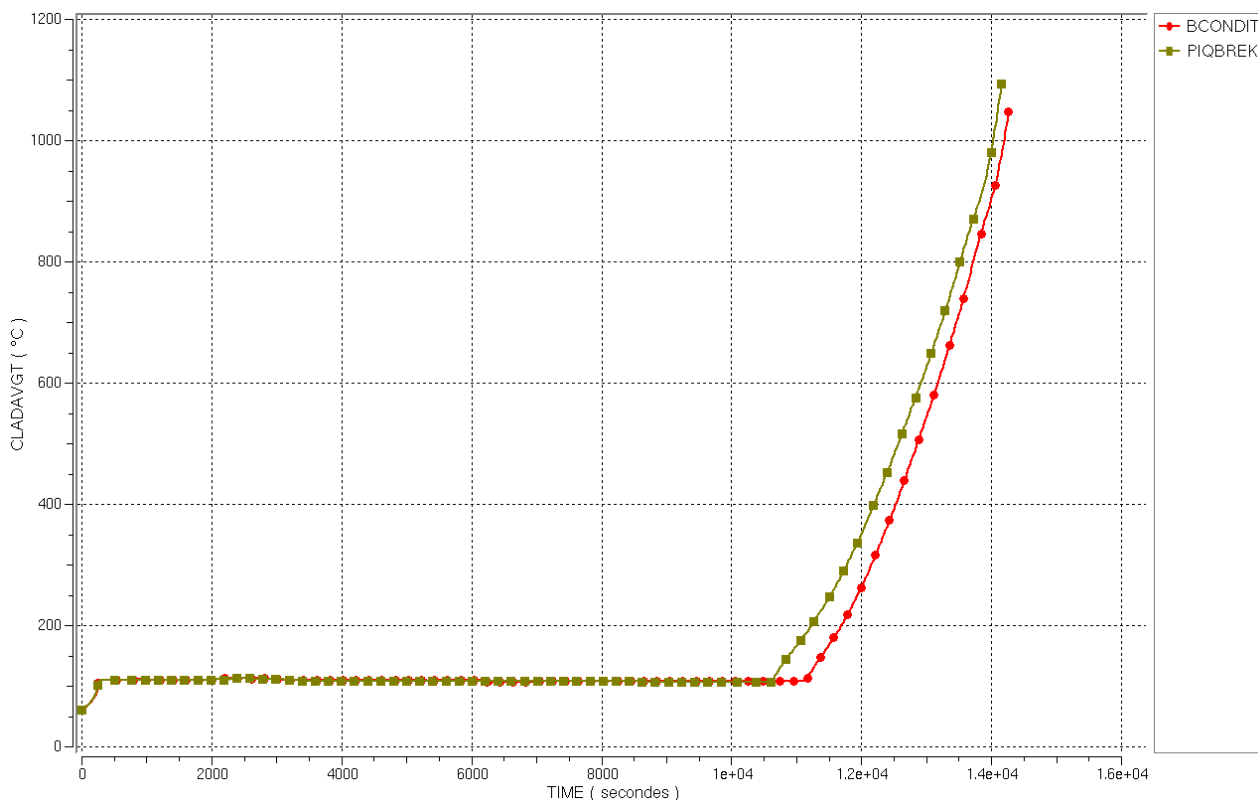


figure 24 Température en haut du cœur de la gaine du crayon moyen.  
On peut voir que les deux modélisations sont presque équivalentes. Pour cela on retient le modèle PIQBREK, légèrement plus pénalisant.

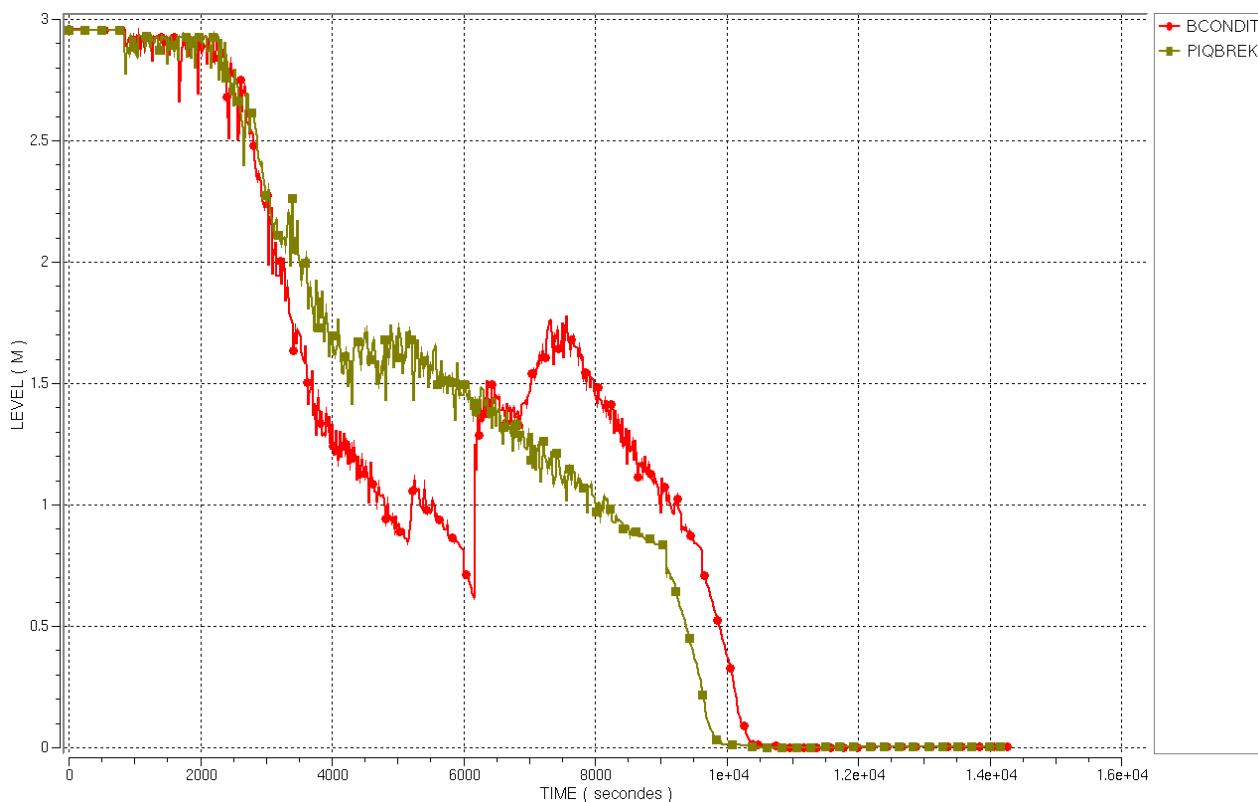


figure 25 Niveau du plénum supérieur. La remontée du niveau (courbe en rouge) correspond au dénoyage de l'entrée des tubes-guide.

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

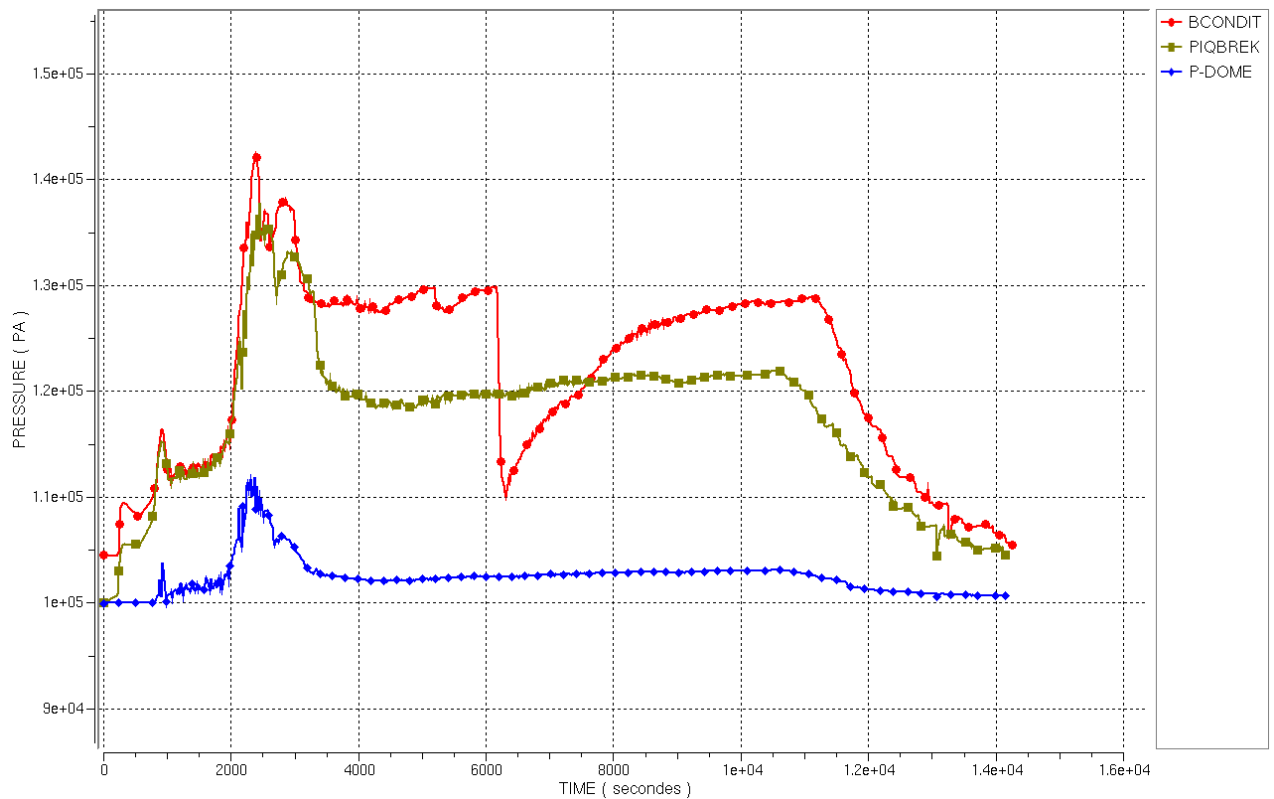


figure 26 On observe la pressurisation du dôme avec la modélisation PIQBREK (couvercle en place ou légèrement soulevé). Pour le cas BCONDIT (couvercle soulevé) la pression chute brutalement (courbe en rouge), à cause du dénoyage de l'entrée des tubes-guide. Cette chute brutale de la pression est accompagnée par un transfert d'eau de l'élément VOLDDOWN à PLENSUP.

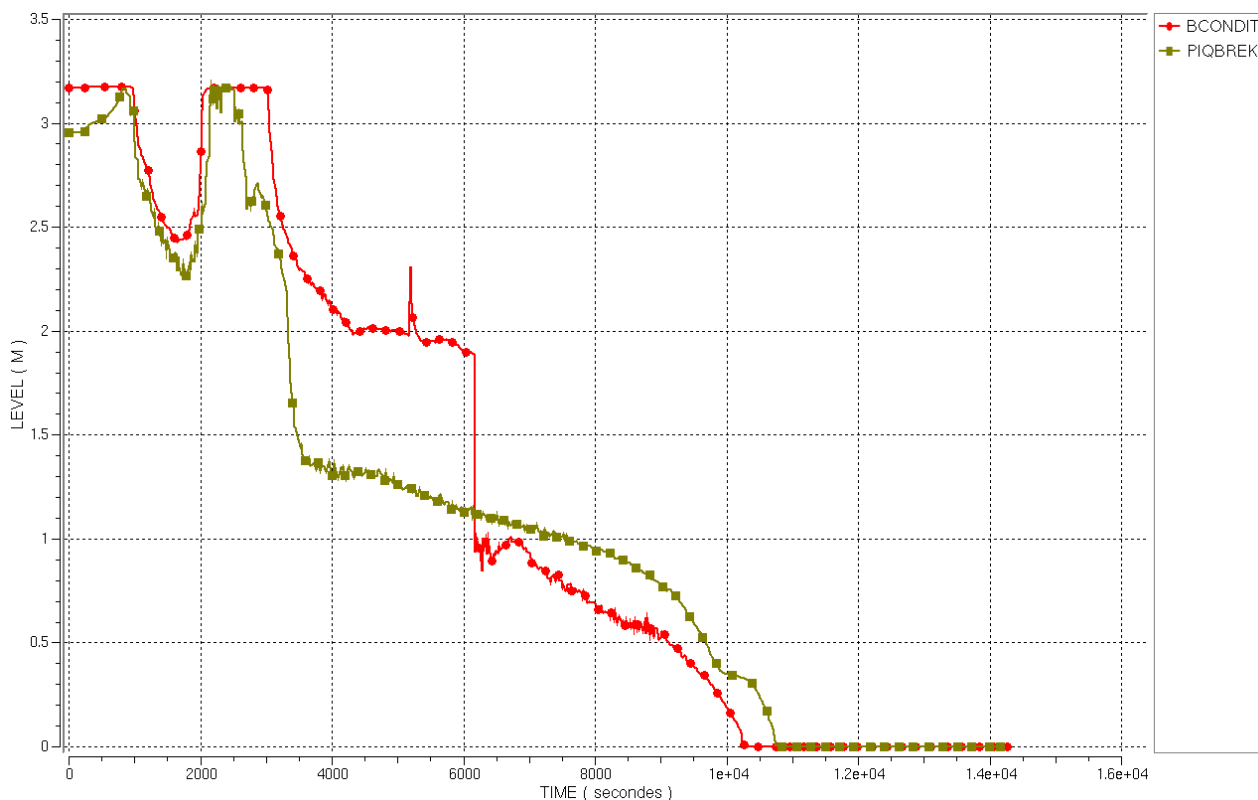
**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

figure 27 Le niveau du VOLDDOWN (espace annulaire à l'entrée du downcomer) descend plus rapidement avec le modèle PIQBREK, à cause de la pressurisation.

### 8.8 Sensibilité à la présence des trous des cartes de guidage (palier 900)

En annexe 8.3 on a pu voir que la géométrie des tubes présente sept trous correspondants aux 7 cartes de guidage. On compare dans la suite trois modèles différents, représentés dans la figure 6, la figure 7 et la figure 8.

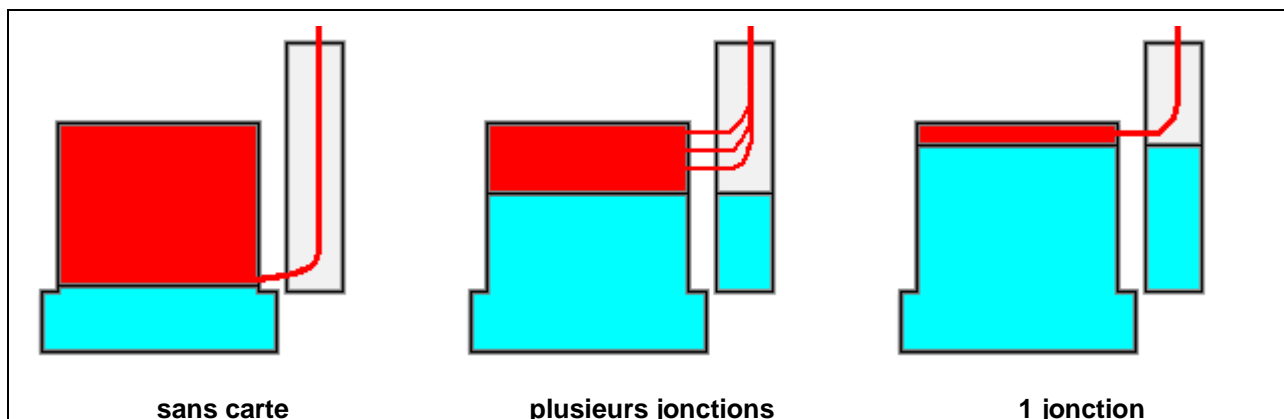
Les plus fortes pertes massiques dans la modélisation étanche s'expliquent grâce au niveau du plénum supérieur (voir figure 30). Au début du transitoire, la vapeur produite dans le cœur s'accumule en haut du plénum supérieur. Tant que la vapeur n'a pas une section de passage suffisante vers les tubes-guide, elle pousse l'eau du plénum dans les tubes.

Dans le cas étanche la phase d'expulsion se termine donc avec le découvrement de la jonction GUIDCOUV (voir figure 30).

Dans la modélisation avec une carte seule, la jonction CARTEQ a une section de passage suffisante pour faire sortir tout le débit de vapeur. La phase d'expulsion se termine donc avec le découvrement de cette jonction.

Le cas retenu (voir figure 8) se situe au milieu en terme de délai opérateur. Dans ce cas une jonction (dont la section est un septième par rapport au modèle avec une seule fuite) n'est pas suffisante pour évacuer tout le débit vapeur, l'entraînement continue jusqu'au découvrement des 7 jonctions.

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve



Le taux de vide à l'équilibre dans le plénum supérieur (à la fin de la phase d'expulsion) ne change pas pour les trois modèles, comme on peut le voir dans la figure 31.

Pour que ce paramètre soit suffisamment pénalisé, on retient la modélisation avec 7 cartes (figure 8), avec une section des jonctions plus faible que la section réelle.

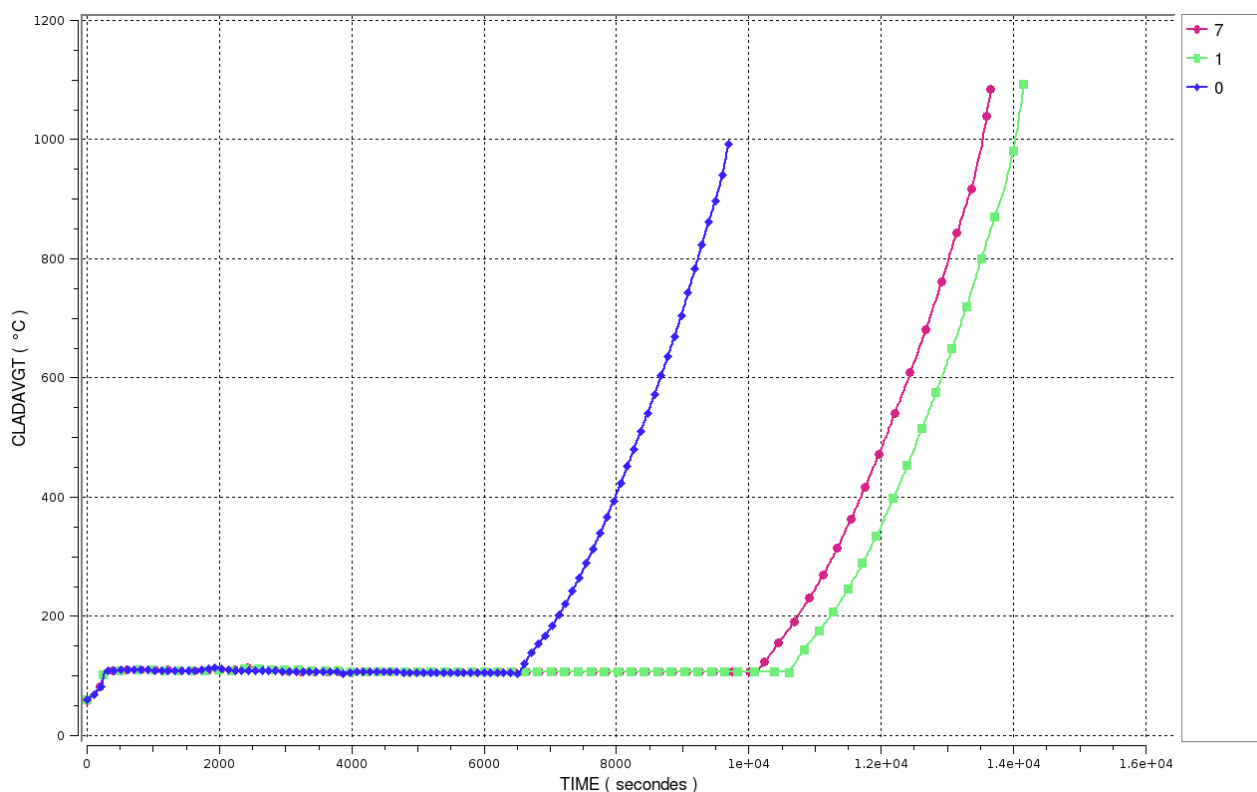


figure 28 Température maximale de la gaine du crayon moyen, comparaison entre 0, 1 et 7 jonctions

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

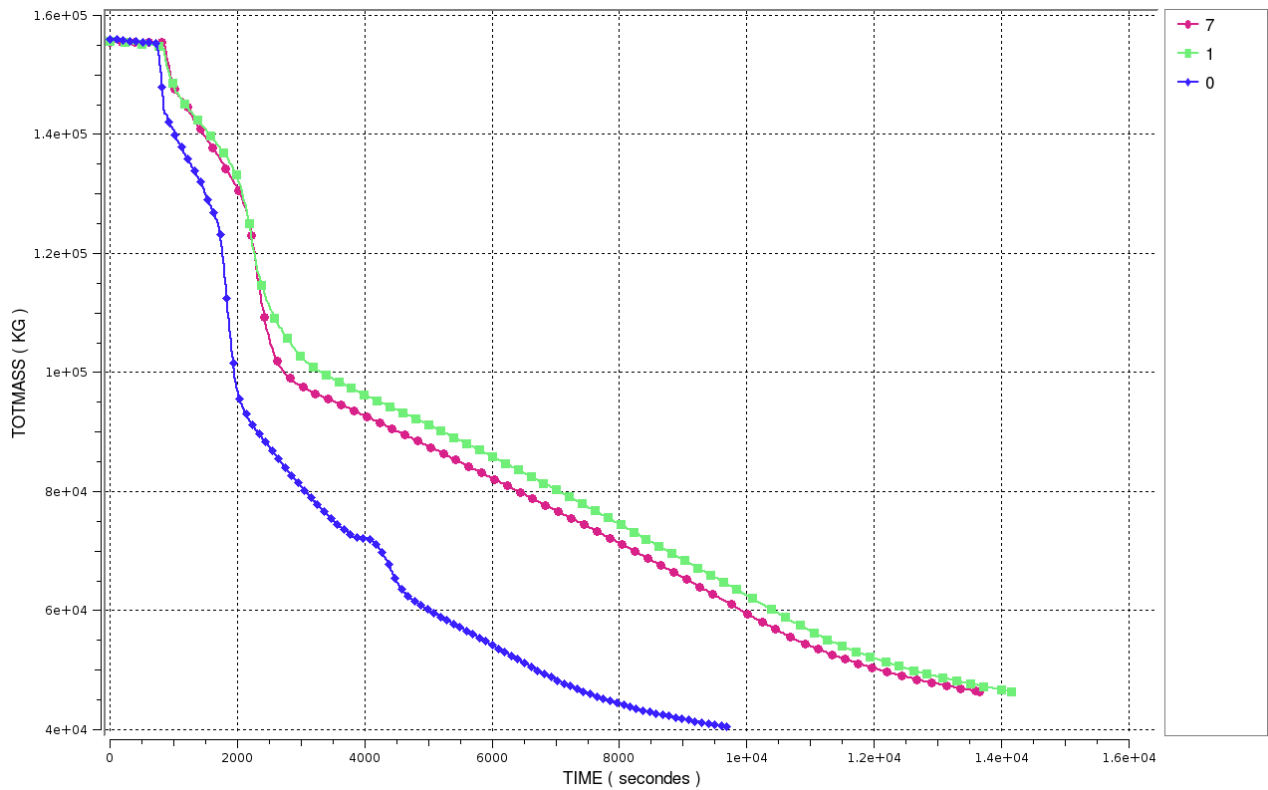


figure 29 Masse primaire

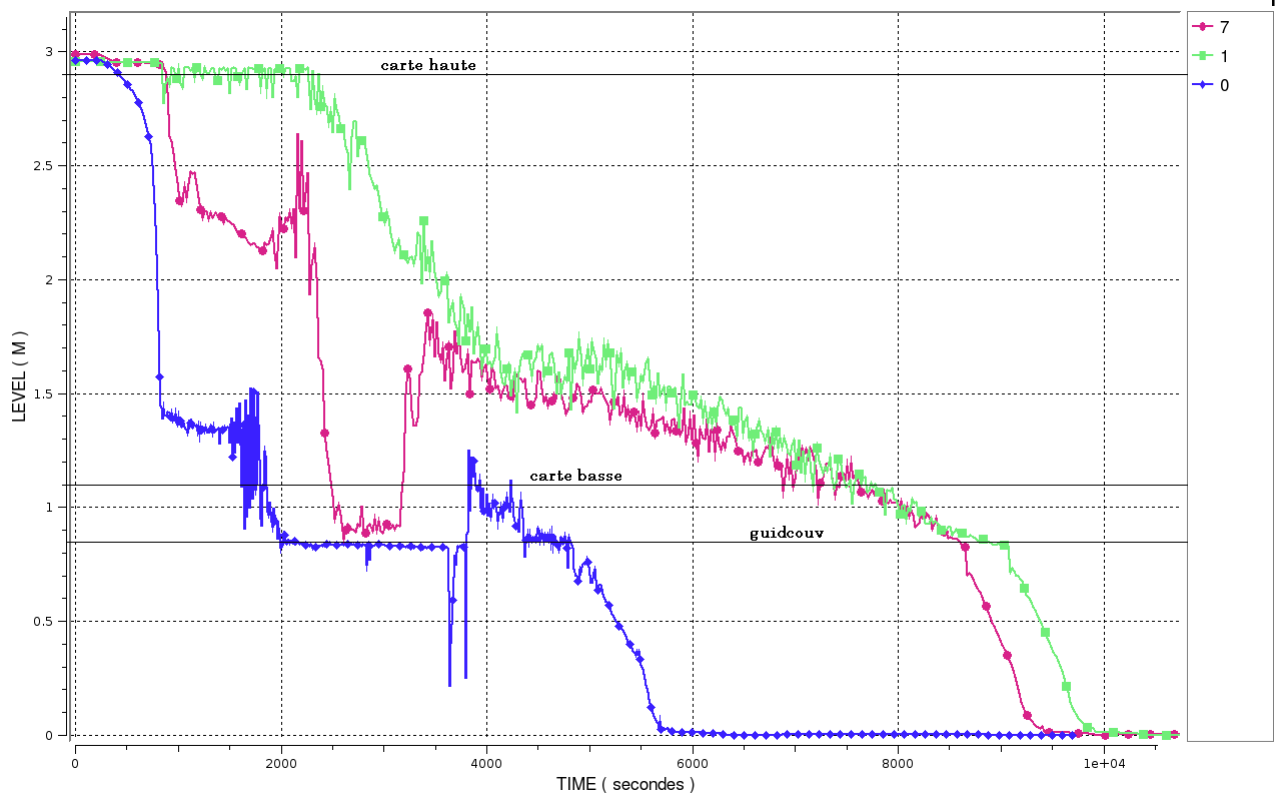


figure 30 : Niveau dans le plénum supérieur

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

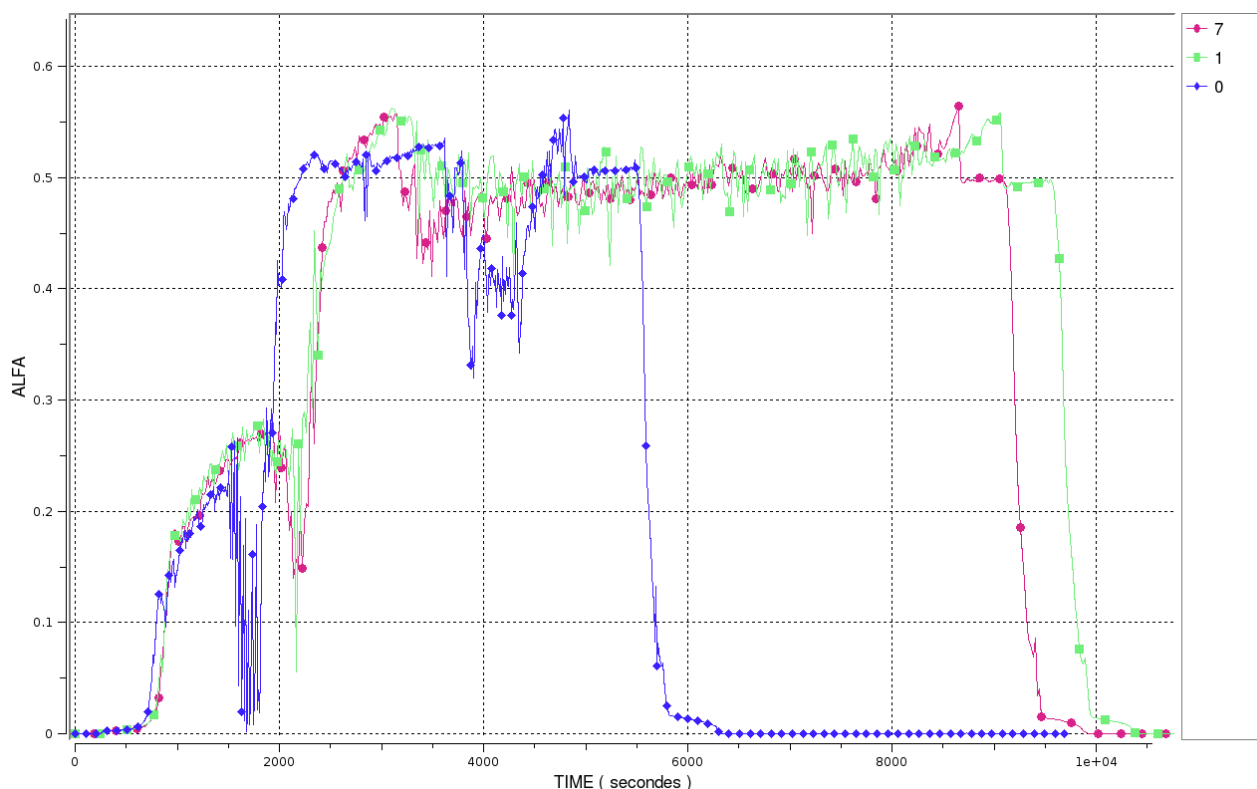


figure 31 Taux de vide dans le plénum supérieur

### 8.9 Sensibilité à la perte de pression aux cartes (palier 900)

Dans le cadre du calcul précédent, il semble utile d'estimer la sensibilité du délai au coefficient singulier de perte de pression aux jonctions qui représentent les cartes. La modélisation retenue pour cette étude est bien sûr celle en figure 8. Les coefficients singuliers de perte de charge envisageables sont :

- $\zeta = 2,85$ , correspondant à l'hypothèse d'orifice ou ouverture sur une paroi infinie [20] (valeur du jeu de données SCAR) ;
- $\zeta = 1,55$ , correspondant à l'hypothèse d'expansion brusque puis de contraction brusque.

Les évolutions de la masse primaire (figure 32) sont absolument équivalentes dans les deux cas, à cause de la problématique du calcul de la perte de charge à une jonction expliquée au paragraphe 5.7.

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

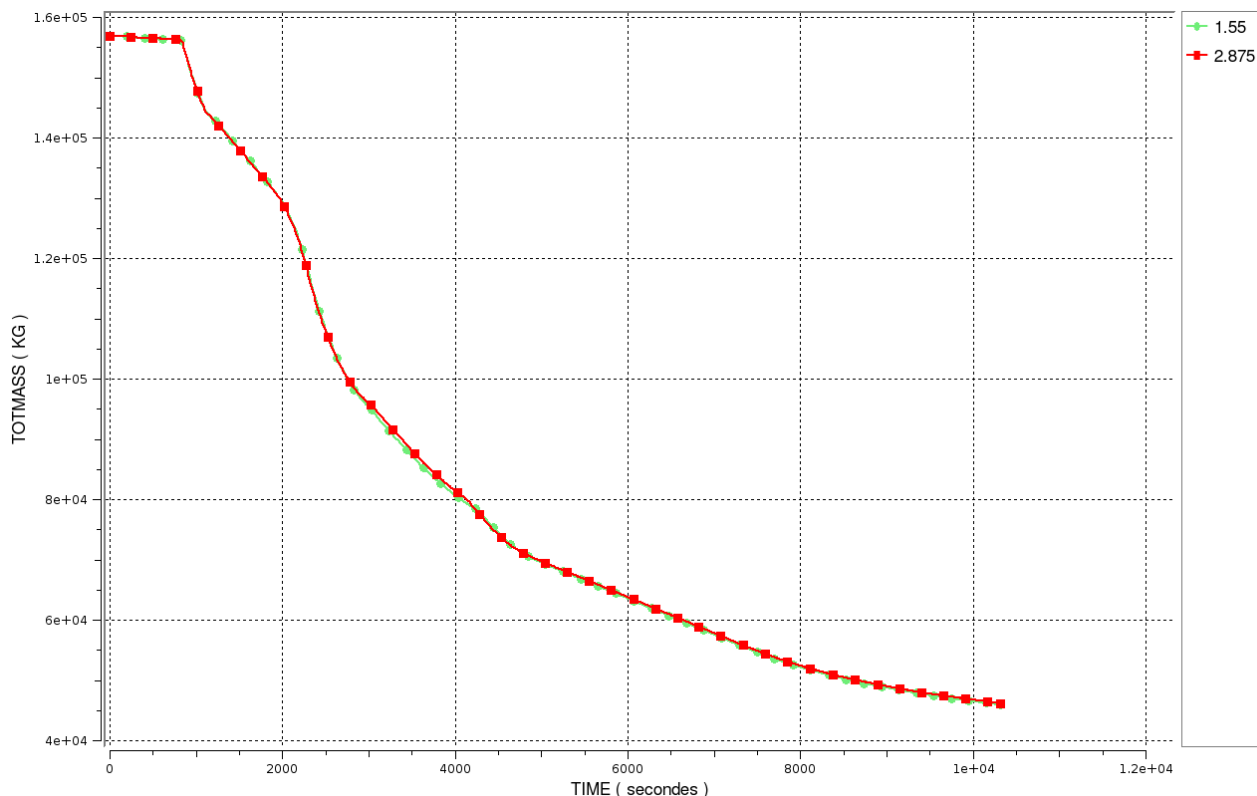


figure 32 Inventaire primaire, comparaison

Ensuite la routine qui calcule la longueur d'intégration a été modifiée (voir 5.7). En appliquant la perte de charge aux cartes réaliste, qui est plus faible que celle calculée par CATHARE, le délai opérateur est plus important (voir figure 35). Le délai avant dénoyage du cœur pour le transitoire avec la perte de charge réaliste est plus long de 700 secondes (10 700 secondes contre 10000 secondes).

En conclusion, la façon dont CATHARE calcule la perte de charge aux jonction des cartes-guide est pénalisante, vis-à-vis du délai avant dénoyage du cœur. On retient donc le calcul sans modification de la longueur d'intégration. La valeur de 10 700 seconde représente cependant un délai plus réaliste.

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

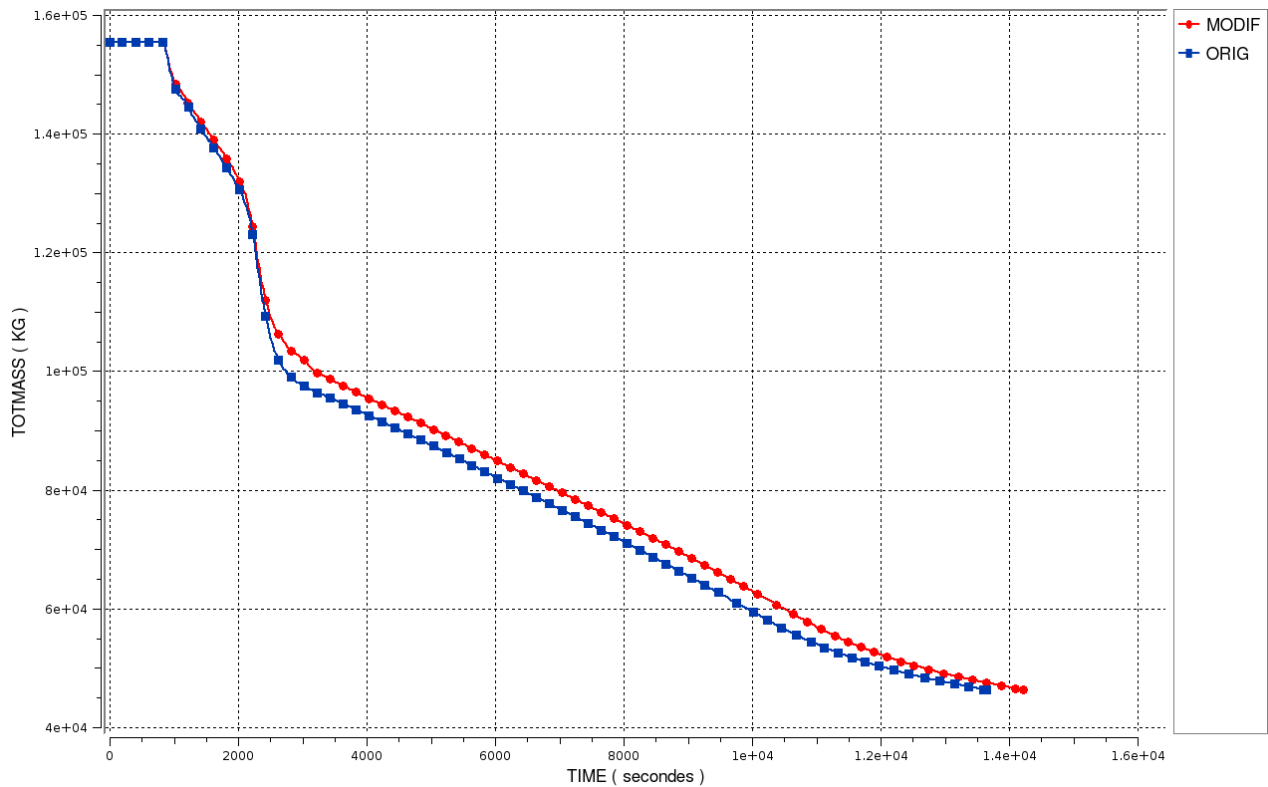


figure 33 Inventaire primaire, comparaison (MODIF : perte de charge réaliste)

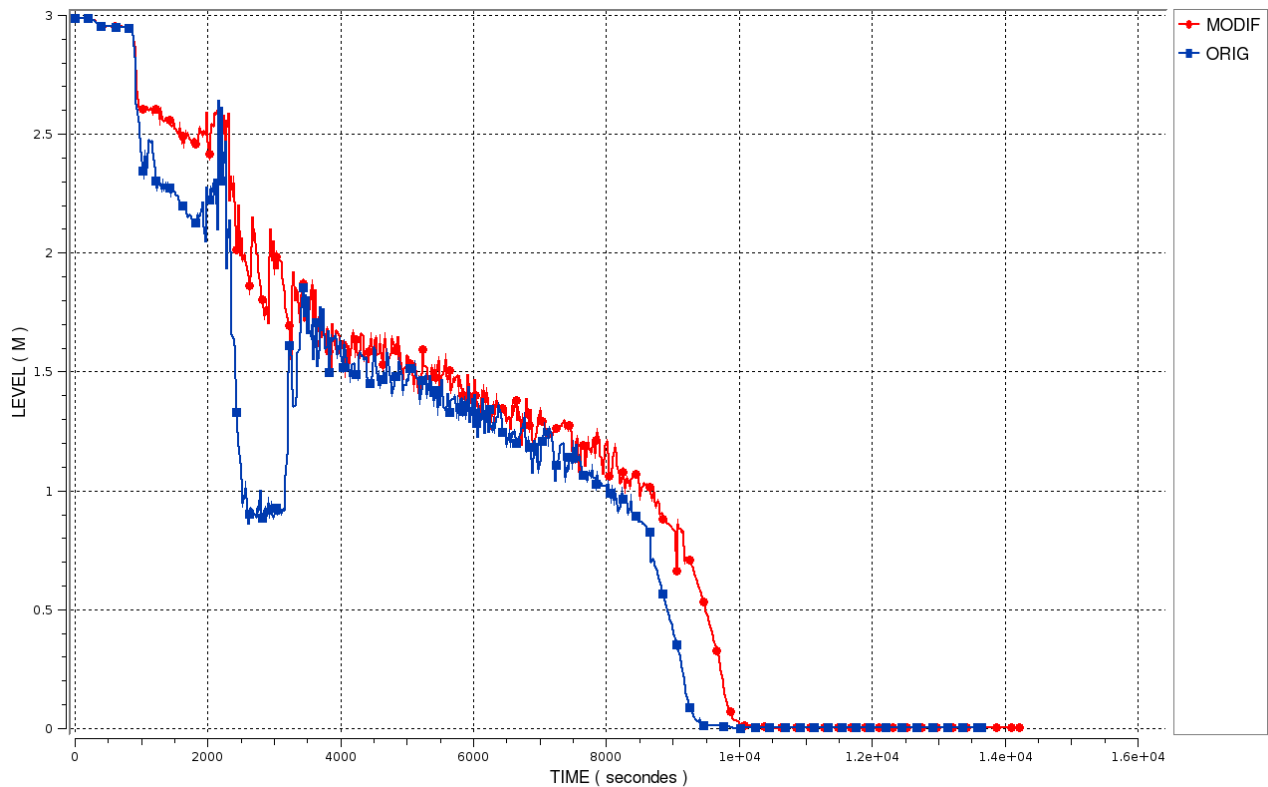


figure 34 Niveau gonflé dans le plénum supérieur, comparaison (MODIF : perte de charge réaliste)

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

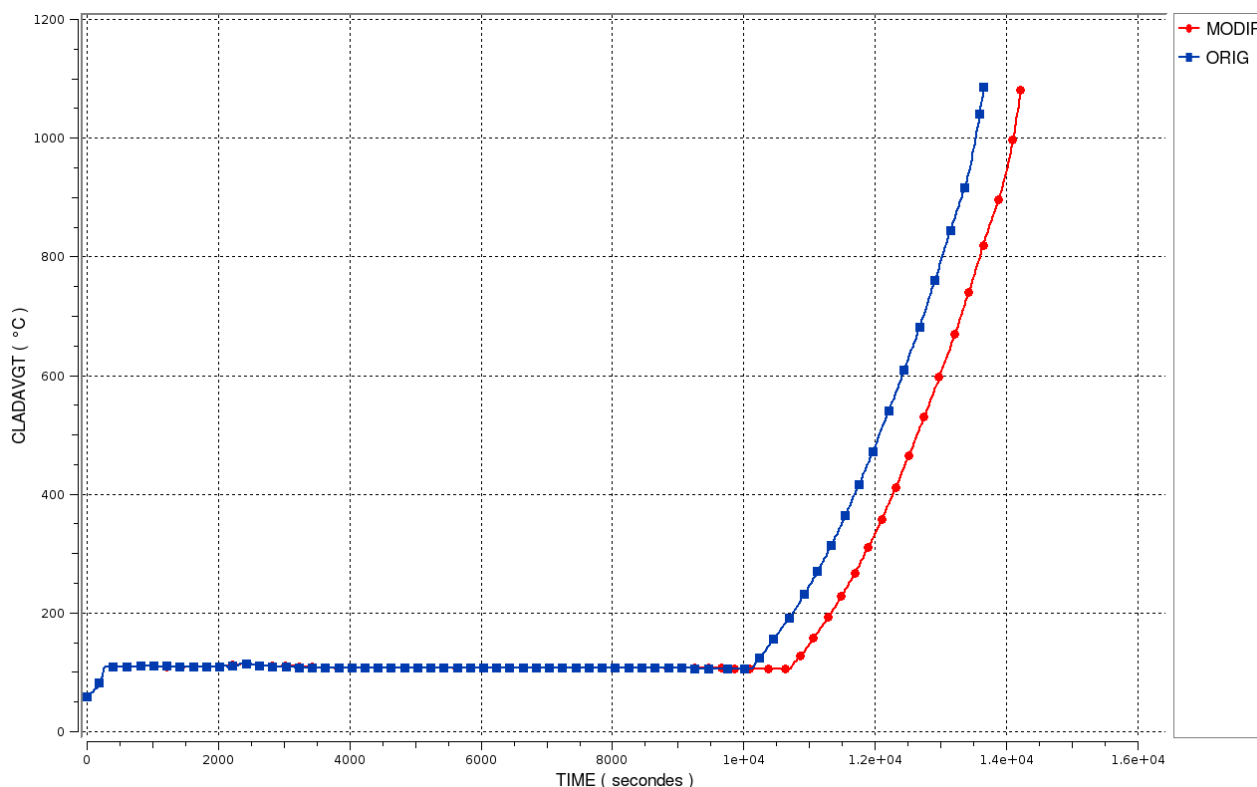


figure 35 Température maximale de la gaine du crayon moyen, comparaison (MODIF : perte de charge réaliste)

### 8.10 Sensibilité à la perte de pression à la sortie des tubes-guide (palier 900)

Les effets de la perte de pression à la sortie des tubes-guide sont, pour ce type de transitoire, assez complexes. En première approximation la perte de charge cause une petite pressurisation de la cuve, qui tasse légèrement le niveau dans le plénum supérieur et qui réduit, en conséquence, les pertes de la phase liquide. Une augmentation de la perte de pression augmente donc la durée du transitoire.

Cependant, l'augmentation n'est pas proportionnelle à la perte de charge : si la pressurisation du plénum devient trop élevée, on observe des expulsions massives importantes par les ajutages d'aspersion du downcomer vers le couvercle et donc à la brèche (figure 39 et figure 40). Les coefficients singuliers utilisés pour l'étude sont :

- $\zeta = 0$  pour le calcul de sensibilité ;
- $\zeta = 2,85$ , correspondant à l'hypothèse d'orifice ;
- $\zeta = 6$ , correspondant à l'hypothèse d'orifice avec le multiplicateur biphasique (hypothèse réaliste) ;
- $\zeta = 10$  pour le calcul de sensibilité.

On voit clairement qu'il y a un optimum de perte de charge, suffisant à réduire les pertes massiques à OUTDOME mais pas assez élevée pour faire remonter le niveau dans le downcomer. Les temps avant découverture sont résumés dans la courbe en figure 36.

Les choix  $\zeta = 0$  et  $\zeta = 10$  sont trop pénalisants et de plus ils ne sont pas justifiés physiquement. Entre le coefficient  $\zeta = 2,85$  et  $\zeta = 6$  on retient le premier, auquel un délai

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

avant découverture plus court est associé. Pour garantir une marge supplémentaire, vu que le délai disponible se réduit avec la perte de charge, on impose  $\zeta = 2,55$ .

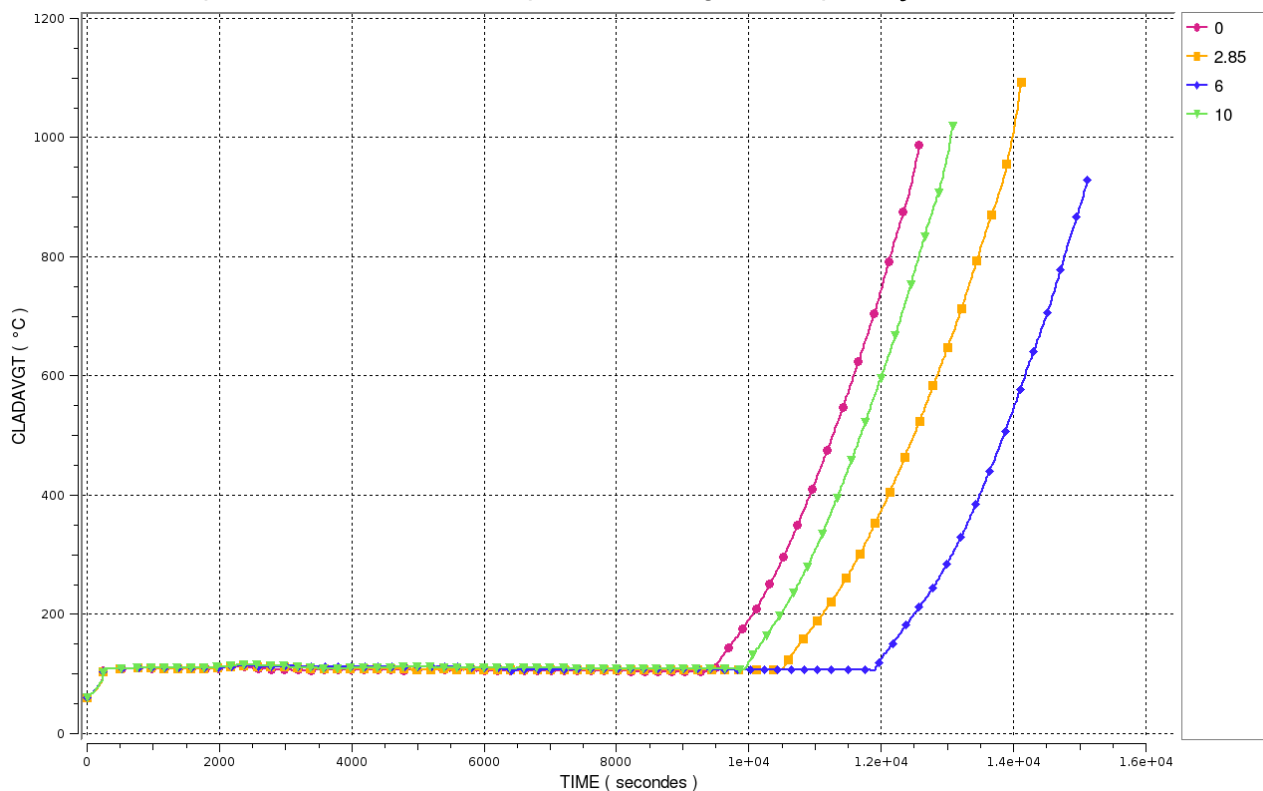


figure 36 Température maximale de la gaine du crayon moyen. Sensibilité à la perte de charge

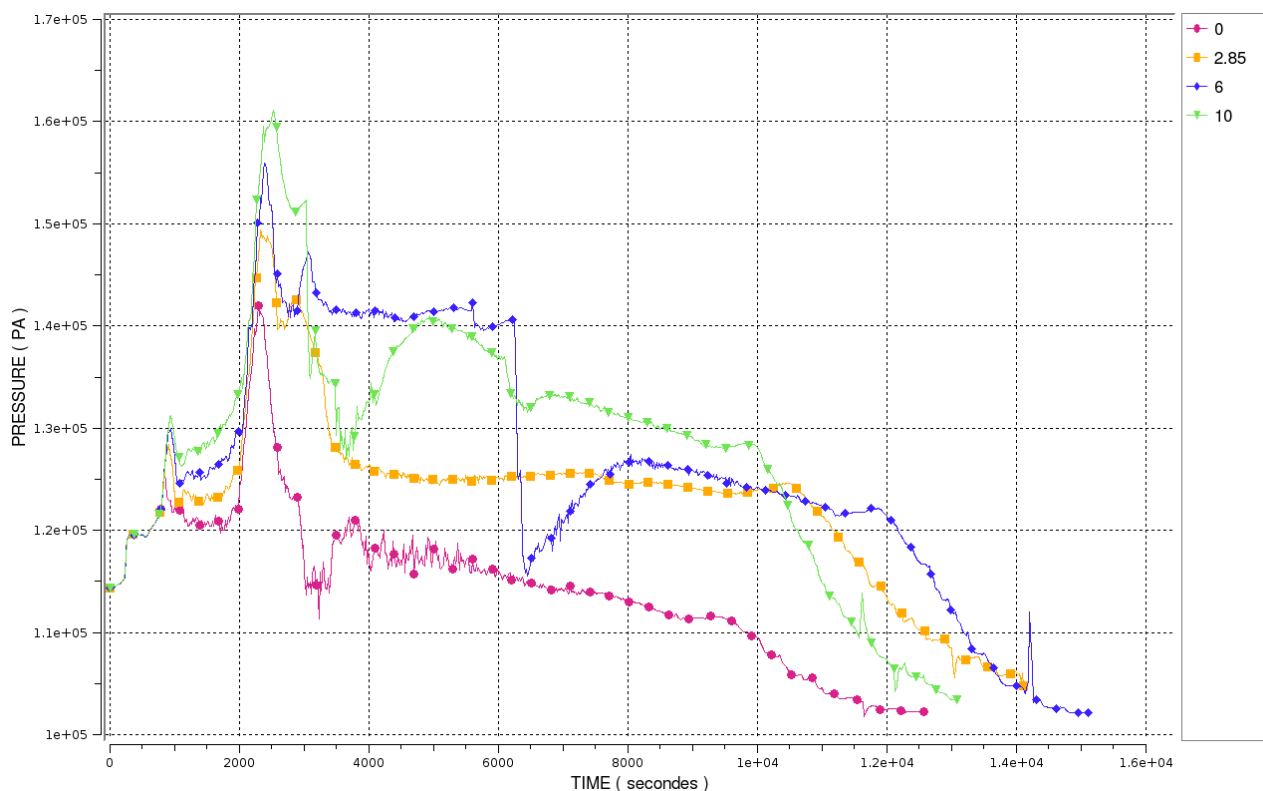


figure 37 Pression du plénum supérieur

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

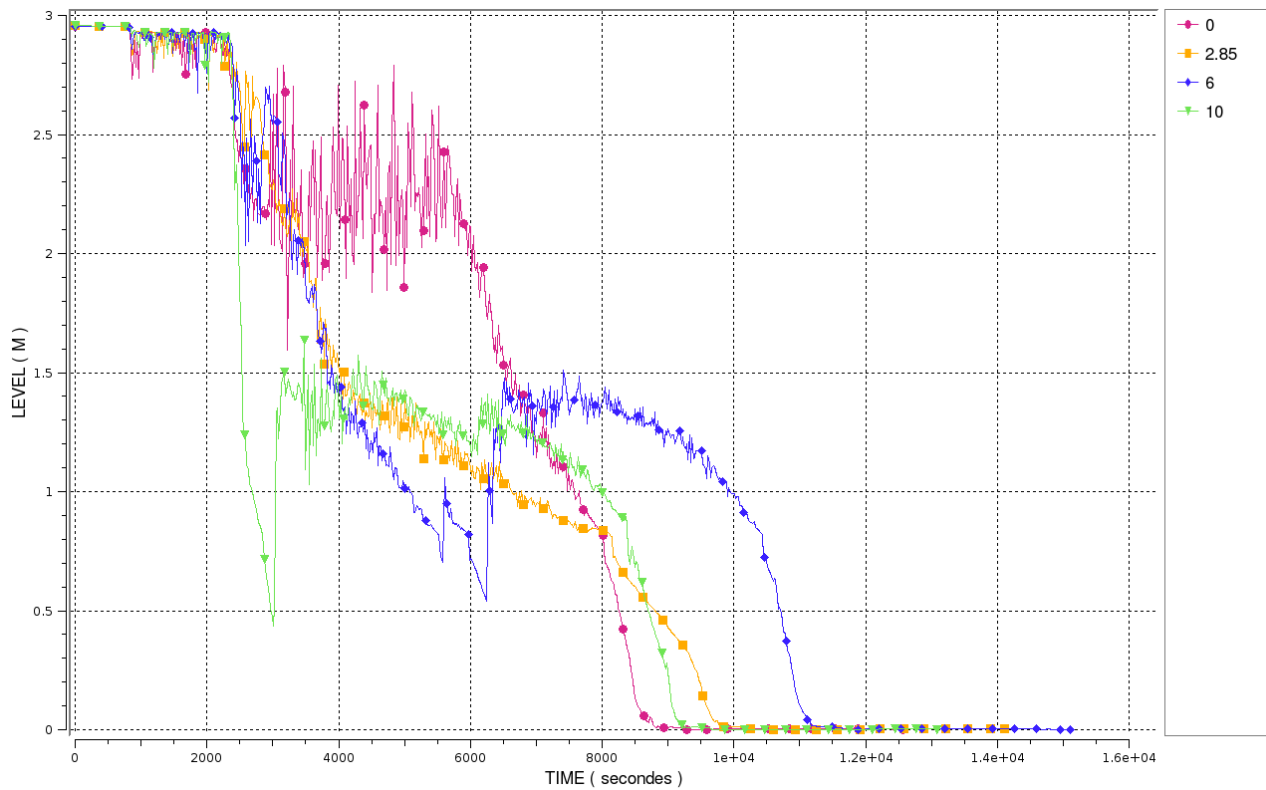
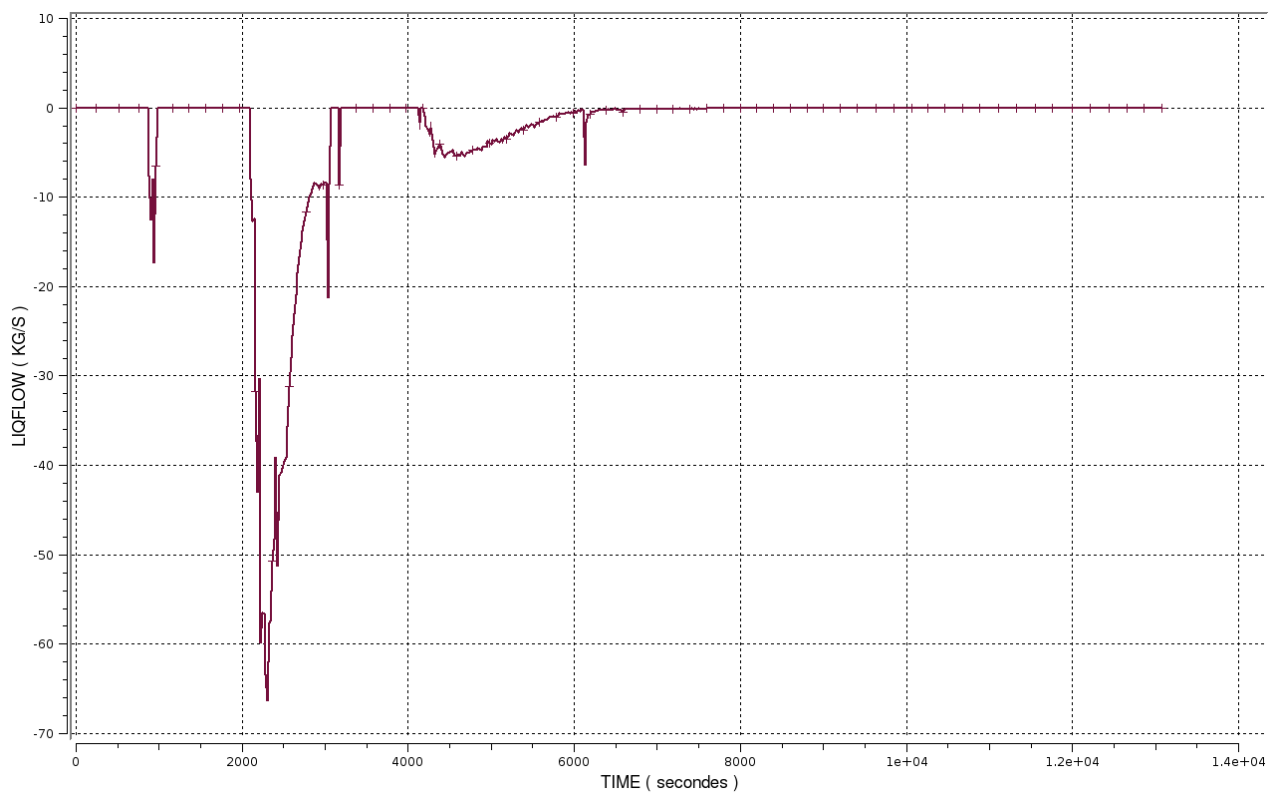
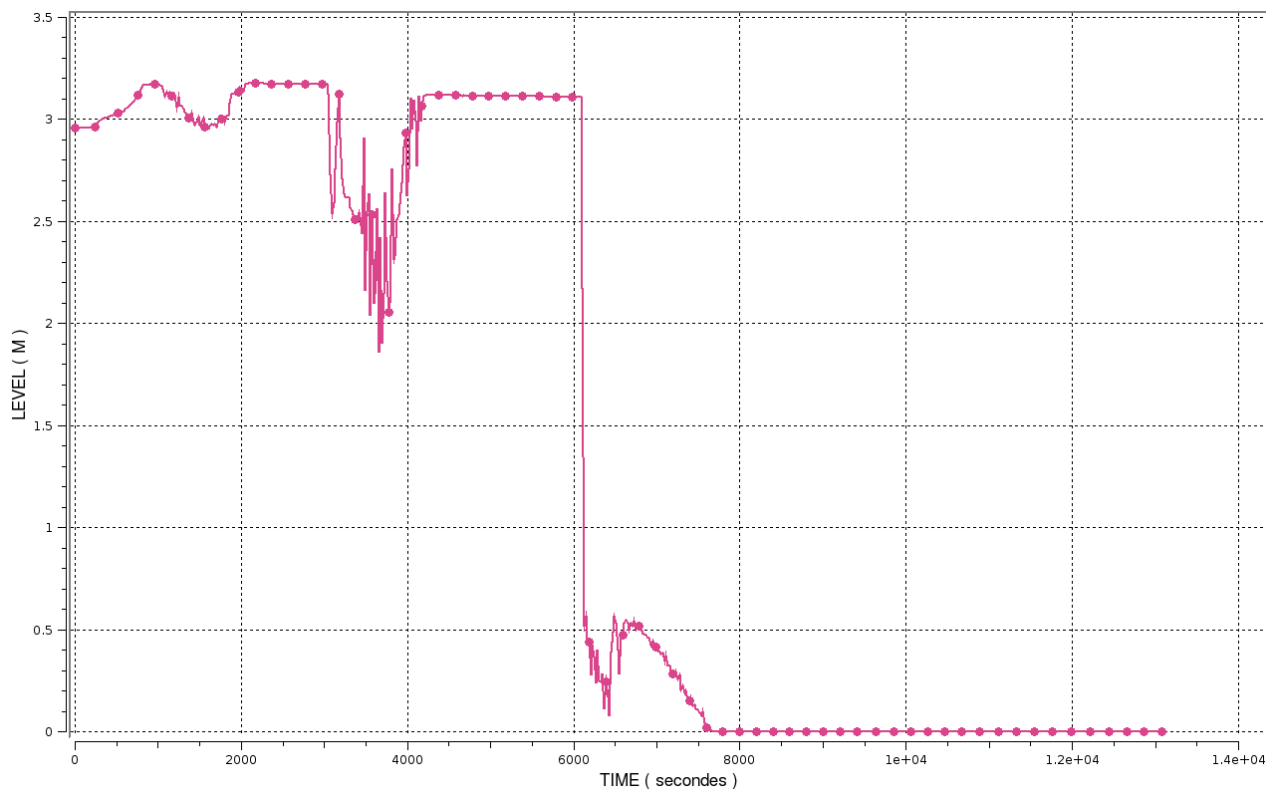


figure 38 Niveau du plénum supérieur

figure 39 Débit de liquide via les ajutages d'aspersion du downcomer, pour le cas  $\zeta = 10$

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

figure 40 Niveau de l'élément VOLDDOWN (entrée du downcomer), pour le cas  $\zeta = 10$ 

### 8.11 Modélisation axiale (réaliste – palier 900)

La modélisation en figure 9, qui est en absolue la plus réaliste, est celle avec le délai opérateur le plus long, de l'ordre de 12 000 secondes soit 3 heures et 20 minutes.

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

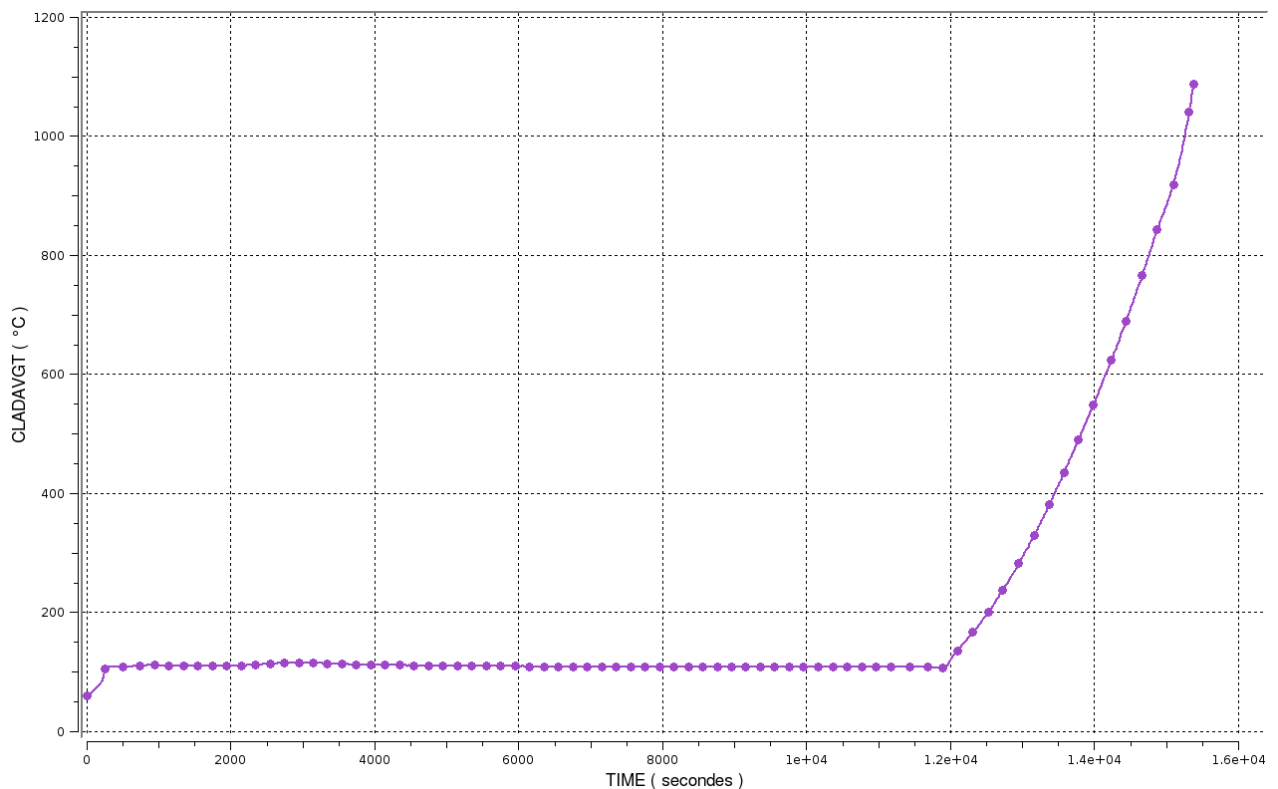


figure 41 température de la gaine du crayon moyen pour la modélisation axiale. Le délai avant découverture du cœur est 12 000 secondes

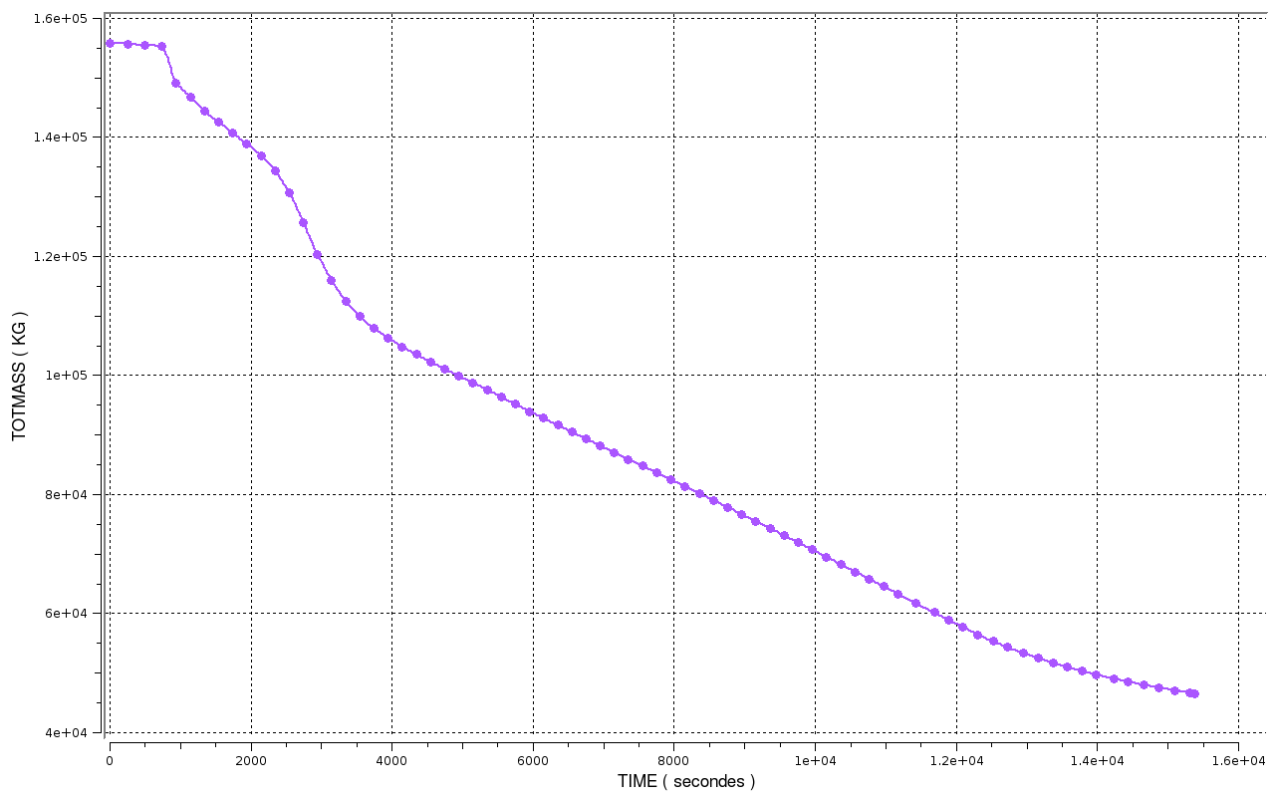


figure 42 évolution de l'inventaire primaire pour la modélisation en figure 19

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve****8.12 Recirculation de l'eau via les bypasses du cœur (palier 900)**

Lorsque le primaire est ouvert et que l'on a perdu le RRA, une convection naturelle, due à la différence de densité entre les parties chaudes du cœur et les parties froides, s'instaure (voir figure 43). Cette différence de densité est due au taux de vide dans le cœur, qui est plus important dans les points chauds. La recirculation permet d'homogénéiser la température dans le primaire, ce qui est favorable, car l'eau est expulsée à saturation, ce qui a permis de bénéficier de son potentiel de refroidissement.

L'élément représentant le cœur est modélisé par un AXIAL dans CATHARE. Les éléments de type AXIAL ne permettent pas les écoulements en contre-courant de la même phase : cette circulation n'est donc pas prise en compte dans les calculs.

La recirculation s'effectue alors via les bypasses du cœur, tels que :

- Le BPTG (by-pass tubes-guide),
- Le by-pass de l'enveloppe du cœur.

Lorsque les GMPP fonctionnent, une fraction du débit qui va du plénum inférieur vers le plénum supérieur s'écoule dans ces bypasses, ne contribuant pas au refroidissement du cœur.

Lorsque le primaire est ouvert et que l'on a perdu le RRA, les bypasses du cœur n'étant pas chauffés, la colonne d'eau dans ces éléments est plus lourde par rapport à la colonne d'eau dans le cœur. Un débit allant du plénum supérieur vers le fond de la cuve parcourt donc les bypasses. Globalement, durant tout le transitoire la masse qui transite par les bypasses est de l'ordre de 5 fois la masse primaire (voir figure 45).

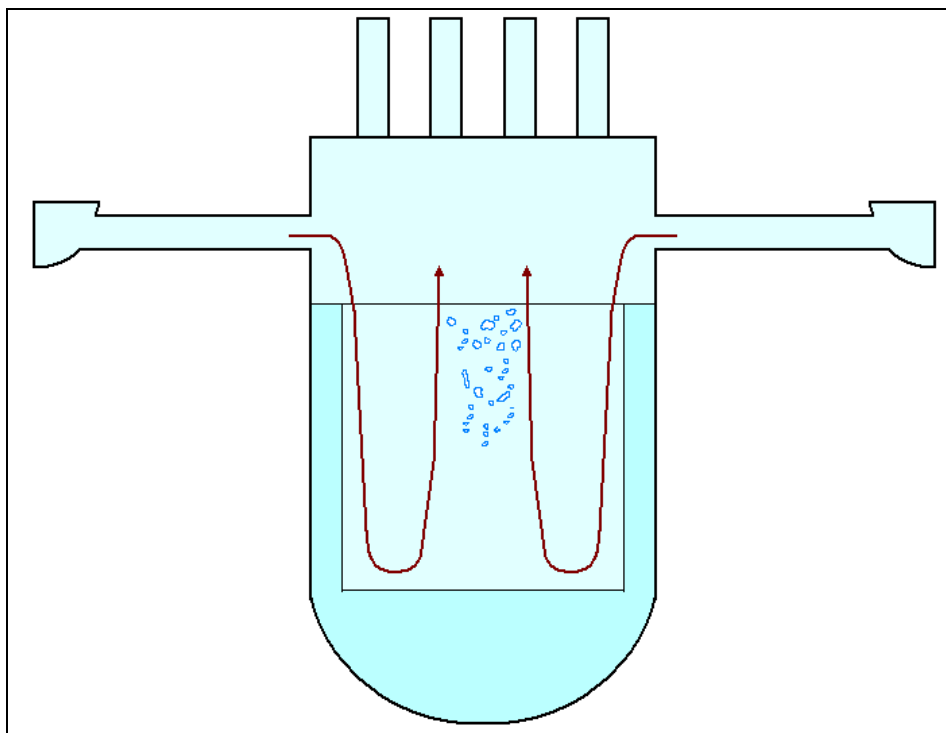


figure 43 Circulation de l'eau dans la cuve.

Pour identifier le rôle de la circulation naturelle vis-à-vis du délai opérateur, on effectue un calcul de sensibilité en imposant aux jonctions des éléments BYPASS et BPTG les coefficients singuliers de perte de pression suivants (multipliés par 1000) :

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

$\zeta = 6,31 \cdot 10^3$  pour BYPASS ;

$\zeta = 245 \cdot 10^3$  pour BPTG.

On observe que le délai avant découverture du cœur se réduit si les bypasses sont bouchés (figure 48) : la circulation naturelle est avantageuse vis-à-vis du délai opérateur, car elle homogénéise la température du primaire, ce qui évite l'expulsion d'eau non à saturation.

Néanmoins, cette circulation étant déjà suffisamment pénalisée par la modélisation axiale du cœur (il s'agit d'une étude du domaine complémentaire), on retient comme modélisation pénalisée le cas avec coefficients singuliers (réalistes) :

$\zeta = 6,31$  POUR BYPASS ;

$\zeta = 245$  POUR BPTG.

Si on envisageait une modélisation encore moins pénalisante (suppression complète des pertes de charge aux bypasses), la ré-circulation permettrait de réchauffer l'eau contenue dans le plénum inférieur jusqu'à la température de saturation. Le plénum inférieur étant modélisé avec un seul volume CATHARE, il n'y a pas de stratification possible (tout est homogène en température). En réalité, seulement la couche d'eau en contact avec le cœur s'échaufferait ; dans le reste du plénum inférieur l'eau froide, plus lourde, resterait au fond, ne participant pas au refroidissement. Il serait donc nécessaire de mailler plus finement le plénum inférieur (par exemple avec deux volumes).

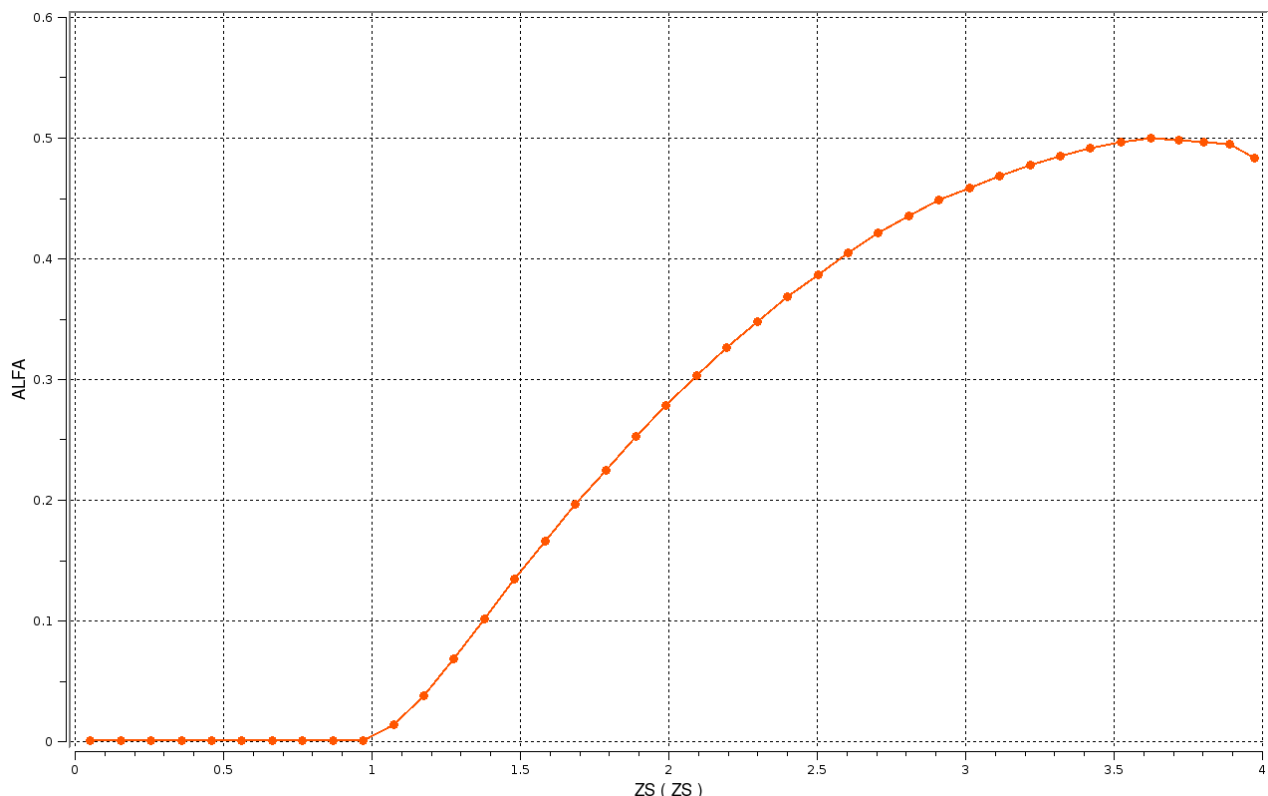


figure 44 Distribution axiale du taux de vide dans le cœur à t = 2000 secondes

Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

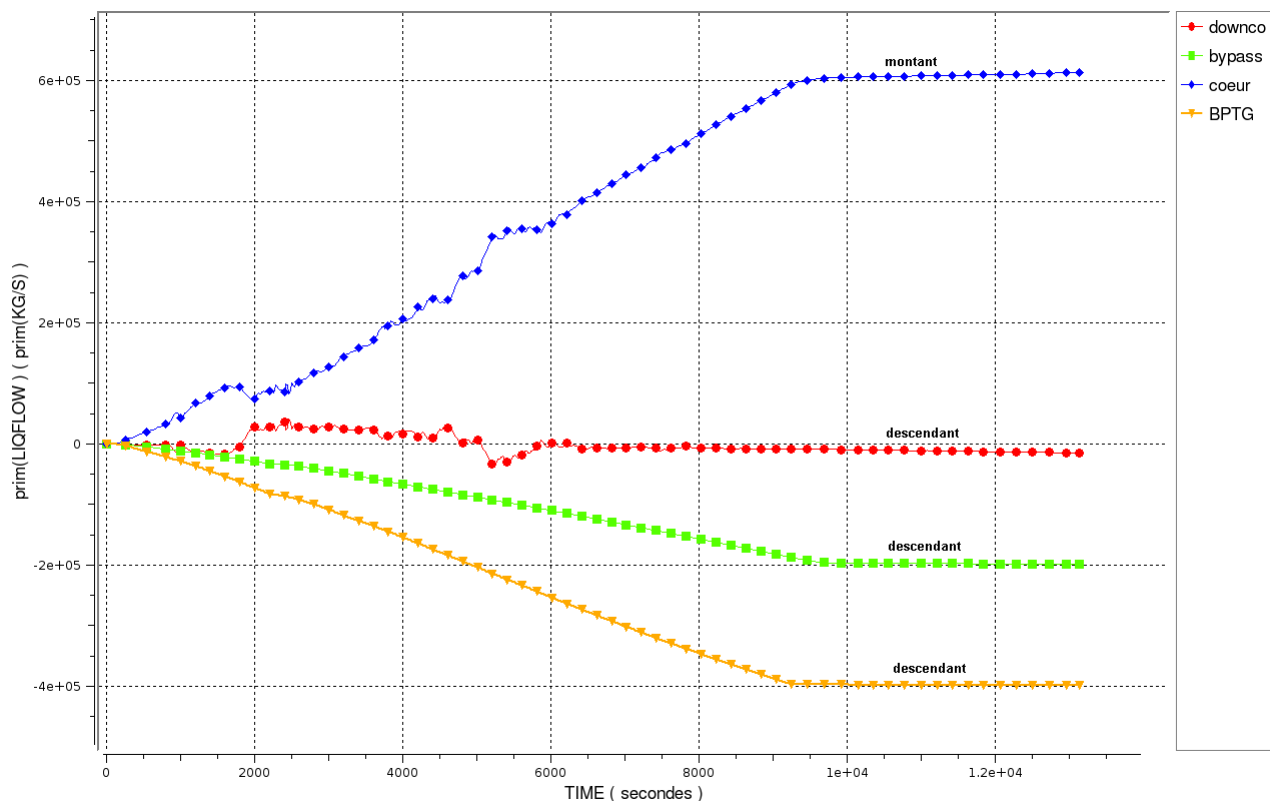


figure 45 Intégrales des débits dans le plénum inférieur

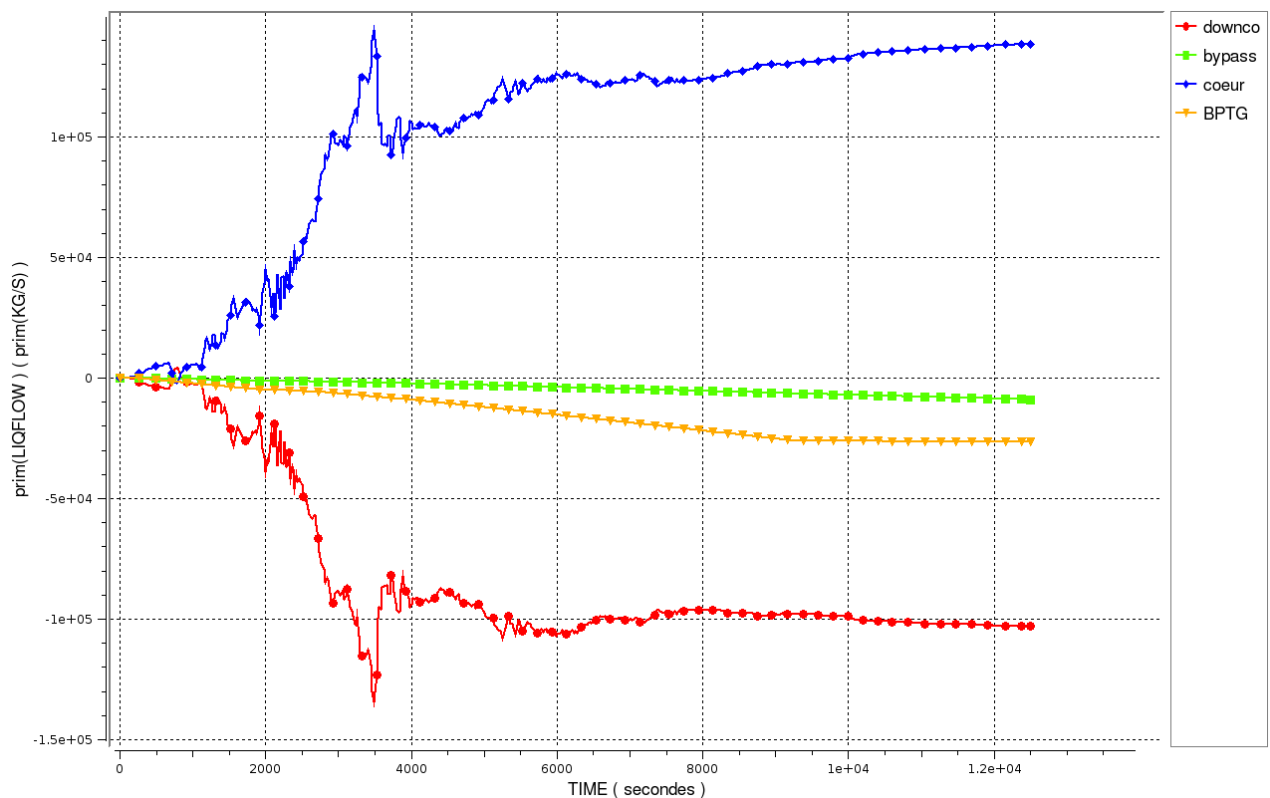


figure 46 Intégrales des débits dans le plénum inférieur, bypasses bouchés

Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

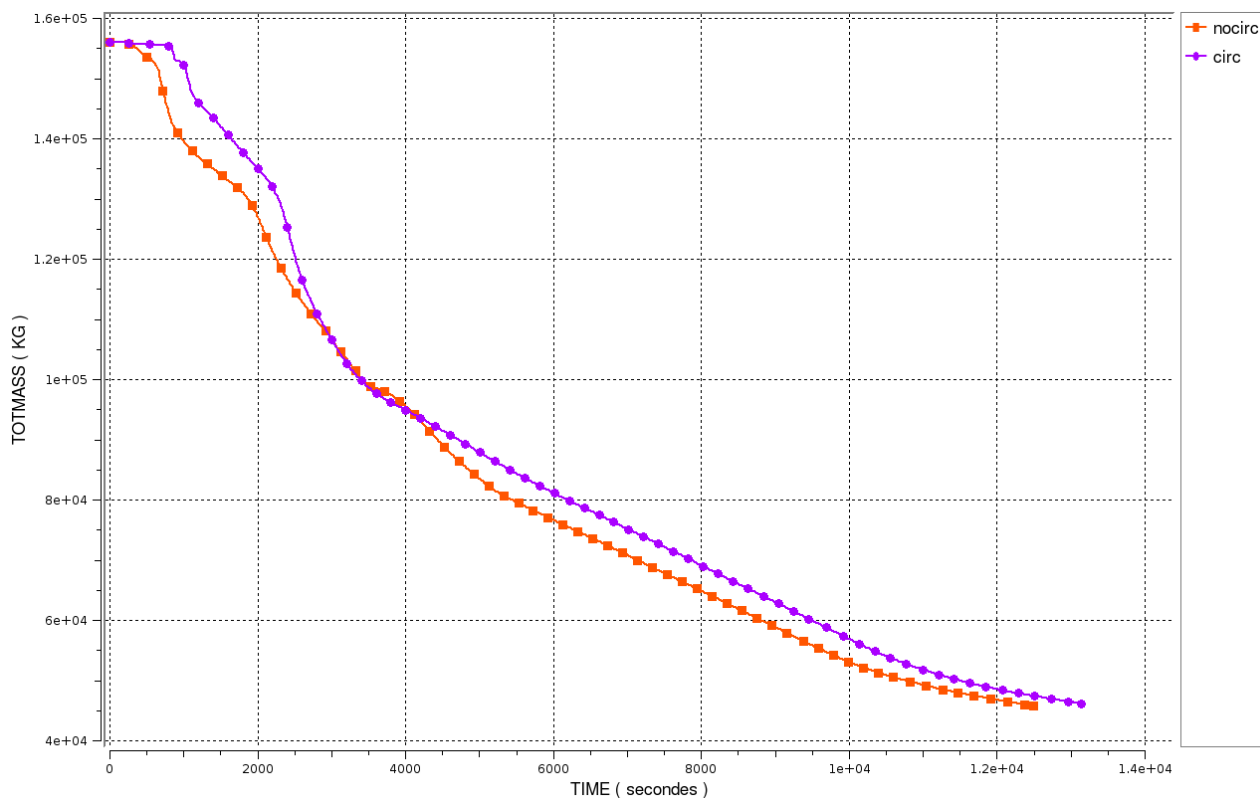


figure 47 Inventaire en eau primaire

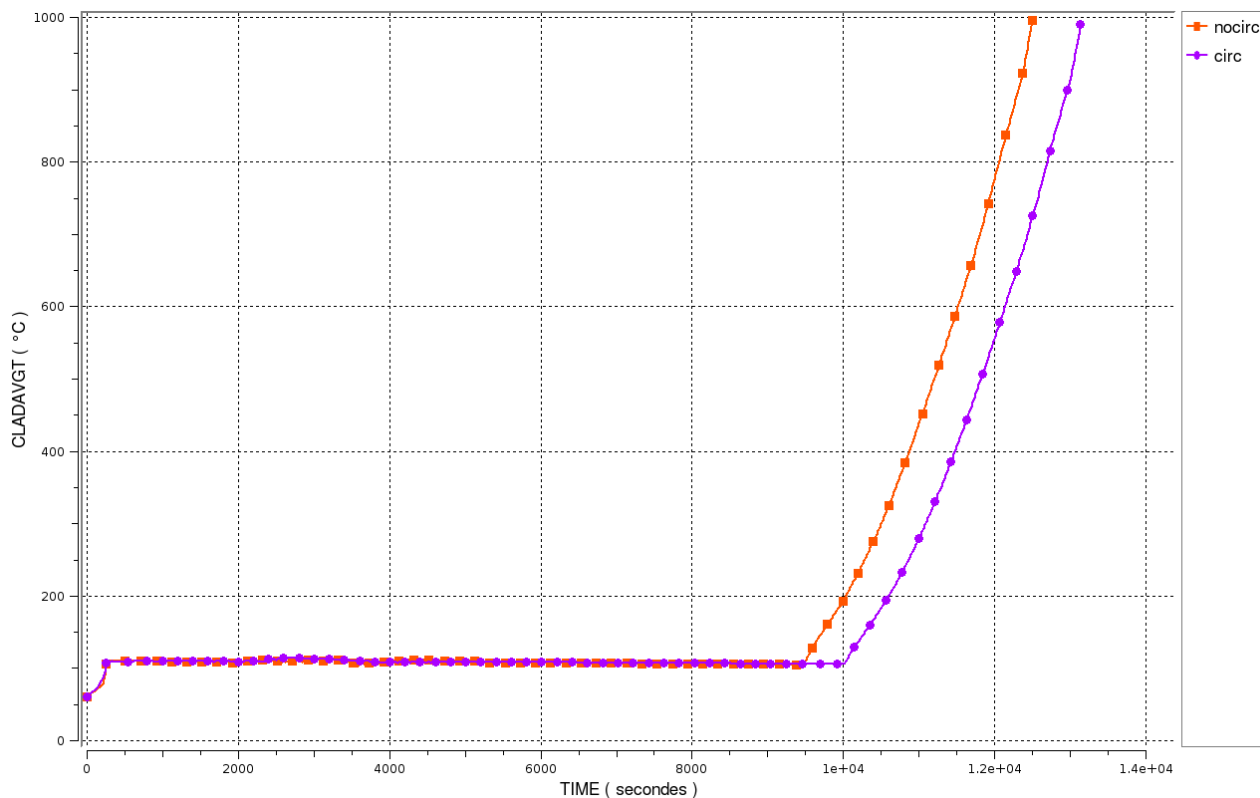


figure 48 Température en haut du cœur de la gaine du crayon moyen

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

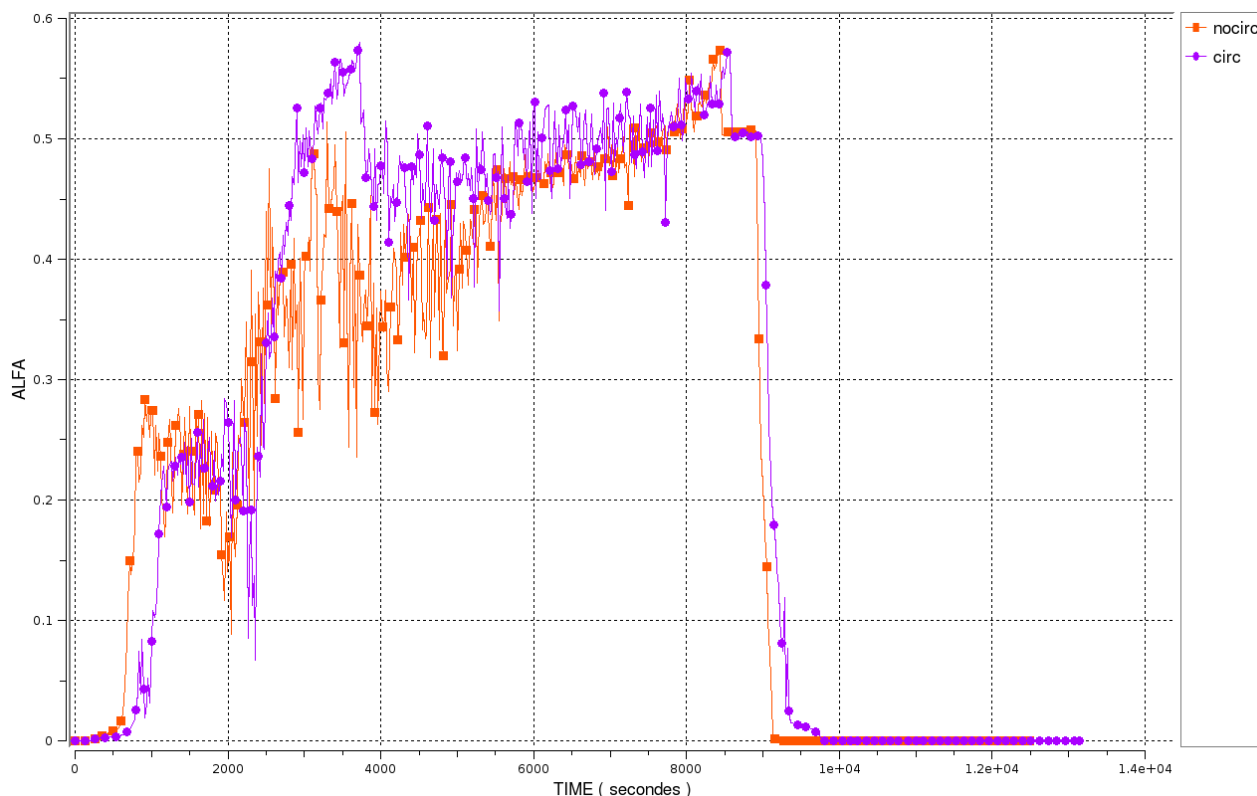


figure 49 Taux de vide dans le plénum supérieur

### 8.13 Calcul de sensibilité à la pression de l'enceinte (palier 900)

Le calcul suivant présente l'évolution du transitoire pour une pression extérieure de 1 bar et de 1,5 bar respectivement.

On peut observer dans la figure 50 que les expulsions de liquide sont plus faibles pour une pression plus élevée, à cause du tassement du niveau gonflé (en effet le taux de vide dans le plénum supérieur à la fin de la phase d'expulsion est moindre). La masse d'eau disponible à la fin de la phase d'expulsion est en conséquence plus élevée, donc le délai avant dénoyage du cœur est plus important (figure 53).

Pour pénaliser ce paramètre on choisit de retenir la valeur de pression enceinte de 1 bar tout au long du transitoire. Des calculs PAREO ont montré, pour le palier 900, que la pression de l'enceinte en cas de perte du RRA peut arriver à 1,5 bar en 3 heures (2 jours après convergence) [7].

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

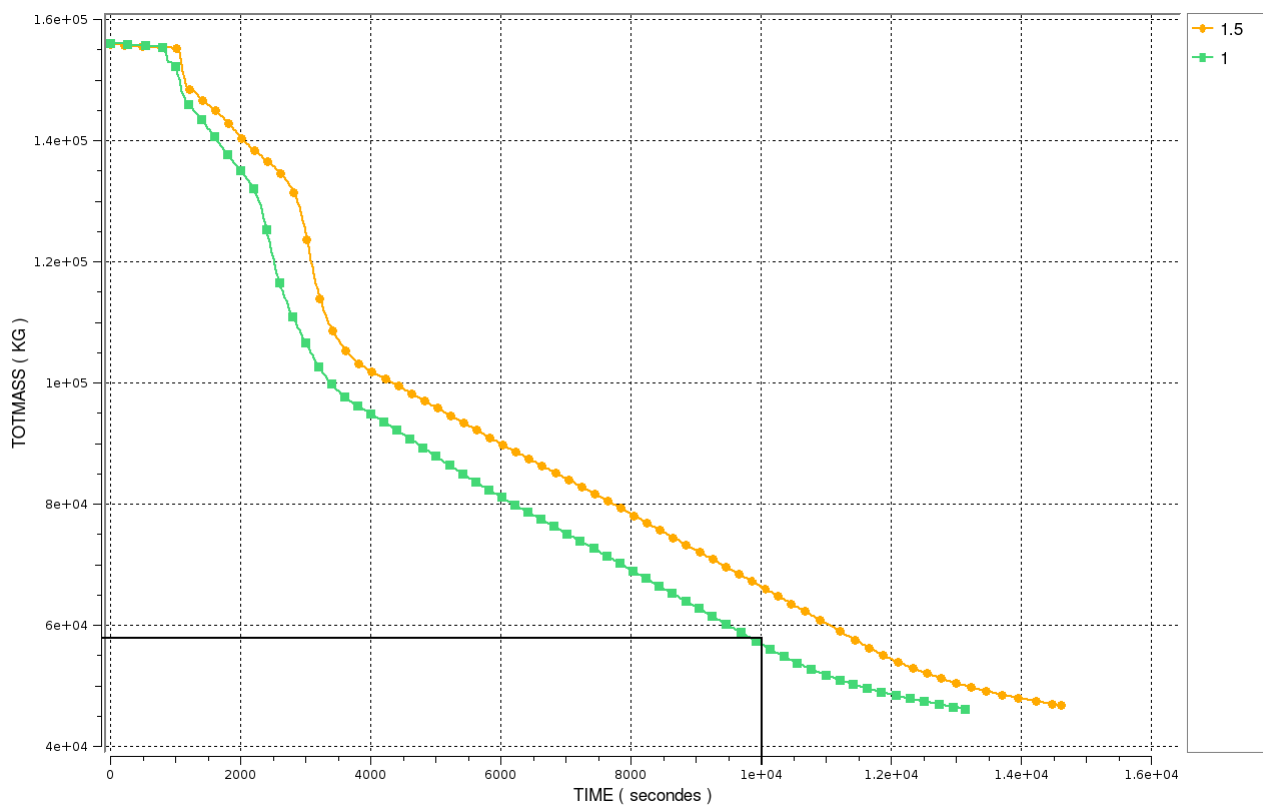


figure 50 Masse dans le primaire

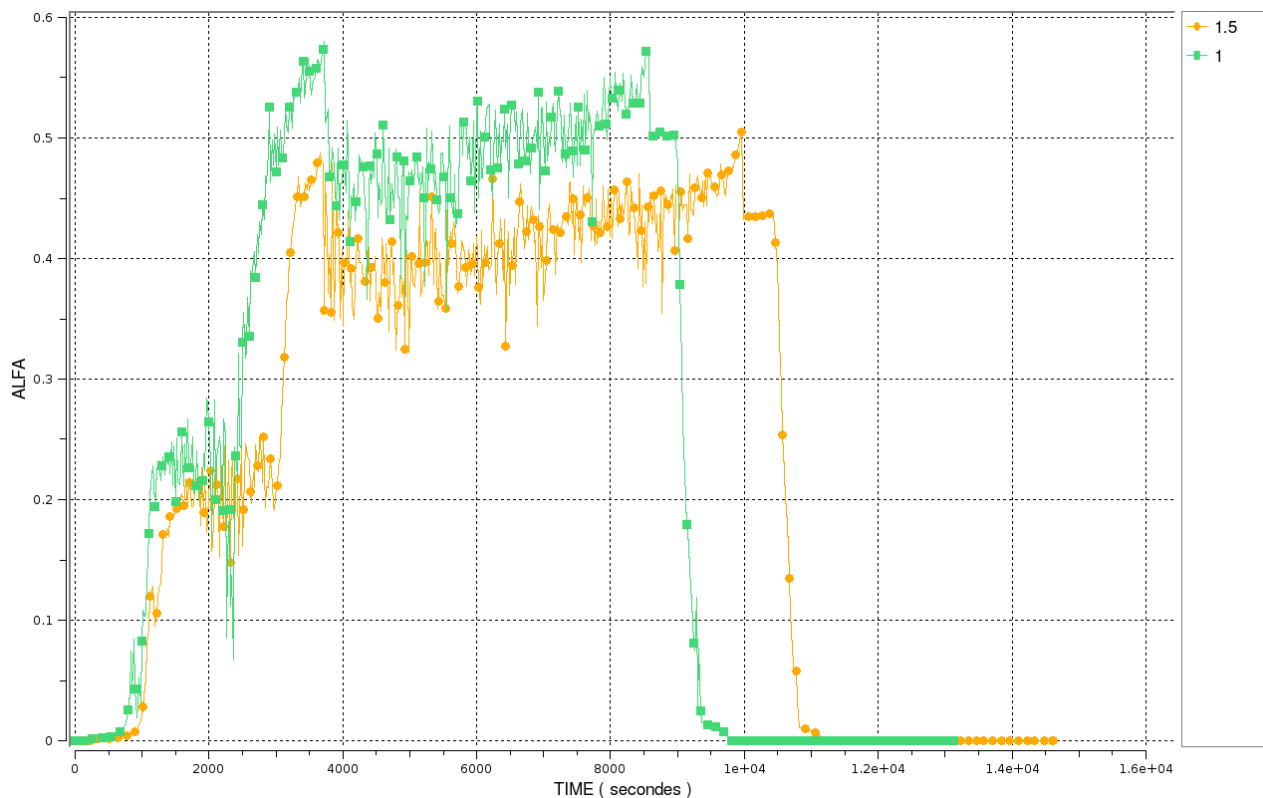


figure 51 Taux de vide dans le plénum supérieur

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

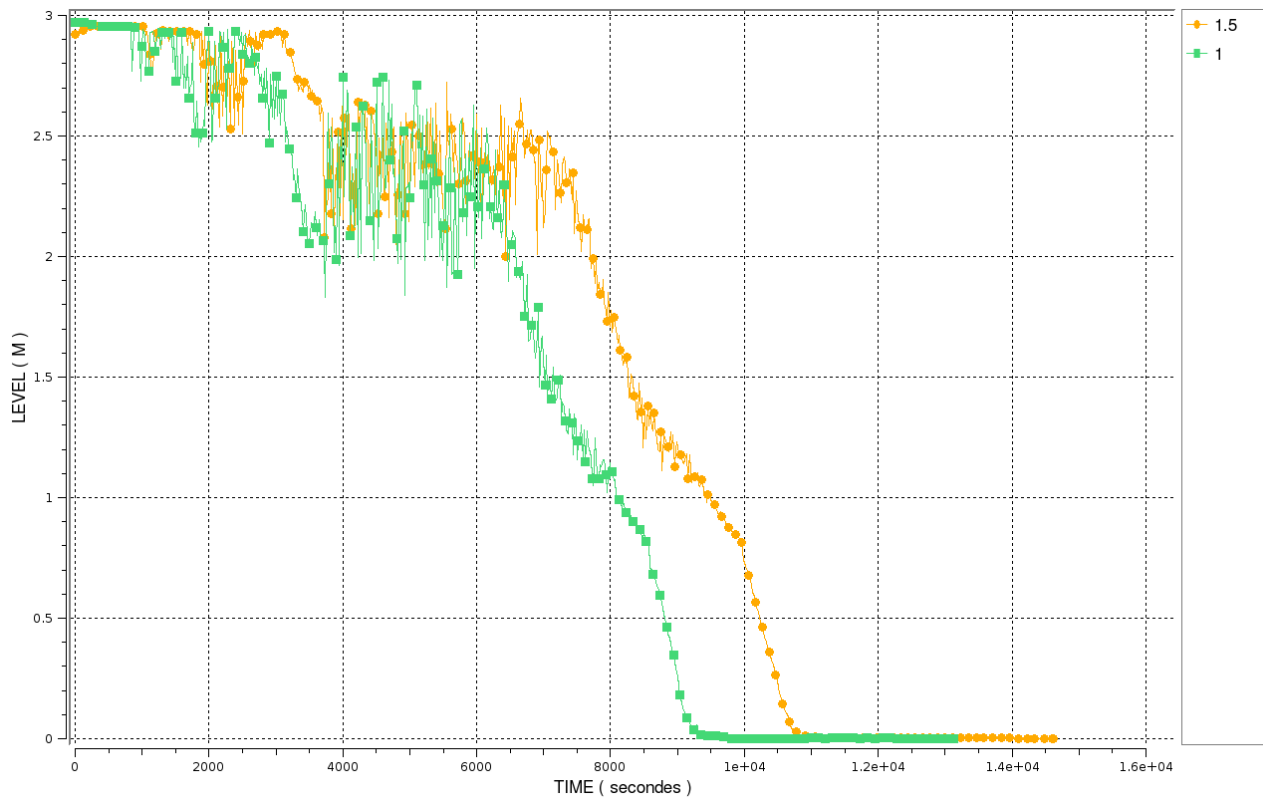


figure 52 Niveau du plénum supérieur

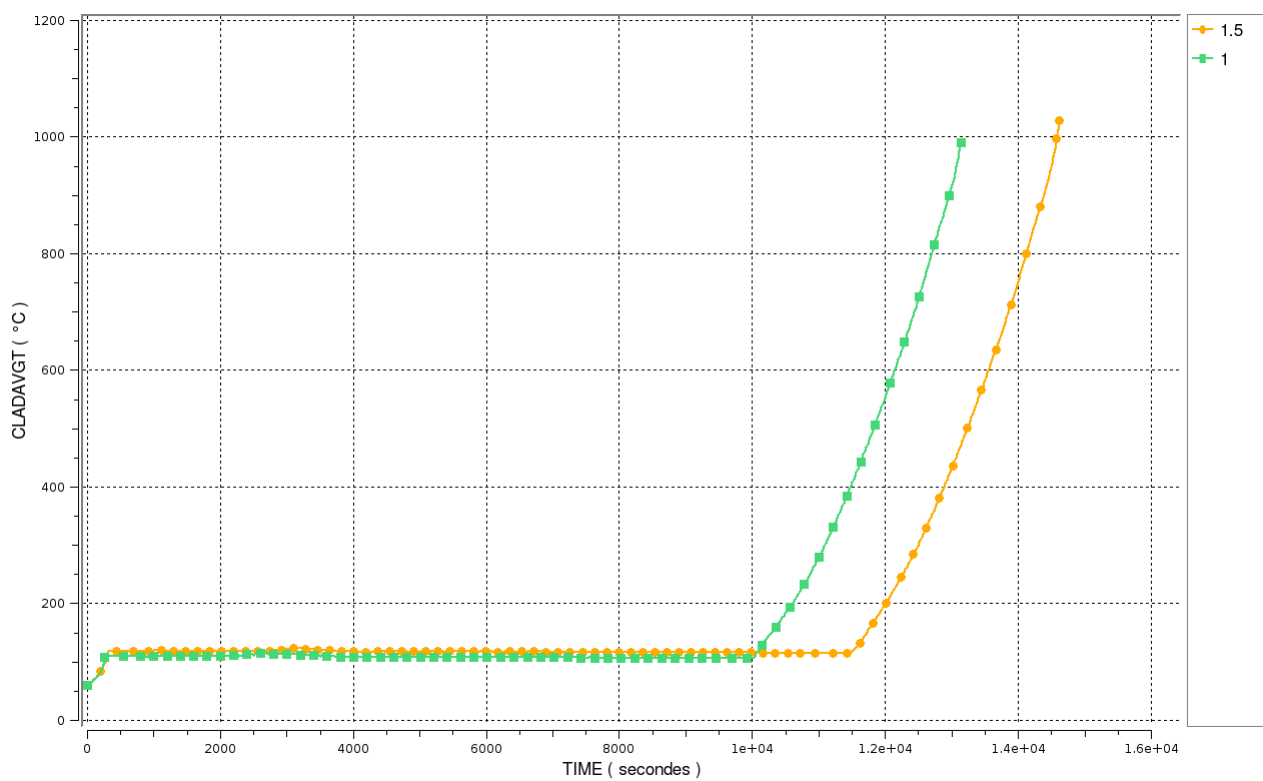


figure 53 Température maximale de la gaine moyenne

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

## 8.14 Courbes 1300

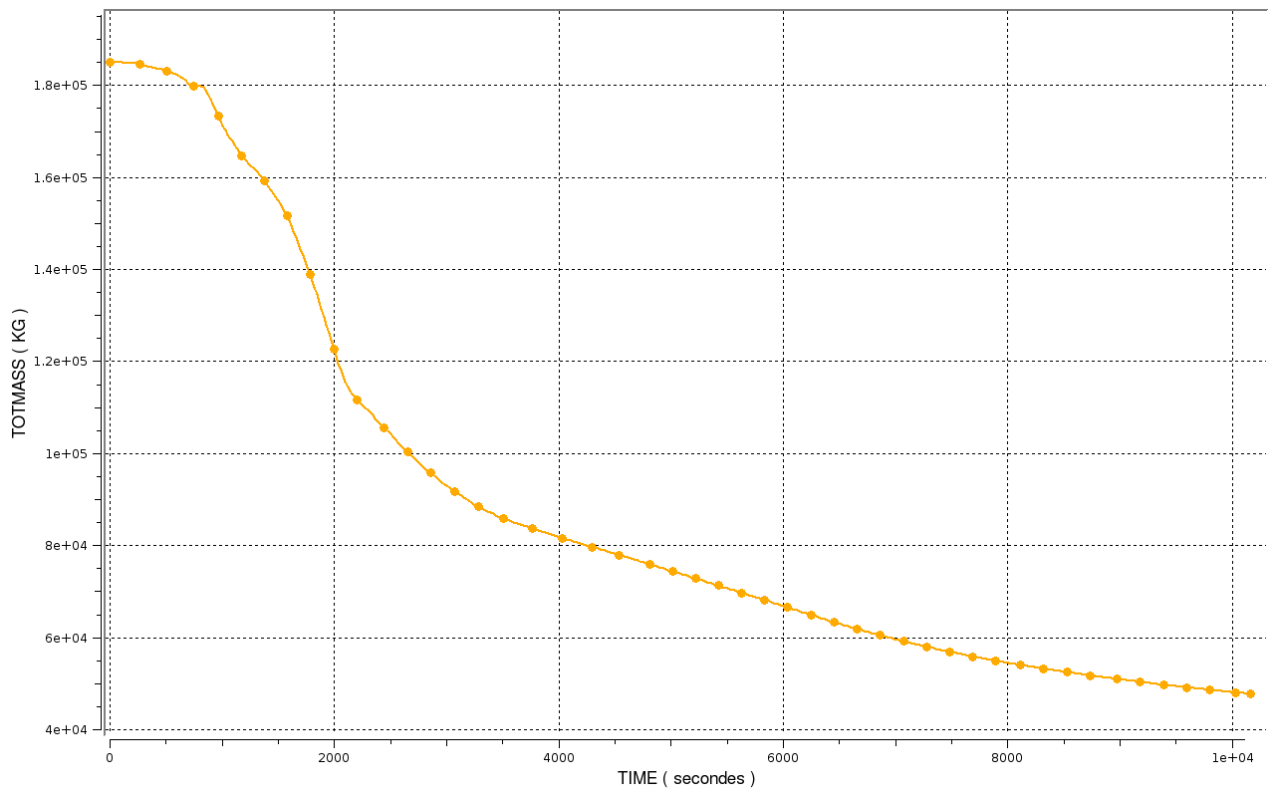


figure 54 Masse du primaire

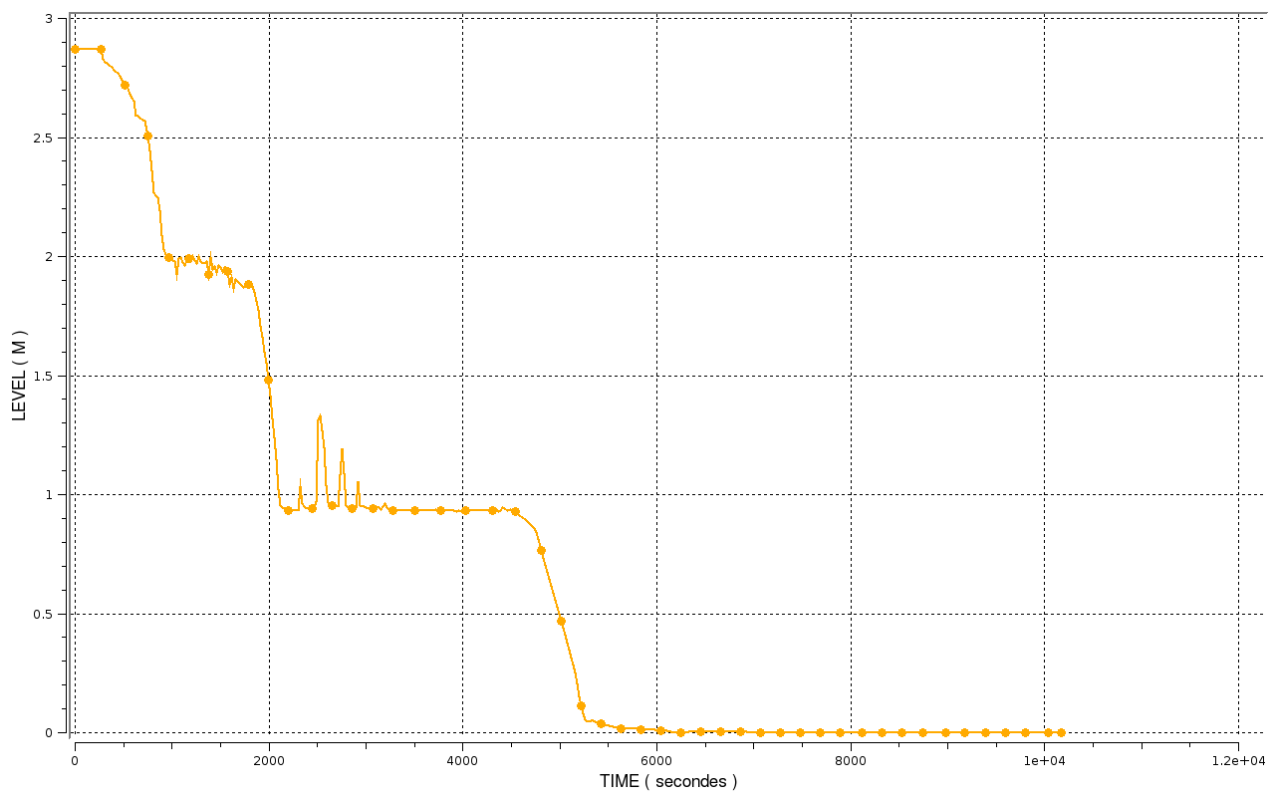


figure 55 Niveau gonflé dans le plénum supérieur

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

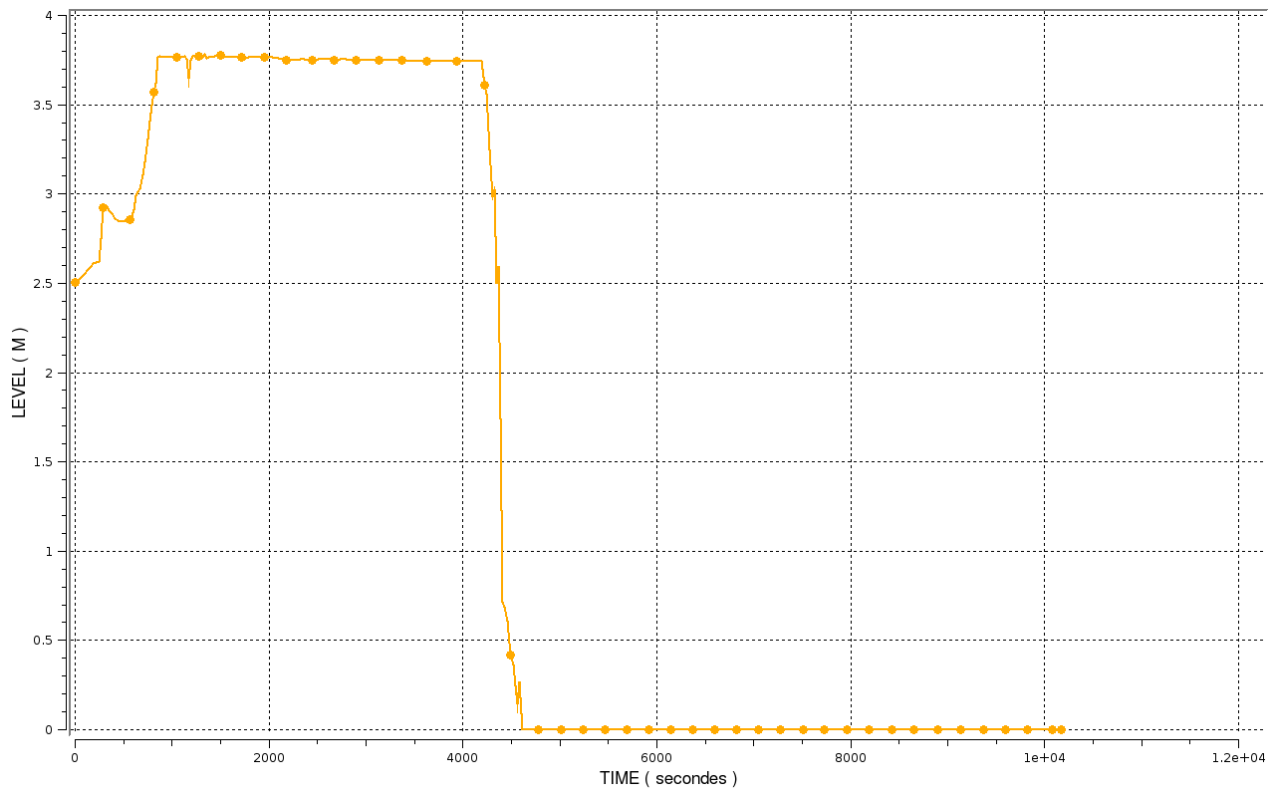


figure 56 Niveau gonflé dans les tubes-guide

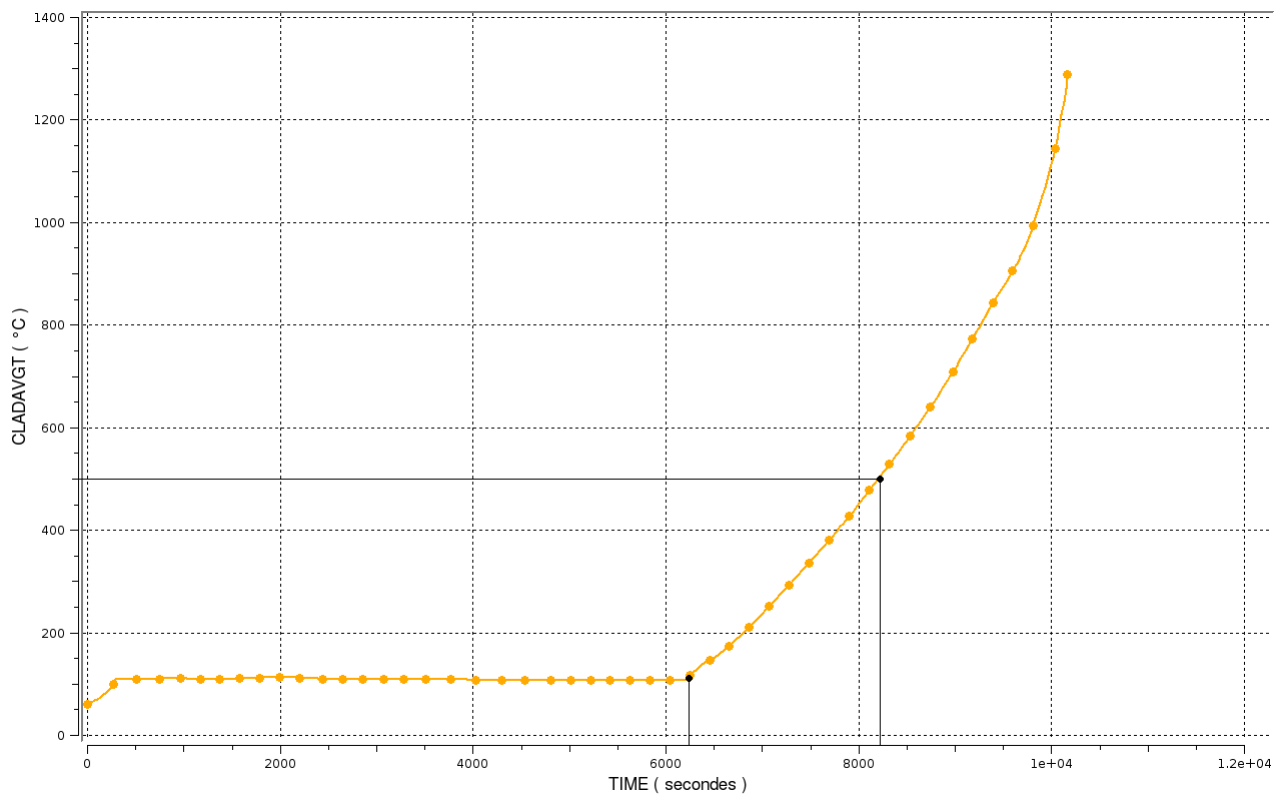


figure 57 Température en haut du cœur de la gaine du crayon moyen (le haut du cœur est le point chaud)

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

## 8.15 Courbes EPR

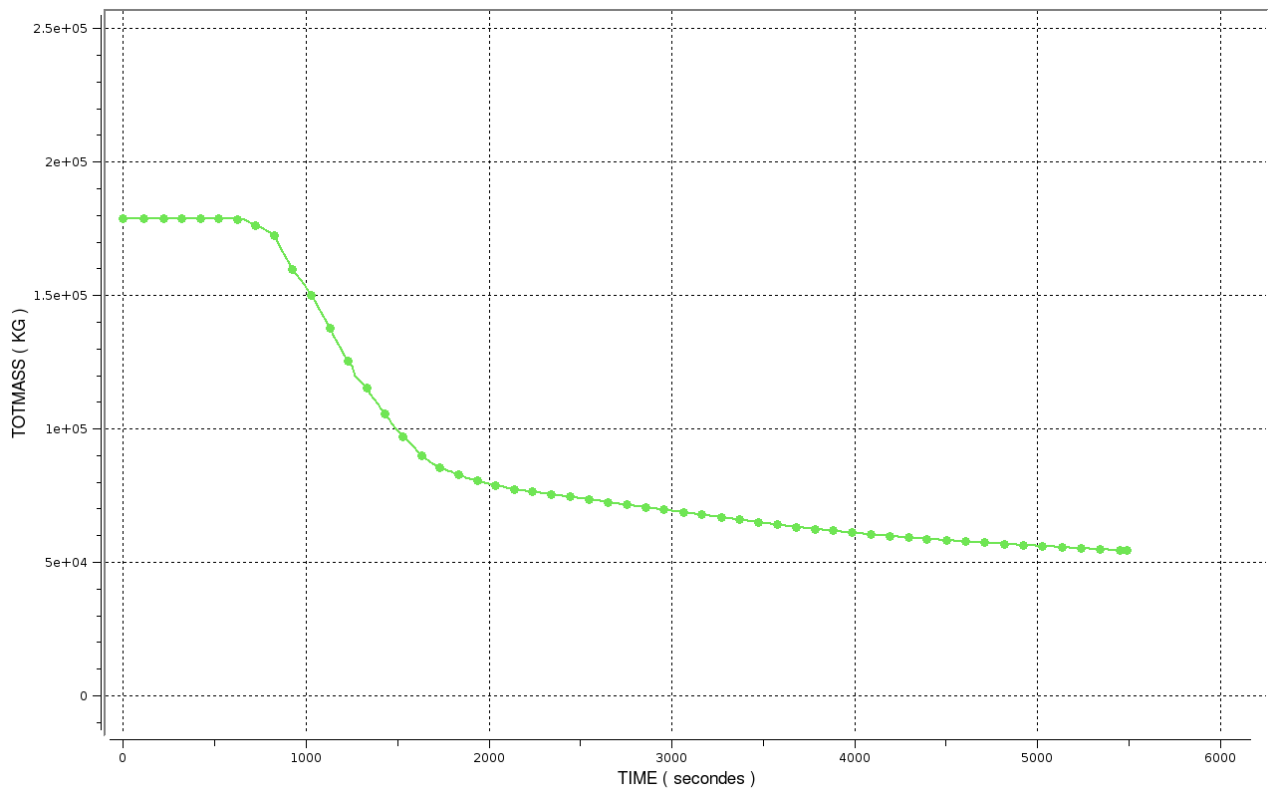


figure 58 Masse du primaire

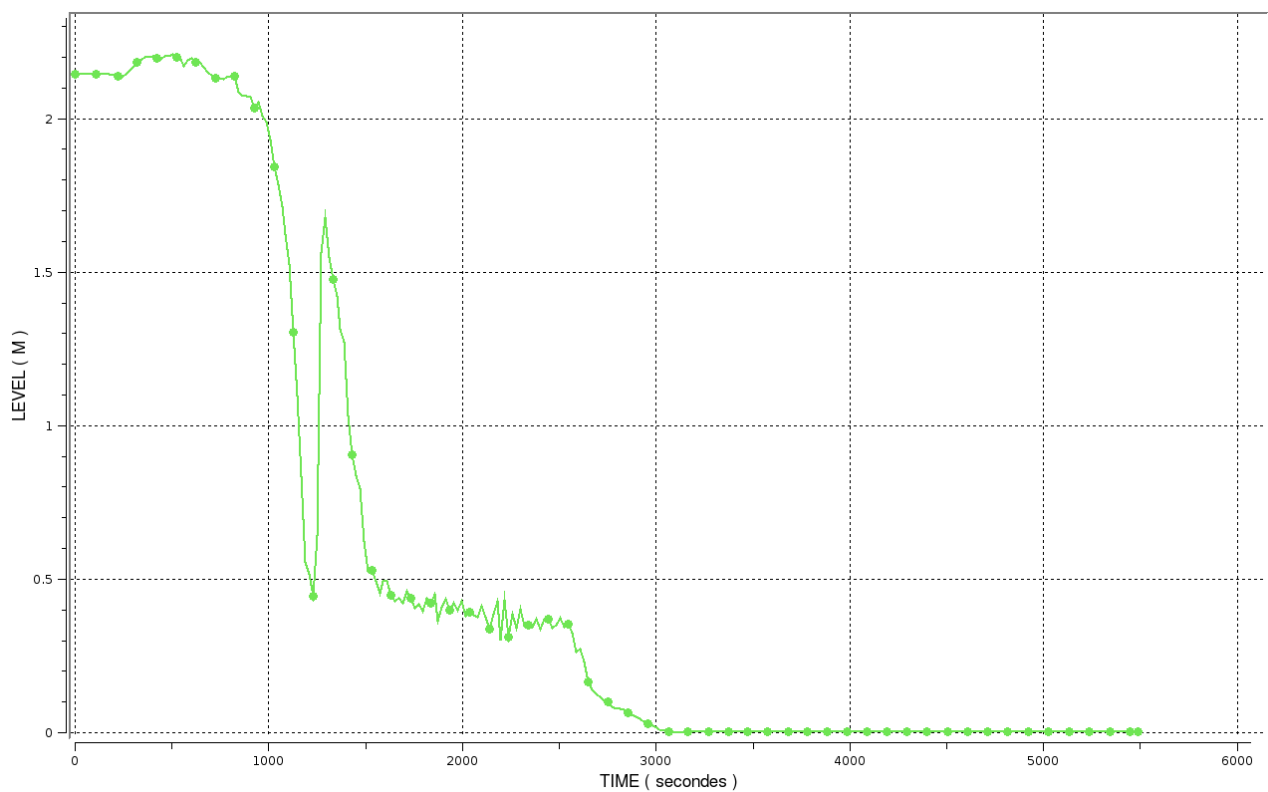


figure 59 Niveau gonflé dans le plénum supérieur

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

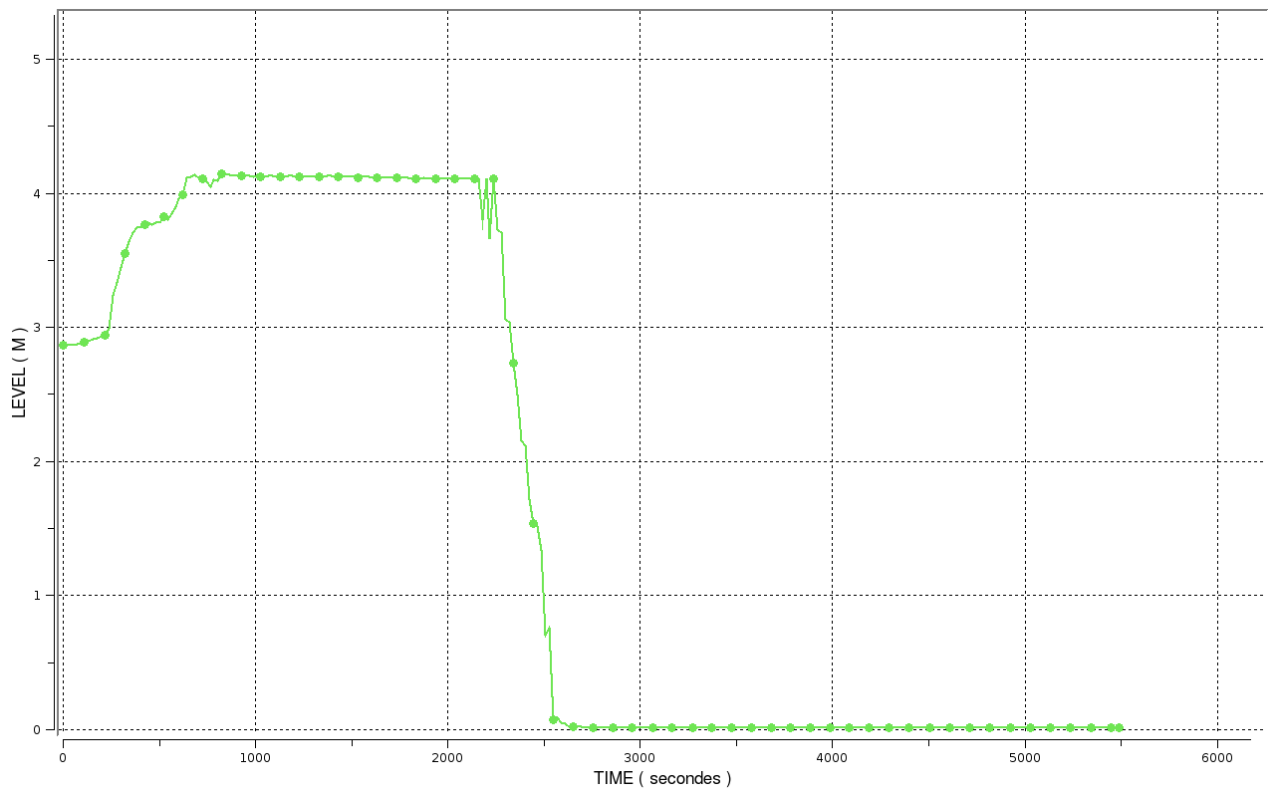


figure 60 Niveau gonflé dans les tubes-guide

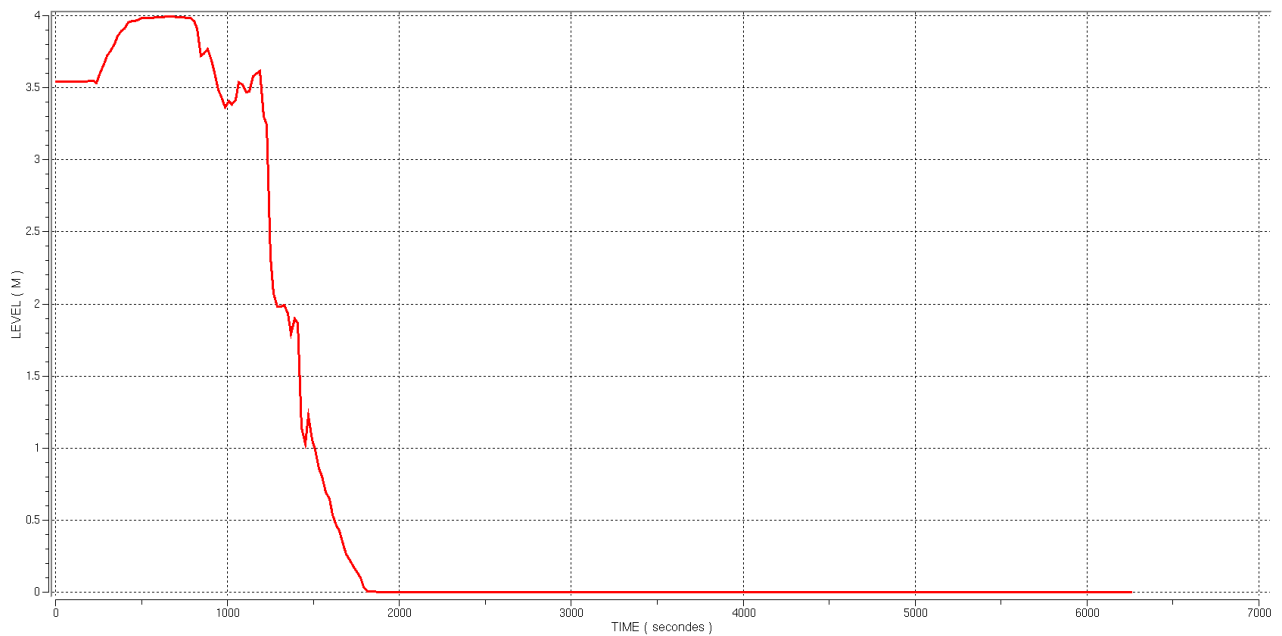


figure 61 Niveau gonflé dans le collecteur annulaire (VOLDOWN). Ce volume, ainsi que les branches froide, sont vidés au cours de la phase d'expulsion

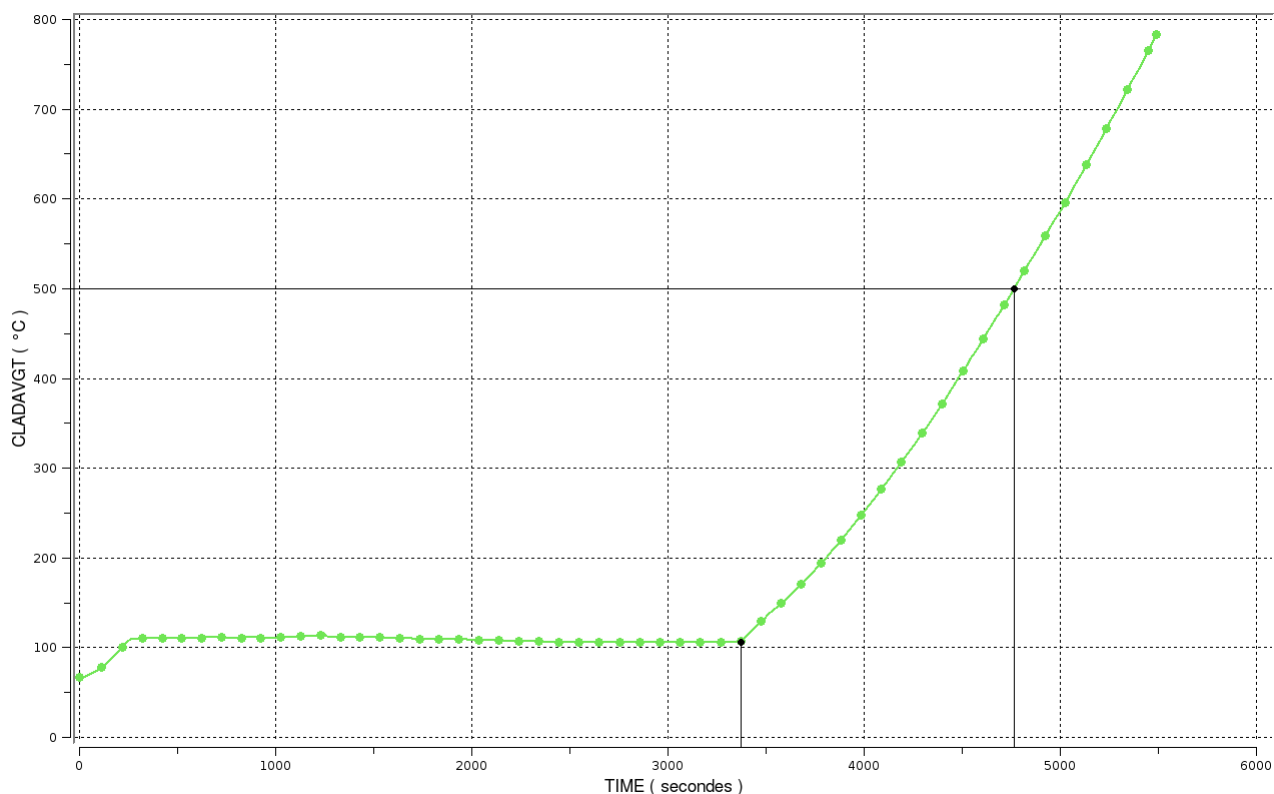
**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

figure 62 Température en haut du cœur de la gaine du crayon moyen

**8.16 Comparaison entre l'ouverture du trou d'homme du pressuriseur, le calcul AREVA [5] et l'ouverture directe de cuve**

On présente dans la suite une comparaison de l'évolution du transitoire de perte du RRA induite par la perte des sources électriques en cas de :

- Trou d'homme du pressuriseur seul ouvert ;
- Ouverture directe de cuve.

Avant la pose des tapes d'un générateur de vapeur il est nécessaire d'ouvrir le trou d'homme du pressuriseur. L'ouverture du trou d'homme du pressuriseur est autorisée, sur le palier 900, 3,5 jours après convergence.

Le trou d'homme représente, dans cette configuration, l'unique ouverture du primaire ; pour cela tout le débit de vapeur produite dans le cœur en cas d'accident passe par la ligne d'expansion du pressuriseur, qui a un diamètre de 30 cm environ. La section de la ligne d'expansion est de

$$A = \pi \frac{D^2}{4} = 0,071 \text{ m}^2.$$

Le débit volumétrique de vapeur a été estimé à 10 m<sup>3</sup>/s environ à 1 bar. La vitesse de la vapeur dans la ligne d'expansion (voir figure 63) est, en première approximation de

**Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve**

$$\bar{v} = \frac{F}{A} = 140 \frac{m}{s}.$$

Une telle vitesse est suffisante pour entraîner l'eau dans le pressuriseur, sans que le pressuriseur puisse se vider.

On a utilisé le jeu de données créé pour l'ouverture directe de cuve pour l'appliquer au cas « trou d'homme du pressuriseur seul ouvert ». Cette configuration s'avère la plus pénalisante, car le délai avant dénoyage du cœur est plus court (4900 secondes soit 1 heure et 22 minutes – figure 66), au moins pour les paliers 900 et 1300. Le calcul AREVA donne le même délai malgré des différences de modélisation (il pourrait y avoir des différences qui se compensent). Pour l'EPR le calcul relatif à l'ouverture du trou d'homme du pressuriseur a été réalisé par la suite (voir référence [31]).

Sur la figure 64, on peut remarquer que pour le cas « PRESSU » le découvrement intervient avec une masse d'eau primaire d'environ 65 tonnes, alors que pour le cas « HEAD » la masse d'eau lors du découvrement est de 55 tonnes. Cette différence représente la masse d'eau stockée dans le pressuriseur dans le cas « PRESSU » : cette masse d'eau ne participe pas au refroidissement.

Le calcul « trou d'homme pressuriseur ouvert » est noté avec PRESSU sur les courbes. Le calcul « ouverture directe de cuve » est noté avec HEAD.

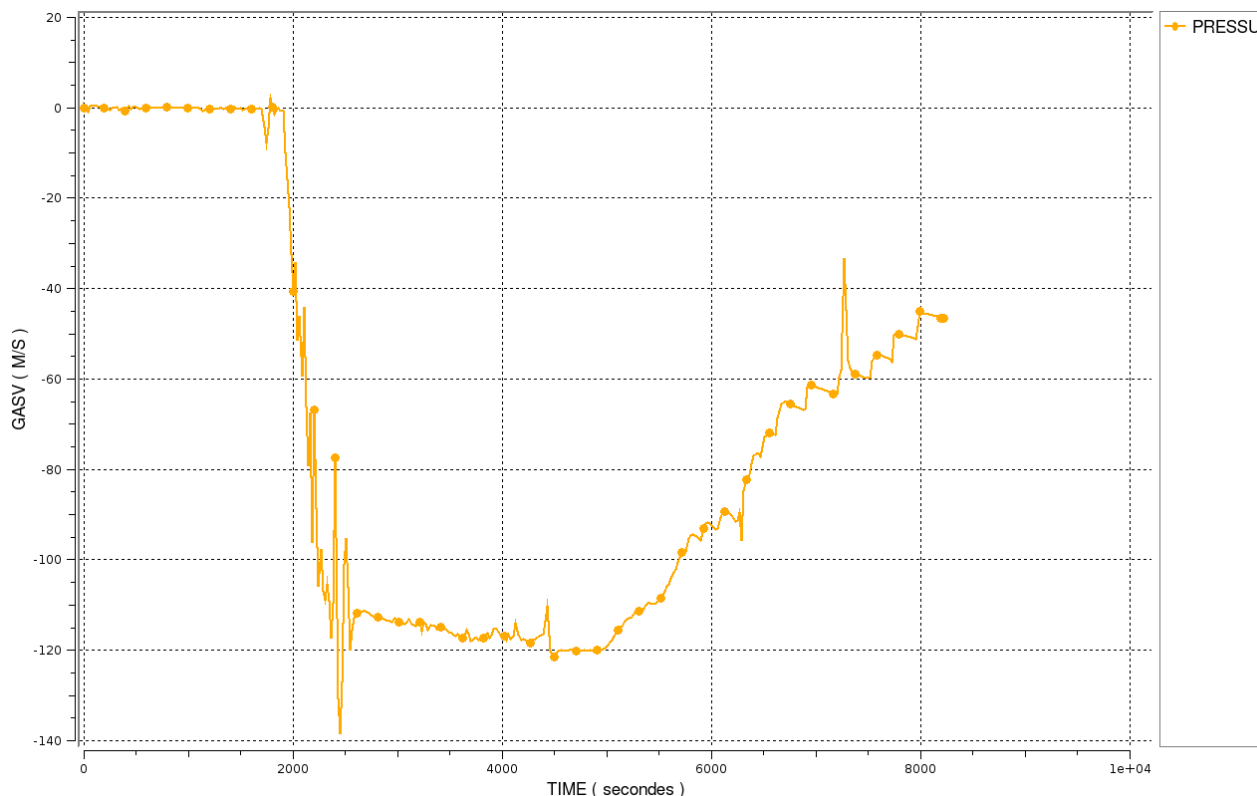


figure 63 Vitesse vapeur dans la ligne d'expansion du pressuriseur, qui entraîne des phénomènes de limite de contre-courant

Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

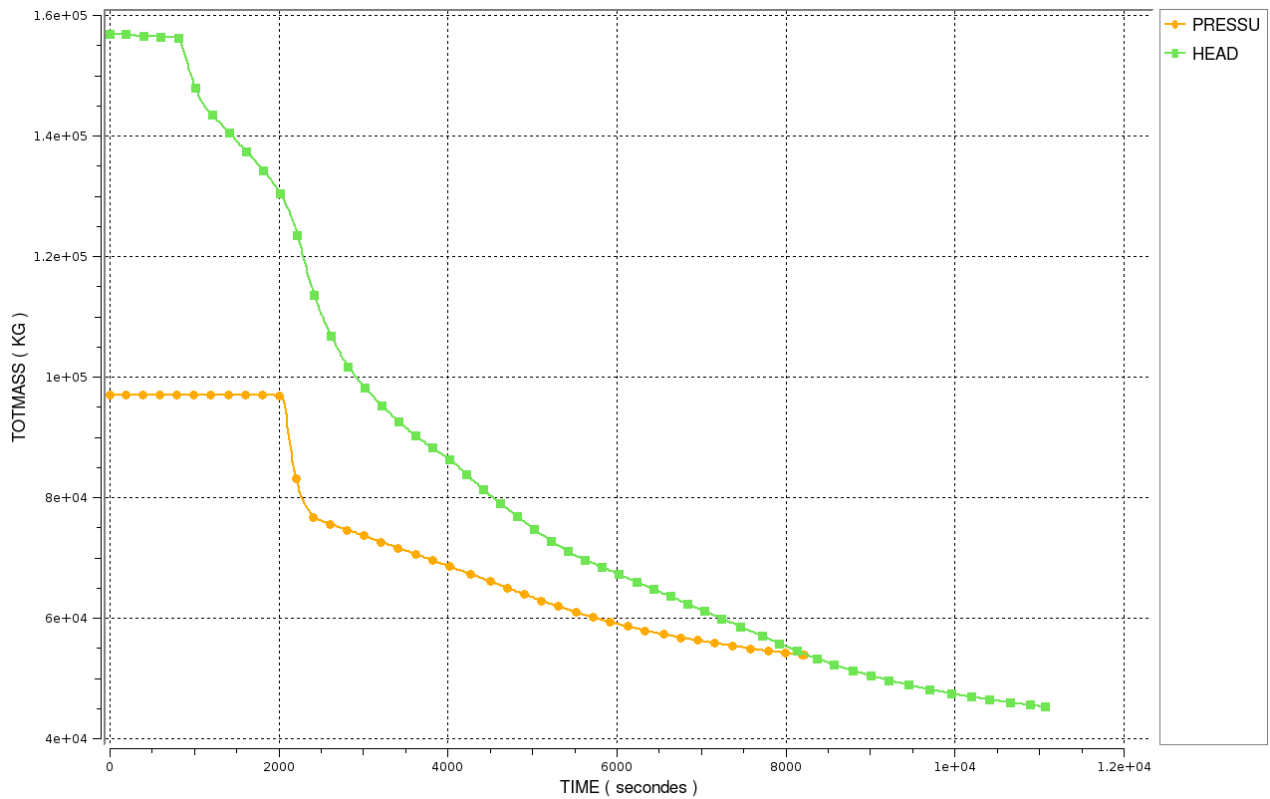


figure 64 Inventaire de réfrigérant primaire (pressuriseur compris)

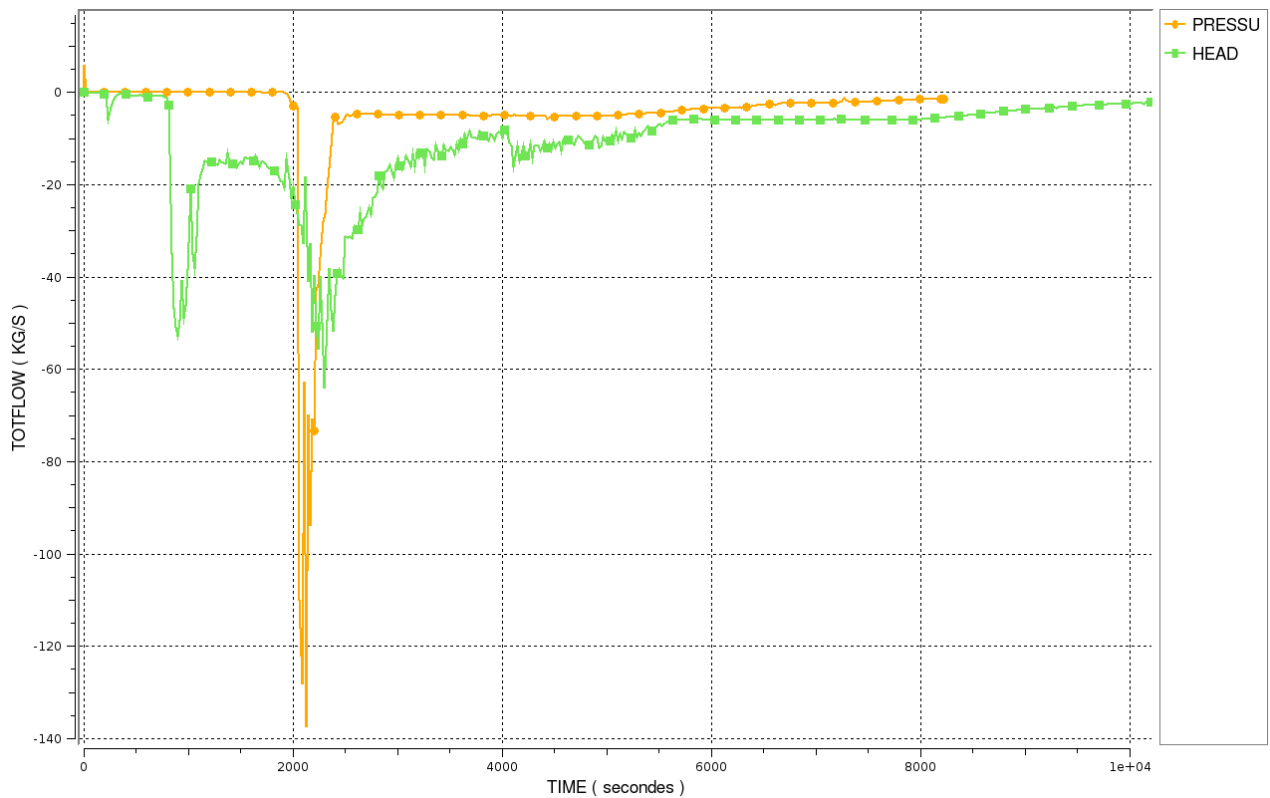


figure 65 Débits à l'ouverture

## Méthodologie d'étude de l'accident de perte du RRA en configuration d'ouverture directe de cuve

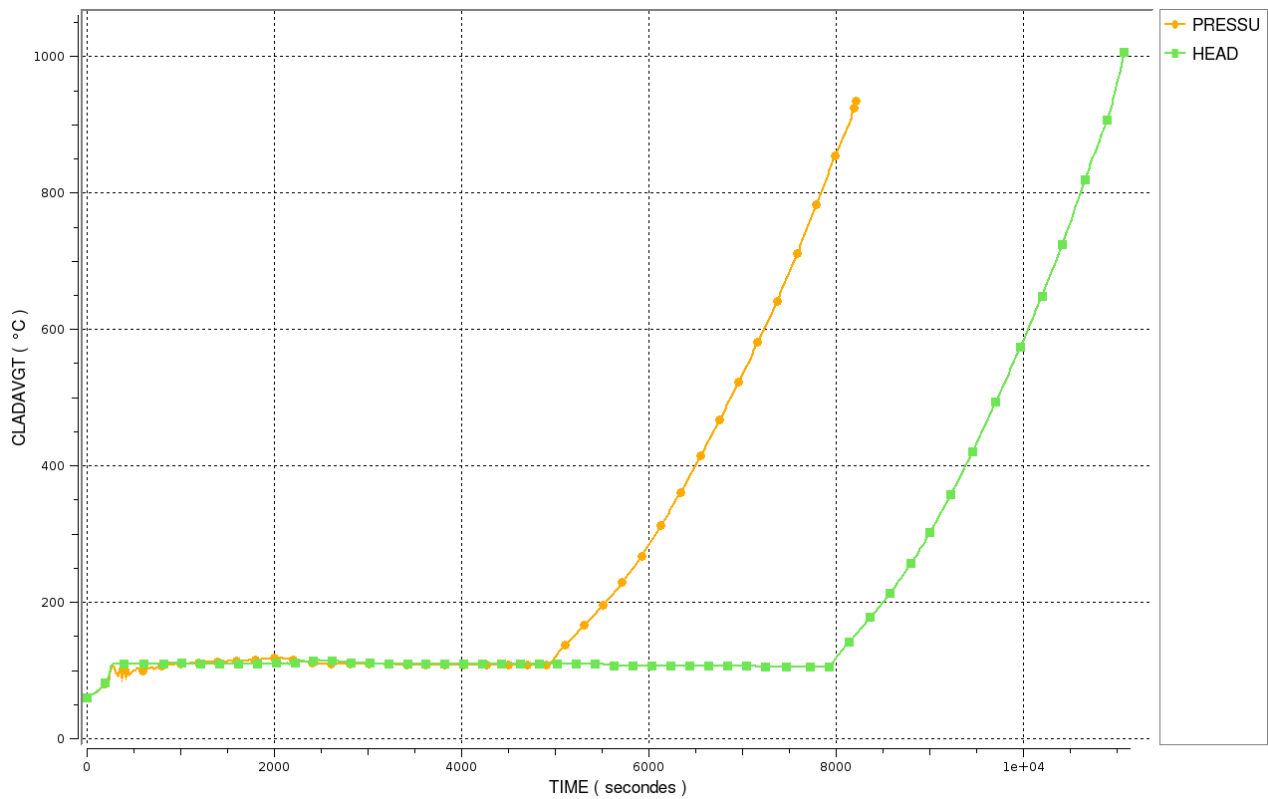


figure 66 Température maximale de la gaine du crayon moyen (haut du cœur) dans les cas ouverture directe de cuve et ouverture du trou d'homme pressuriseur