



HAL
open science

ASTEC full coupled module core melting accident and source term computation

Gregory Nicaise, Edouard Veilly

► **To cite this version:**

Gregory Nicaise, Edouard Veilly. ASTEC full coupled module core melting accident and source term computation. IRSN/PSN-RES/SAG/2012-00177, IRSN - Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire. 2012. hal-04263947

HAL Id: hal-04263947

<https://hal.science/hal-04263947>

Submitted on 3 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE*Faire avancer la sûreté nucléaire*

PROJET TERMES SOURCES DE REFERENCE REP 1300 MWe

**Accident de perte de réfrigérant primaire avec
défaillance des systèmes de sauvegarde à la
solicitation**

Phénoménologie et rejets à l'environnement (calculs ASTEC V2)

ETUDE PRELIMINAIRE*Grégory Nicaise, Edouard Veilly*

Rapport PSN-RES/SAG/2012-00177

Projet Termes Sources/REP/2012-01

Fiche descriptive du rapport
Report description sheet

PROJET TERMES SOURCES DE REFERENCE REP 1300 MWe
**Accident de perte de réfrigérant primaire avec
 défaillance des systèmes de sauvegarde à la
 sollicitation**

Phénoménologie et rejets à l'environnement (calculs ASTEC V2)

ETUDE PRELIMINAIRE

Rapport PSN-RES/SAG/2012-00177

Projet Termes Sources/REP/2012-01

| | Unité <i>Unit</i> | | | Approbation pour diffusion <i>Approval for diffusion</i> | |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---|------------------------------|
| | Rédacteur(s) <i>Author(s)</i> | Vérificateur(s) <i>Reviewer(s)</i> | Chef d'unité <i>Head of unit</i> | Chef de service <i>Head of department</i> | Directeur <i>Director</i> |
| Nom <i>Name</i> | G. NICAISE E. VEILLY | F. COUSIN C. MUN | C. CAROLI | J-M. BONNET E. RAIMOND | J-C. MICAELLI |
| Date | 30/07/2012 | 20/09/12 | 28/09/12 | 27/11/2012 | |
| Visa | | | | | |

Qualité
Quality

| | |
|--------------------|--|
| Nom <i>name</i> | |
| Date | |
| Visa | |

Projet
Project

| | |
|--------------------|--|
| Nom <i>name</i> | |
| Date | |
| Visa | |

Fiche descriptive du rapport
Report description sheet

Title

PROJET TERMES SOURCES DE REFERENCE REP 1300 MWe

Accident de perte de réfrigérant primaire avec défaillance des systèmes de sauvegarde à la sollicitation (étude préliminaire)

Sub title

Phénoménologie et rejets à l'environnement (calculs ASTEC V2)

Auteur/author(s) :

G. NICAISE, E. VEILLY

| | | | |
|--|----------------|---|--|
| Type de document : <i>Document type :</i> | RT | Date de diffusion : <i>Distribution date :</i> | |
| Référence archivage : | SAG-2012-138 | E-mail : | [gregory.nicaise/edouard.veilly] @irsn.fr |
| Élément EOTP | 01D/T06-006/03 | | |

| | |
|----------------------|----------------------|
| Mots-clés (Max. 5) : | APRP, Terme Source |
| Key-words (Max. 5): | LB-LOCA, Source Term |

Fiche descriptive du rapport *Report description sheet*

RESUME

Ce document présente les résultats de calculs ASTEC (v2) tous modules, permettant de décrire la phénoménologie et d'évaluer le Terme Source radiologique d'un accident de fusion de cœur sur un REP de type P'4 (1300 MWe), ainsi que les hypothèses de modélisation associées.

Le scénario étudié est un accident de perte de réfrigérant primaire non secouru (absence totale d'injection de sécurité et d'aspersion enceinte), initié par grosse brèche (12 pouces) en branche chaude du circuit primaire. Cette séquence est choisie pour représenter une situation de dégradation rapide du cœur nucléaire et un court délai de rupture de la cuve (moins de deux heures après l'initiateur), avec une rétention supposée nulle des radioéléments dans le circuit primaire.

Un premier calcul prototypique est réalisé, avec une modélisation de la double enceinte de confinement, sans bâtiments auxiliaires, afin de mettre au point le système de calcul. Un second calcul est réalisé sur une modélisation détaillée comportant 22 volumes, dont 19 pour la double enceinte et 3 pour les bâtiments auxiliaires (BAN, BAS, BK). Pour ce calcul, sept jours de temps physique sont simulés.

En termes de rejets, les résultats de ce calcul détaillé sont comparables à ceux obtenus lors de la réévaluation du Terme Source S3 menée à l'IRSN en 2000, hormis pour l'iode, dont le rejet est sensiblement plus important et la spéciation chimique plus finement décrite. En termes de phénoménologie, cette séquence avec absence totale d'injection de sécurité (IS) et d'aspersion enceinte (EAS) amène une ouverture du filtre U5 à environ 3 jours sur critère P=5.2 bar.

Plusieurs perspectives d'amélioration de ce type de calcul sont présentées en conclusion, en lien avec les points importants issus de l'analyse des résultats.

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS/CHANGE HISTORY

| Indice de révision <i>Revision</i> | Référence <i>Reference</i> | Date | Auteur <i>Author</i> | Pages ou paragraphes modifiés <i>Pages or paragraphs changed</i> | Nature des modifications <i>Nature of the changes</i> |
|---------------------------------------|-------------------------------|------------|--------------------------|---|---|
| 0 | | 07/06/2012 | G. NICAISE, E. VEILLY | | Les résultats ont été présentés en CT EPS2 du 05/06/2012. La cinétique de pressurisation de l'enceinte est jugée trop rapide ce qui conduit à des interrogations sur l'échauffement des parois du dôme suite à l'adsorption d'iode. |
| 1 | | 21/06/2012 | G. NICAISE E. VEILLY | § 3 dans son intégralité | Mise à jour des résultats présentant initialement un problème de calcul sur la puissance massique de l'iode affectant significativement l'ensemble de la phénoménologie dans l'enceinte. |
| 2 | | 30/07/2012 | G .NICAISE E. VEILLY | Ajout du § 3.5 | Certaines analyses de sensibilité suite aux remarques des relecteurs |
| 2 | | 30/072012 | G .NICAISE E. VEILLY | Ajout du § 2.2 | Précision sur la méthodologie de calcul |
| 2 | | 30/07/2012 | G .NICAISE E. VEILLY | Ajout du § 3.6 | Suite à réception d'un patch le 12/07/2012 pour le bon fonctionnement du module RUPUICUV (fiche MARCUS du 13/06/2012) |
| 2 | | 20/09/2012 | G .NICAISE E. VEILLY | | Remarques finales des relecteurs |
| 2 | | 15/10/2012 | G .NICAISE E. VEILLY | Tous | Remarques E. RAIMOND et J.M. BONNET |

SOMMAIRE

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCTION | 7 |
| 2 | PRESENTATION D'ASTEC, METHODOLOGIES ET CALCUL TERME SOURCE SIMPLIFIE | 8 |
| 2.1 | ASTEC ET SES MODULES | 8 |
| 2.2 | METHODOLOGIE | 11 |
| 2.3 | CALCUL SIMPLIFIE | 13 |
| 2.3.1 | METHODE ET HYPOTHESES | 13 |
| 2.3.2 | DOMAINE DE CALCUL ET ARCHITECTURE DE LA MISE EN DONNEES | 15 |
| 2.3.3 | RESULTATS DU CALCUL SIMPLIFIE | 16 |
| 3 | CALCUL DETAILLE | 19 |
| 3.1 | METHODE ET HYPOTHESES | 19 |
| 3.2 | DOMAINE DE CALCUL, ARCHITECTURE DE LA MISE EN DONNEES | 21 |
| 3.3 | RESULTATS DETAILLES | 24 |
| 3.3.1 | PHENOMENOLOGIE ACCIDENTELLE GLOBALE | 24 |
| 3.3.2 | DEGRADATION, FORMATION DU CORIUM, EMISSION EN ENCEINTE | 25 |
| 3.3.3 | INTERACTION CORIUM-BETON | 27 |
| 3.3.4 | THERMOHYDRAULIQUE DANS L'ENCEINTE ET TRANSPORT DES AEROSOLS | 29 |
| 3.3.5 | FOCUS SUR LA CHIMIE DE L'IODE DANS L'ENCEINTE | 35 |
| 3.4 | REJETS, TERME SOURCE, ET RESULTATS COMPLEMENTAIRES | 37 |
| 3.4.1 | REJETS HORS IODE AVEC FILIATIONS | 37 |
| 3.4.2 | REJETS EN IODE HORS FILIATION | 39 |
| 3.4.3 | TERME SOURCE ET COMPARAISON A L'EVALUATION S3 DE 2000 [1] | 40 |
| 3.4.4 | RESULTATS COMPLEMENTAIRES : PUISSANCE DEPOSEE DANS LES FILTRES, MASSE DE DIHYDROGENE DANS L'ENCEINTE INTERNE | 41 |
| 3.5 | ANALYSES DE SENSIBILITE | 42 |
| 3.6 | AMELIORATION DU CALCUL DE DEGRADATION | 52 |
| 4 | CONCLUSION | 53 |
| 5 | REFERENCES | 55 |

1 INTRODUCTION

Le présent document s'inscrit dans le cadre d'un projet « Termes Sources de Références » pour les REP 1300MWe (MPLT1.6.6). Il s'agit donc d'un document intermédiaire permettant d'atteindre à terme les objectifs de ce projet, à savoir mener des calculs Terme Source avec ASTEC tous modules.

Pour la présente étude, un accident de perte de réfrigérant primaire, initié par une grosse brèche (12 pouces) en branche chaude du circuit primaire, sur un REP de type P'4 (BELLEVILLE 1-2, CATTENOM 1-2-3-4, GOLFECH 1-2, NOGENT 1-2, PENLY 1-2) est simulé. Les systèmes de secours d'appoint en eau du circuit primaire sont supposés indisponibles à la sollicitation tout comme le système d'aspersion de l'enceinte interne. Du fait de l'hypothèse d'une brèche du circuit primaire en branche chaude, la condensation et le dépôt des radioéléments émis du combustible à l'état gazeux dans le circuit primaire, sont potentiellement réduits (rétention considérée nulle dans la présente étude). Sur la base de cette séquence accidentelle, un premier calcul simplifié est réalisé avec une discrétisation très limitée du domaine de modélisation (mono-volume pour l'enceinte de confinement, absence de bâtiments auxiliaires) et une hypothèse de fusion totale et rapide du cœur. Ce premier calcul fait office de prototype numérique. Un calcul détaillé est réalisé par la suite, où le domaine de modélisation est cette fois-ci discrétisé en 22 zones pour le réacteur avec ses bâtiments auxiliaires, et pour lequel il n'est pas fait d'hypothèse sur la dégradation du cœur et son taux de fusion à l'arrêt de la simulation. Les résultats de ce calcul détaillé sont présentés et commentés, ainsi que les perspectives d'optimisation du calcul.

2 PRESENTATION D'ASTEC, METHODOLOGIES ET CALCUL TERME SOURCE SIMPLIFIE

2.1 ASTEC ET SES MODULES

Une vue synoptique du code ASTEC avec une description fonctionnelle de chaque module est présentée en figure 1.

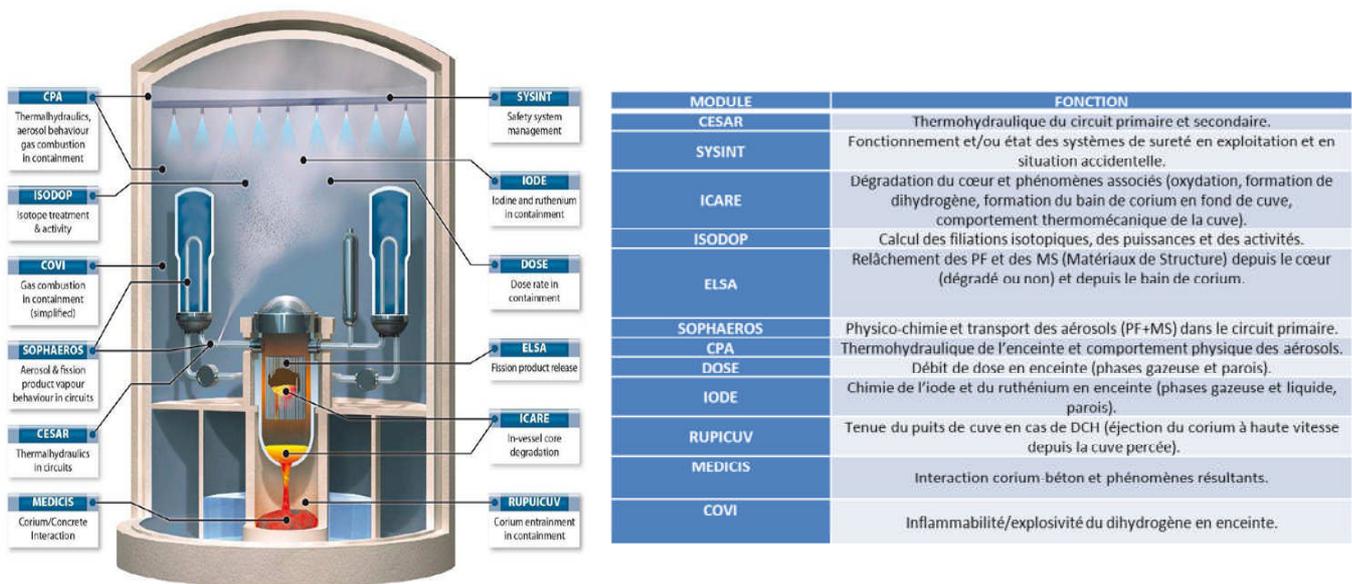


Figure 1: Fonctions des différents modules du code ASTEC

L'activation des différents modules au cours de la séquence accidentelle est présentée en figure 2. Notons que les modules actifs lors de la dégradation du combustible sont stoppés par défaut à l'instant de rupture cuve (* en figure 2). Ce critère d'arrêt peut porter à conséquence sur le taux final de fusion de cœur et sur le relâchement final des radioéléments depuis le cœur. On cherchera ainsi à pousser les modules actifs en dégradation le plus loin possible dans le temps au-delà de l'instant de rupture cuve, jusqu'à divergence du calcul. Ceci imposera de mener en premier lieu un calcul de dégradation avec les seuls modules SYSINT/CESAR/ICARE/ELSA/ISODOP/CPA, puis de reprendre le calcul avec les modules 'enceinte' CPA/IODE/ISODOP/DOSE/MEDICIS.

Notons également que, comme évoqué en introduction, la rétention de radioéléments dans le circuit primaire sera considérée comme nulle. Le module SOPHAEROS ne sera donc pas activé.

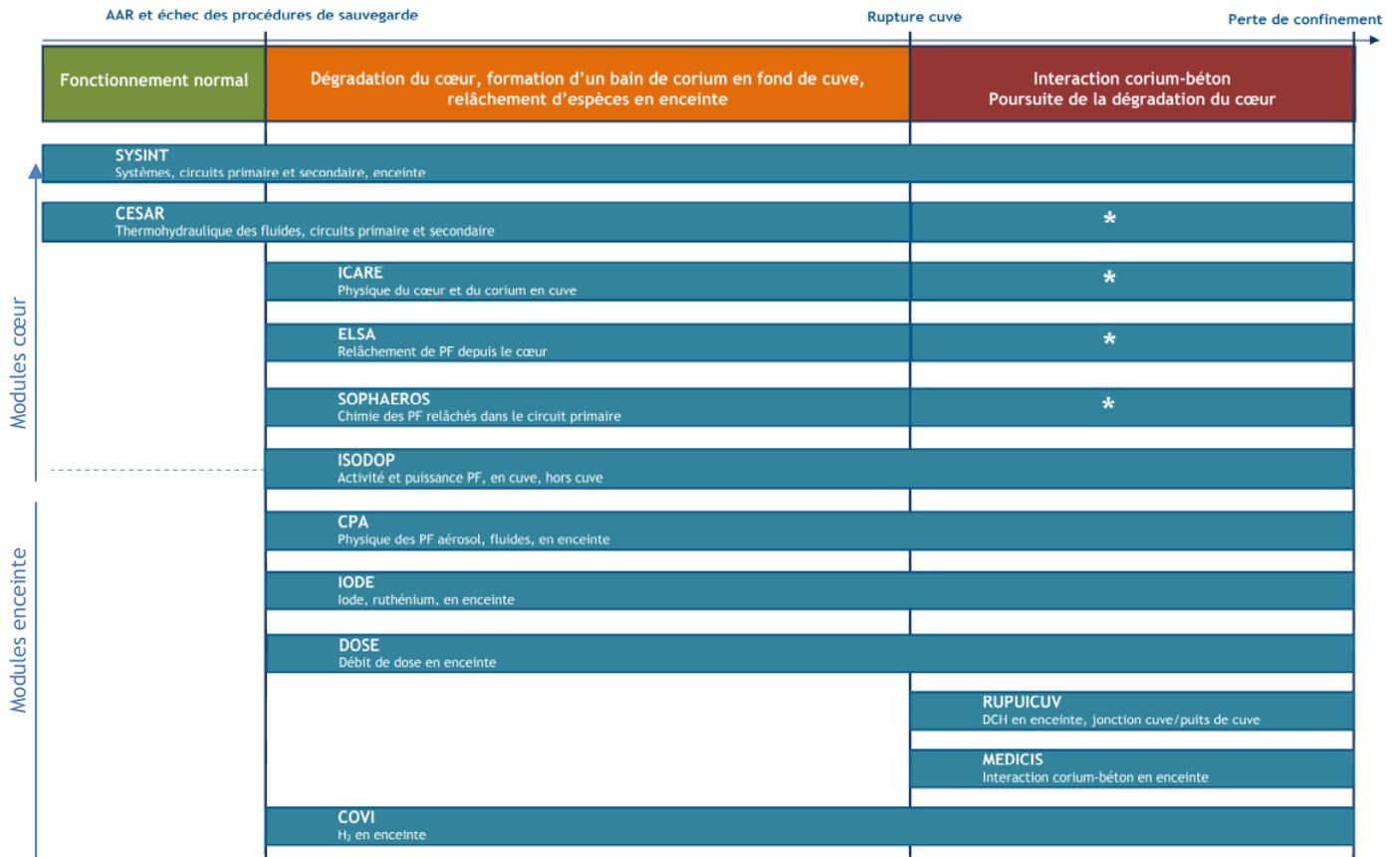


Figure 2: Activation des modules d'ASTEC lors d'un transitoire accidentel (*modules stoppés par défaut à l'instant de rupture cuve)

Comme le montrent les figures 1 et 2, les différents modules du code ASTEC échangent des variables de natures très différentes (énergétiques, thermohydrauliques, physico-chimiques, ...). Le tableau 1 ci-dessous explicite, sommairement, ces échanges de variables.

Phénoménologie et rejets dans l'environnement (calculs ASTEC V2)

| Modules | Grandeurs physiques échangées | Commentaires |
|----------------------|---|---|
| CESAR/ICARE/ISODOP | Grandeurs thermohydrauliques en cuve (pression, température, débit, nature des gaz, puissance résiduelle,...) | |
| CESAR/SOPHAEROS | Grandeurs thermohydrauliques du circuit primaire pour la modélisation de la physico-chimie et du transport des PF | |
| ISODOP/DOSE | Activité et puissance radioactive associées à chaque PF dans l'enceinte, pour le calcul du débit de dose | |
| ISODOP/CPA/IODE/DOSE | Quantités et spéciation chimique de l'iode et du ruthénium en enceinte, et grandeurs thermohydrauliques | Pas de rétroaction d'ISODOP vers CPA pour les masses variant par filiation Pas de rétroaction d'IODE vers CPA des espèces d'iodes en phase gaz (effet potentiellement important en terme de puissance restituée à la phase gaz, donc sur le réalisme du transitoire de pression en enceinte) |
| ISODOP/SOPHAEROS | En fonction du débit d'entrée des PF (cœur-circuit primaire) et de sortie (circuit primaire-enceinte), ISODOP permet de calculer l'activité dans le circuit primaire. | Pas de rétroaction d'ISODOP vers SOPHAEROS pour les masses variant par filiation |
| ICARE/SOPHAEROS | ELSA/ICARE fournit les cinétiques de relâchement des PF et MS (du combustible vers le circuit primaire) à SOPHAEROS, nécessaires à la modélisation de la physico-chimie et du transport des PF dans le circuit primaire, en phase gaz et condensée. | |
| SOPHAEROS/CPA | En fonction des données thermohydrauliques (calculées par CESAR) du circuit primaire, SOPHAEROS permet de modéliser le transport et la chimie des PF sous forme d'espèces (thermochimie à l'équilibre en phase vapeur) dans le circuit primaire. | 700 espèces chimiques sont considérées dans le module SOPHAEROS, devant être reclassées dans CPA (perte d'information en ligne). |
| MEDICIS/ISODOP | Puissance corium | Pas de rétroaction d'ISODOP vers MEDICIS pour les masses variant par filiation |

Tableau 1 : Nature des couplages entre les différents modules du code ASTEC

2.2 MÉTHODOLOGIE

Une première évaluation des Termes Sources a été réalisée en 2011 [2] par SAG/LETR, démontrant la faisabilité de ce type de calcul avec le code ASTEC, tous modules activés, au travers de 7 séquences accidentelles, de type APRP, H2 et H3 (tableau 2).

Pour ce type de calcul tous modules, il est nécessaire d'effectuer en premier lieu un calcul de dégradation, jusqu'à rupture cuve, avec les modules dédiés, puis de reprendre les résultats donnés par cette première étape, dans un calcul enceinte, avec les modules dédiés au calcul de la phase hors de l'accident.

Des développements ont été apportés par SAG/LETR pour optimiser la récupération de ces données entre les deux calculs (utilisation du module READBASE et RCSMESH), permettant de réduire significativement le temps de calcul, sans regard particulier sur la partialité des informations échangées entre certains modules évoqués au tableau 1 (MEDICIS/ISODOP, IODE/CPA). Par nature la méthode employée pour ces calculs ne permet pas de découpler le calcul enceinte du calcul de dégradation, donc d'imposer certaines hypothèses issues de la R&D, en particulier la fraction initiale d'iode gazeux en enceinte issue de l'essai PHEBUS FPT3 (problème résolu à ce jour -octobre 2012). Cette méthode est très efficace pour conduire des calculs de propagation d'incertitudes sur la base d'un scénario de dégradation donné, étant peu consommatrice de temps de calcul (5 à 8 heures de temps CPU pour les calculs enceinte).

Pour la présente étude, en l'absence d'analyse préalable sur les conséquences potentielles de la partialité de couplages entre certains modules, et dans le but d'imposer essentiellement une fraction d'iode gazeux de 25% à la brèche et de poursuivre le calcul de dégradation du cœur au-delà du temps de rupture cuve, la méthodologie suivie est différente. Les différences entre les deux méthodes sont présentées au tableau 2. Notons qu'ici, la méthodologie conduit à un temps CPU de l'ordre de 2 jours pour le calcul enceinte.

La version ASTEC utilisée pour l'ensemble des calculs présentés dans ce document est v201p2 β (mars 2011) pour le calcul de dégradation et la v202p1 (mars 2012) pour le calcul enceinte. Notons que la version la plus à jour (v202p2 d'août 2012) permet d'imposer au module SOPHAEROS la fraction d'iode gazeux à la brèche.

Le calcul de la séquence APRP 12' en branche chaude, avec défaillance totale de l'IS et de l'EAS a été choisi puisque ce scénario :

- autorise la non utilisation de SOPHAEROS (absence de calcul de rétention dans le primaire) conformément à une hypothèse de rétention nulle par le primaire des produits de fission émis depuis le cœur pour une brèche en branche chaude ;
- maximise la puissance corium sur l'ensemble des séquences accidentelles envisageables (dégradation très rapide du cœur -absence d'IS) ;
- maximise le transitoire de pression enceinte du fait de l'absence d'IS et d'EAS, conduisant les phases liquides accumulées en enceinte rapidement à la saturation, ce qui maximise par ailleurs la production d'iode gazeux depuis ces phases liquides ;
- minimise la cinétique de déposition des aérosols dans l'enceinte (pas d'EAS) ;

Phénoménologie et rejets dans l'environnement (calculs ASTEC V2)

| | Méthodologie [1] | Présente méthodologie |
|--|--|--|
| Version | ASTEC v2 -2011 | ASTEC v2 -2012 |
| Séquences analysées | <p>APRP 12' branche froide, défaillance totale EAS, défaillance IS à la recirculation</p> <p>APRP 6' branche froide, défaillance IS et EAS à la recirculation</p> <p>APRP 2' branche froide, défaillance totale IS et EAS</p> <p>H2, défaillance totale IS, défaillance EAS à la recirculation</p> <p>H2, défaillance IS Basse Pression à la sollicitation, défaillance totale IS à la recirculation, défaillance EAS à la recirculation</p> <p>H2, défaillance IS à la recirculation, défaillance EAS à la recirculation</p> <p>H3, défaillance totale IS et EAS</p> | <p>APRP 12' branche chaude, défaillance totale IS et EAS</p> |
| Méthode générale | <p>1 Calcul dégradation (arrêt à rupture cuve)</p> <p>2 Calcul enceinte couplé numériquement (module READBASE pour la lecture des données du calcul de dégradation)</p> | <p>1 Calcul de dégradation (poursuivi jusqu'à divergence)</p> <p>2 Calcul enceinte relancé manuellement pour la prise en compte d'hypothèses R&D et des coulées de corium au-delà de la rupture cuve</p> |
| Calcul de dégradation jusqu'à rupture cuve | MODULES: SYSINT/CESAR/ICARE/ELSA/ISODOP/CPA | MODULES: SYSINT/CESAR/ICARE/ELSA/ISODOP/CPA |
| Considération de la dégradation après rupture cuve | Fraction arbitraire affectant le combustible restant en cœur (connecti VESPOUR) | Calculée par SYSINT/CESAR/ICARE/ELSA/ISODOP/CPA jusqu'à divergence du calcul |
| Détermination de la puissance corium | Lecture partielle par MEDICIS de la puissance réelle calculée par ISODOP | Puissance réelle calculée par ISODOP fournie à MEDICIS par l'utilisateur (nécessite donc une reprise manuelle du calcul enceinte) |
| Calcul Enceinte | MODULES: SOPHAEROS/CPA/MEDICIS/IODE/ISODOP/DOSE | MODULES: CPA/MEDICIS/IODE/ISODOP/DOSE Le module SOPHAEROS n'est pas activé (hypothèse de rétention nulle dans le circuit primaire) |
| Module de restitution du Terme Source | ISODOP (Terme Source filiations comprises) | ISODOP (Terme Source filiations comprises) CPA (Terme Source sans filiations) |

Tableau 2 : Différences entre les méthodologies actuelles pour les calculs ASTEC Terme Source tous modules

2.3 CALCUL SIMPLIFIÉ

2.3.1 MÉTHODE ET HYPOTHÈSES

Pour ce premier calcul, faisant office de prototype numérique au calcul détaillé, on effectue un calcul enceinte avec les modules CPA/ISODOP/IODE/DOSE/MEDICIS uniquement, en postulant les résultats de la dégradation selon les hypothèses suivantes :

- 1 29 produits de fissions et trois matériaux de structure sont considérés (tableau 3). Ils sont injectés dans l'enceinte de confinement suivant une cinétique linéaire jusqu'au temps de rupture cuve, décrété à 5000 s après l'AAR (le résultat du calcul de dégradation, pour le calcul détaillé, donne un temps de rupture à 6130 s -cf § 3.3.1-). La masse des produits de fission relâchés dans l'enceinte correspond à un relâchement maximal du combustible avec une rétention minimale en cuve (tableau 3). Une seule classe d'aérosol a été prise en compte pour l'ensemble des produits de fission, d'un diamètre moyen de 0,5 µm et un écart géométrique de 1,7 µm ;
- 2 une injection linéaire d'iode à la brèche, dont 25 % est sous forme gazeuse (I₂) et 75 % sous forme d'aérosol [3] ; on considère par ailleurs que le brome a un comportement identique à l'iode ;
- 3 les produits de fission et le combustible restant dans le cœur sont injectés dans le puits de cuve à l'instant de rupture cuve (TRUP) et engagés dans l'interaction corium-béton. Le taux de fusion du cœur est donc de 100% (tableau 4). L'évolution de la puissance résiduelle du corium est calculée en temps réel par le module ISODOP. L'option « corium stratifié » est choisie dans MEDICIS ;
- 4 le radier, en béton siliceux, d'épaisseur initiale 3,5 m, est considéré rompu pour une épaisseur résiduelle de 0,5 m ;
- 5 une quantité initiale d'eau dans les puisards (300 m³) est ajoutée et correspond au volume du circuit primaire. Un pH=5 est considéré dans les puisards (absence d'EAS) ;
- 6 la procédure d'éventage U5 de l'enceinte n'est pas considérée ;
- 7 deux chemins de transport des radioéléments vers l'environnement sont considérés : le chemin *enceinte_interne* → *espace_entre_enceintes* → *environnement* pour lequel le taux de fuite de l'enceinte est calculé par CPA (avec l'hypothèse non réaliste d'une brèche de 1 m² dans les enceintes interne et externe) ; la ventilation/filtration dans l'espace entre enceintes est en service (cf tableau 5). Le chemin *enceinte_interne* → *terrain* → *environnement* correspond au cas de percée du radier, chemin pour lequel l'atmosphère de l'enceinte est évacuée instantanément à la percée du radier, avec les coefficients de filtration par le sol donnés au tableau 5.
- 8 l'inventaire initial en produit de fission correspond à 117883 kg d'UO₂, enrichi à 4% et avec un taux de combustion de 32 GWj/t.

Phénoménologie et rejets dans l'environnement (calculs ASTEC V2)

| | Inventaire initial du cœur (kg) | Taux de relâchement dans l'enceinte | Masse relâchée dans l'enceinte (kg) | Inventaire PF dans le corium à TRUP (kg) |
|----------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Ag | 6,82 | 83% | 5,66 | 1,16 |
| Am | 12,37 | 0,40% | 0,05 | 12,32 |
| Ba | 145,62 | 54% | 78,63 | 66,98 |
| Br | 2,13 | 100% | 2,13 | 0,00 |
| Ce | 282,11 | 2,16% | 6,09 | 276,02 |
| Cm | 4,67 | 0,40% | 0,02 | 4,65 |
| Cs | 286,85 | 90,27% | 258,94 | 27,91 |
| Eu | 16,61 | 15,12% | 2,51 | 14,10 |
| I | 22,03 | 100% | 22,03 | 0,00 |
| Kr | 33,15 | 100% | 33,15 | 0,00 |
| La | 124,35 | 7,28% | 9,05 | 115,30 |
| Mo | 330,32 | 79,32% | 262,01 | 68,31 |
| Nb | 4,55 | 4,32% | 0,20 | 4,35 |
| Nd | 373,03 | 0,73% | 2,72 | 370,31 |
| Np | 52,98 | 2,60% | 1,38 | 51,60 |
| Pr | 110,53 | 2,16% | 2,39 | 108,14 |
| Pu | 953,10 | 0,40% | 3,81 | 949,28 |
| Rb | 29,56 | 90,50% | 26,75 | 2,81 |
| Rh | 41,82 | 21,60% | 9,03 | 32,79 |
| Ru | 242,69 | 18,40% | 44,65 | 198,03 |
| Sb | 2,54 | 73,60% | 1,87 | 0,67 |
| Se | 6,48 | 71,50% | 4,63 | 1,85 |
| Sr | 94,43 | 34,30% | 32,39 | 62,04 |
| Tc | 80,69 | 88% | 71,00 | 9,68 |
| Te | 48,49 | 71,50% | 34,67 | 13,82 |
| U | 100709,78 | 4% | 4028,39 | Tableau 3 |
| Xe | 530,53 | 100% | 530,53 | 0,00 |
| Y | 19,20 | 0,78% | 0,38 | 18,81 |
| Zr | 367,06 | 0,73% | 2,68 | 364,38 |
| Ag (mat. stru) | 630,00 | 100% | 630,00 | 0,00 |
| Cd (mat. stru) | 118,00 | 100% | 118,00 | 0,00 |
| In (mat. stru) | 39,00 | 100% | 39,00 | 0,00 |

Tableau 3 : Quantité de produits de fission et noyaux lourds émis en enceinte et dans le corium à l'instant de rupture de la cuve pour le calcul simplifié [5]

| | Quantité (kg) |
|------------------|---------------|
| UO ₂ | 117900 |
| Zr | 5600 |
| ZrO ₂ | 30100 |
| Fe | 69500 |
| Cr | 11200 |
| Ni | 6700 |

Tableau 4 : Composition du corium à l'instant de rupture de la cuve hors produits de fission

| | Coefficients de filtration (EDE) | Coefficients de filtration (Terrain) |
|-------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Aérosols | 1000 | 1000 |
| I ₂ | 100 | 1 |
| IO _x | 500 | 500 |
| CH ₃ I | 10 | 1 |
| Gaz rares | 1 | 1 |

Tableau 5 : Coefficients de filtration dans l'espace entre enceintes (fuites de l'enceinte) et dans le sol (percée du radier) pour les diverses espèces vectrices des radioéléments

2.3.2 DOMAINE DE CALCUL ET ARCHITECTURE DE LA MISE EN DONNEES

Le domaine de calcul, très simplifié, est présenté en figure 3. Une seule zone est considérée pour l'enceinte de confinement, et les bâtiments auxiliaires ne sont pas considérés.

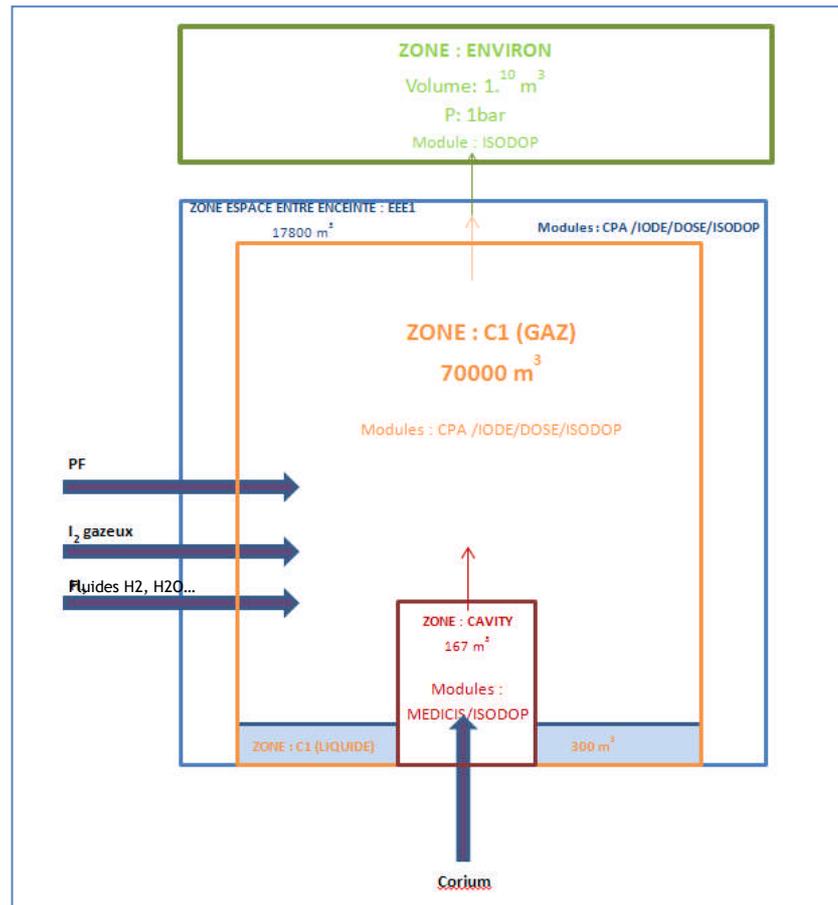


Figure 3 : Domaine de calcul simplifié CPA/MEDICIS/ISODOP/IODE/DOSE

L'architecture de la mise en données pour ce calcul simplifié est détaillée tableau 6 ci-dessous (45 fichiers *.dat).

| N1 | N2 | N3 |
|-------------|--------------------------------|--|
| generic.dat | call sources.dat | call fluides.dat (fluides entrant en enceinte) |
| | | call PFI.dat x29 (cinétiques d'émission des produits de fissions et noyaux lourds en enceinte) |
| | | call SMI.dat x3 (cinétiques d'émission des matériaux de structure en enceinte) |
| | | call I2.dat (cinétique d'émission de l'iode gazeux à la brèche) |
| | call ouverture_U5.dat | |
| | call gestion_debit_EDE_air.dat | |
| | call percee_radiale_pdc.dat | |
| | call PercRadICB.dat | |
| | call cavity.dat | call mdb.dat |
| | call fpheat.dat | |
| | call containm.dat | |
| | call systems.dat | |

Tableau 6 : Architecture de la mise en données pour le calcul simplifié CPA/MEDICIS/ISODOP/IODE/DOSE

2.3.3 RESULTATS DU CALCUL SIMPLIFIE

Comme évoqué précédemment, les résultats de ce calcul, en termes de phénoménologie, ne présentent que peu d'intérêt. On n'évoque ainsi que les résultats principaux. Notons ici que le temps CPU de ce calcul est de 2 heures pour 14 heures de temps physique.

- Perte de confinement

La perte de confinement intervient à 50000 s par percée du radier (l'ICB démarre à 5000 s) (figure 4).

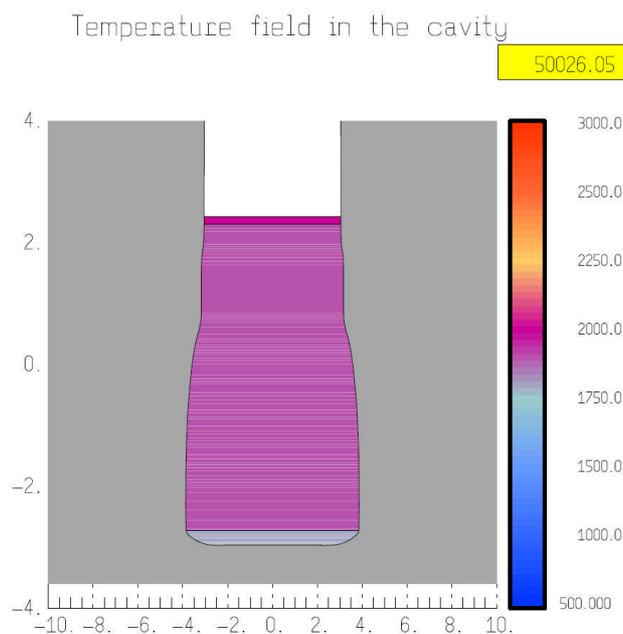


Figure 4 : Champ de température du corium et érosion du puits de cuve à l'instant de perte de confinement par percée du radier (50000 s)

- Masses d'aérosols dans l'enceinte et cinétique de déposition

Un peu plus de 4500 kg d'aérosols sont émis dans l'enceinte (dont 4000 kg d'aérosols d'uranium) durant les 5000 premières secondes du calcul. La figure 5 montre que la quasi-totalité des aérosols est déposée dans un délai de 6 heures.

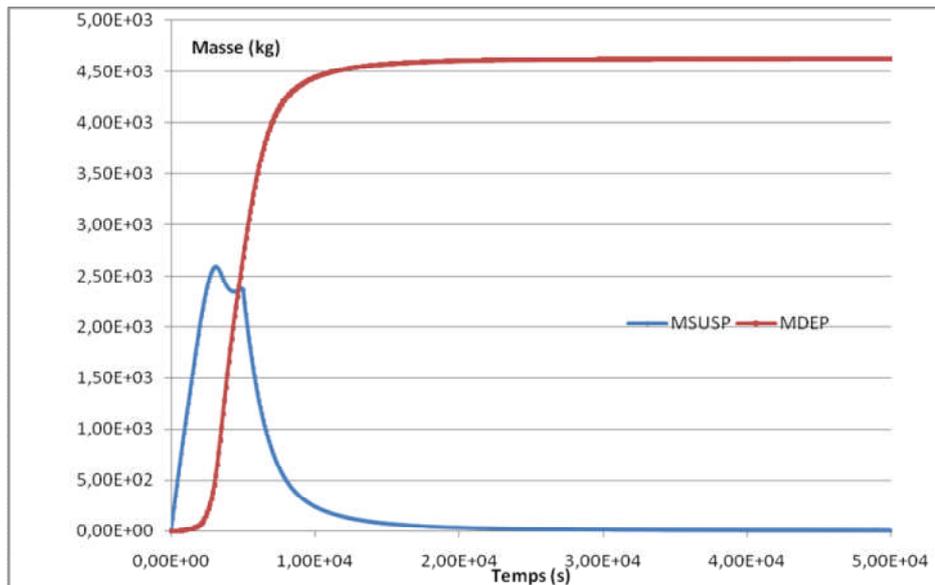


Figure 5 : Masses d'aérosols en suspension dans l'enceinte interne et cinétique de déposition associée

- Masses et activités émises dans l'environnement (Terme Source)

La figure 6 montre l'évolution des masses et activités émises dans l'environnement. Le tableau 7 récapitule ces valeurs pour chaque produit de fission. Les plus gros contributeurs à l'activité totale émise y sont mis en évidence, à savoir Xe = 82 %, Kr = 16 %, et I = 2 %.

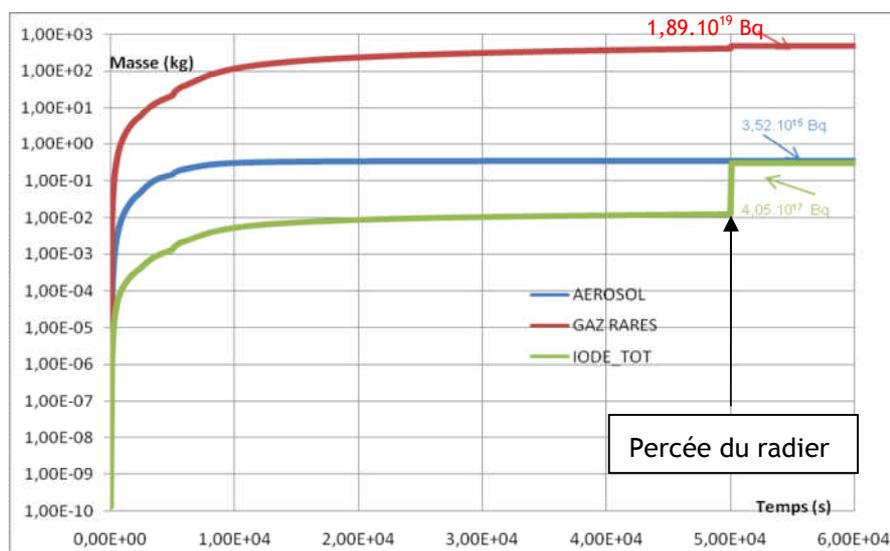


Figure 6 : Cinétique des rejets dans l'environnement

Phénoménologie et rejets dans l'environnement (calculs ASTEC V2)

| Eléments | Masse totale rejetée dans l'environnement (kg) | ACTIVITE (Bq) | Fraction massique de l'inventaire cœur à l'AAR |
|----------|--|---------------|--|
| I | 3,03E-01 | 4,05E+17 | 1,38E-02 |
| Ag | 4,16E-04 | 2,17E+13 | 6,10E-05 |
| Am | 3,60E-06 | 7,37E+10 | 2,91E-07 |
| Ba | 5,77E-03 | 4,64E+14 | 3,97E-05 |
| Br | 1,56E-04 | 3,62E+13 | 7,34E-05 |
| Ce | 4,47E-04 | 2,70E+13 | 1,59E-06 |
| Cm | 1,32E-06 | 4,46E+10 | 2,83E-07 |
| Cs | 1,90E-02 | 2,24E+14 | 6,63E-05 |
| Eu | 1,84E-04 | 9,42E+12 | 1,11E-05 |
| Kr | 2,78E+01 | 3,10E+18 | 8,39E-01 |
| La | 6,65E-04 | 1,06E+14 | 5,34E-06 |
| Mn | 1,92E-02 | 4,23E+14 | 5,83E-05 |
| Nb | 1,40E-05 | 3,66E+13 | 3,07E-06 |
| Nd | 2,00E-04 | 1,83E+12 | 5,35E-07 |
| Np | 1,01E-04 | 1,45E+14 | 1,91E-06 |
| Pr | 1,75E-04 | 1,61E+12 | 1,59E-06 |
| Pu | 2,80E-04 | 1,37E+11 | 2,94E-07 |
| Rb | 1,96E-03 | 1,59E+14 | 6,65E-05 |
| Rh | 6,63E-04 | 1,80E+14 | 1,59E-05 |
| Ru | 3,28E-03 | 1,51E+14 | 1,35E-05 |
| Sb | 1,37E-04 | 8,96E+13 | 5,40E-05 |
| Se | 3,40E-04 | 2,04E+12 | 5,25E-05 |
| Sr | 2,38E-03 | 2,97E+14 | 2,52E-05 |
| Tc | 5,21E-03 | 4,55E+14 | 6,46E-05 |
| Te | 2,55E-03 | 6,35E+14 | 5,25E-05 |
| U | 2,96E-01 | 1,91E+13 | 2,94E-06 |
| Xe | 4,45E+02 | 1,58E+19 | 8,38E-01 |
| Y | 2,82E-05 | 3,00E+13 | 5,73E-07 |
| Zr | 1,97E-04 | 6,80E+12 | 5,36E-07 |
| TOT | 4,73E+02 | 1,93E+19 | - |

Tableau 7 : Masses et activités rejetées dans l'environnement suite à la perte de confinement

Notons que même si la fuite du confinement est très importante dans ce calcul (section fixée à 1 m²), les Termes Sources semblent peu élevés pour les aérosols (par exemple une fraction d'inventaire cœur de 10⁻⁵ rejeté à l'environnement en césium est typique du Terme Source S3 [1]). Ceci s'explique par une très faible surpression de l'enceinte interne (figure 6bis) au cours de l'accident (différence de pression avec l'environnement entre +0.5mbar et +1.5mbar). La validité de ce résultat nécessite d'être confirmée. Cela fera l'objet d'une étude détaillée dans le cadre de l'étude des situations avec l'enceinte ouverte au début de l'accident (situation TAM -Tampon d'Accès Matériel- ouvert).

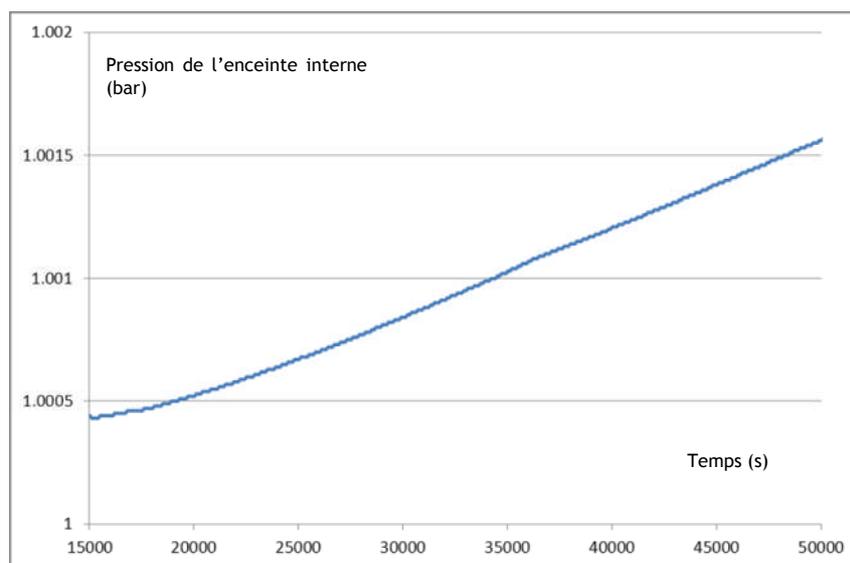


Figure 6bis : Pression de l'enceinte interne pour le calcul simplifié

3 CALCUL DETAILLE

3.1 MÉTHODE ET HYPOTHÈSES

On réalise maintenant un calcul ASTEC tous modules, sur une séquence grosse brèche 12 pouces en branche chaude avec indisponibilité totale de l'IS et de l'EAS, où les résultats de la dégradation obtenus par les modules SYSINT/CESAR/ICARE/ELSA/ISODOP sont couplés aux modules enceinte CPA/IODE/DOSE/ISODOP/MEDICIS. Plus aucune hypothèse n'est donc appliquée sur les résultats de la dégradation, notamment le taux final de fusion de cœur. Le calcul de dégradation est poussé jusqu'à divergence des modules (sortie des tables de l'eau), le plus loin possible au-delà du temps de rupture cuve. La seule hypothèse subsistante est le maintien d'une fraction d'iode gazeux sous forme I₂ émise à la brèche correspondant à 25% de l'inventaire en iode total émis dans l'enceinte interne. Comme précédemment, et pour les raisons évoquées en introduction, la rétention dans le circuit primaire des radioéléments et des matériaux de structure issus du cœur n'est pas considérée. Par conséquent, le module SOPHAEROS n'est pas activé.

Le calcul de dégradation est effectué en premier lieu, les cinétiques d'émission dans l'enceinte des radioéléments, des matériaux de structure et des fluides sont ensuite reprises depuis l'AAR dans le calcul enceinte CPA/IODE/DOSE/ISODOP/MEDICIS (cf § 3.2 pour l'architecture de la mise en données).

Pour le calcul de l'interaction corium béton, une première coulée est instantanément transférée dans le puits de cuve à rupture cuve, puis les coulées secondaires sont incorporées suivant la cinétique donnée par le calcul de dégradation. Il est par ailleurs nécessaire de recourir à un calcul ISODOP en support, couplé au calcul de dégradation du cœur, afin de renseigner correctement l'évolution de puissance résiduelle du corium dans le puits de cuve au cours du temps (les modules MEDICIS et ISODOP sont couplés partiellement, les masses évoluant par filiation via ISODOP n'étant pas reprises dans MEDICIS). Par ailleurs, ne pouvant récupérer la description fine de la composition chimique du corium calculée par le module ICARE, on utilise dans MEDICIS l'option « corium homogène ». Le radier est considéré percé pour une épaisseur résiduelle de 50 cm, soit une profondeur d'ablation axiale par le corium de 3 m.

Pour ce calcul, la discrétisation de la double enceinte de confinement comporte 19 zones, et les bâtiments auxiliaires sont modélisés (une zone par bâtiment). Les hypothèses relatives à la répartition des fuites de l'enceinte interne, aux ventilations et efficacités de filtration de l'espace entre enceintes, des bâtiments auxiliaires, du filtre U5 et du sol en cas de percée du radier sont données au tableau 8. Le débit de fuite (TF) de l'enceinte interne est calculé par le module CPA, en fonction des différences de pression calculées au cours du temps selon la corrélation suivante :

$$TF = C \frac{P_{EI}^2 - P_{atm}^2}{P_{EI}} \text{ (m}^3 \cdot \text{j}^{-1}\text{) avec } C = 0,3128\% \cdot V_{EI} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1})$$

Les chemins de fuite associés sont présentés ci-après (figure 8, § 3.2).

| | | |
|--|---|---|
| Répartition des fuites | Directes | 0,8% |
| | Collectées par bâtiments auxiliaires | 9,2% |
| | Collectées par EEE (avec EDE en fonctionnement) | 90 % |
| Ventilation des bâtiments auxiliaires et taux de fuite pour les bâtiments dont la ventilation n'est pas secourue | EEE | EDE en fonctionnement Débit : 350 m ³ /h |
| | BAS | Ventilation en service Débit : 20500 m ³ /h |
| | BAN (ventilation non secourue) | Taux de fuite : 0,3 V/h |
| | BK | Ventilation en service Débit : 5000 m ³ /h |
| Efficacités de filtration | FDF | Aérosols : 1000 IOX: 500 I ₂ : 100 CH ₃ I : 10 |
| | Bâtiments auxiliaires | Aérosols : 1000 IOX: 500 I ₂ : 1000 CH ₃ I : 100 |
| | U5 | Aérosols : 1000 IOX: 500 I ₂ : 10 CH ₃ I : 1 |
| | Terrain | Aérosols : 1000 IOX: 500 I ₂ : 1 CH ₃ I : 1 |

Tableau 8 : Hypothèses relatives à la répartition des fuites de l'enceinte interne, aux ventilations et efficacités de filtration de l'espace entre-enceintes, des bâtiments auxiliaires, du filtre U5 et du sol (noté ici 'terrain')

3.2 DOMAINE DE CALCUL, ARCHITECTURE DE LA MISE EN DONNEES

Le domaine de calcul reprend la discrétisation de l'enceinte interne en 17 volumes développée dans le jeu de données CPA du JPAC (jeux de données réacteurs référencés par l'IRSN) pour un REP 1300 MWe de type P'4 [4]. Deux volumes sont ajoutés pour l'espace entre enceinte, un volume pour le BK, un pour le BAS et un pour le BAN. Le dernier volume considéré est l'environnement, soit 23 volumes au total. La figure 7 montre la position des volumes, la figure 8 montre les jonctions entre volumes et les chemins de fuite considérés.

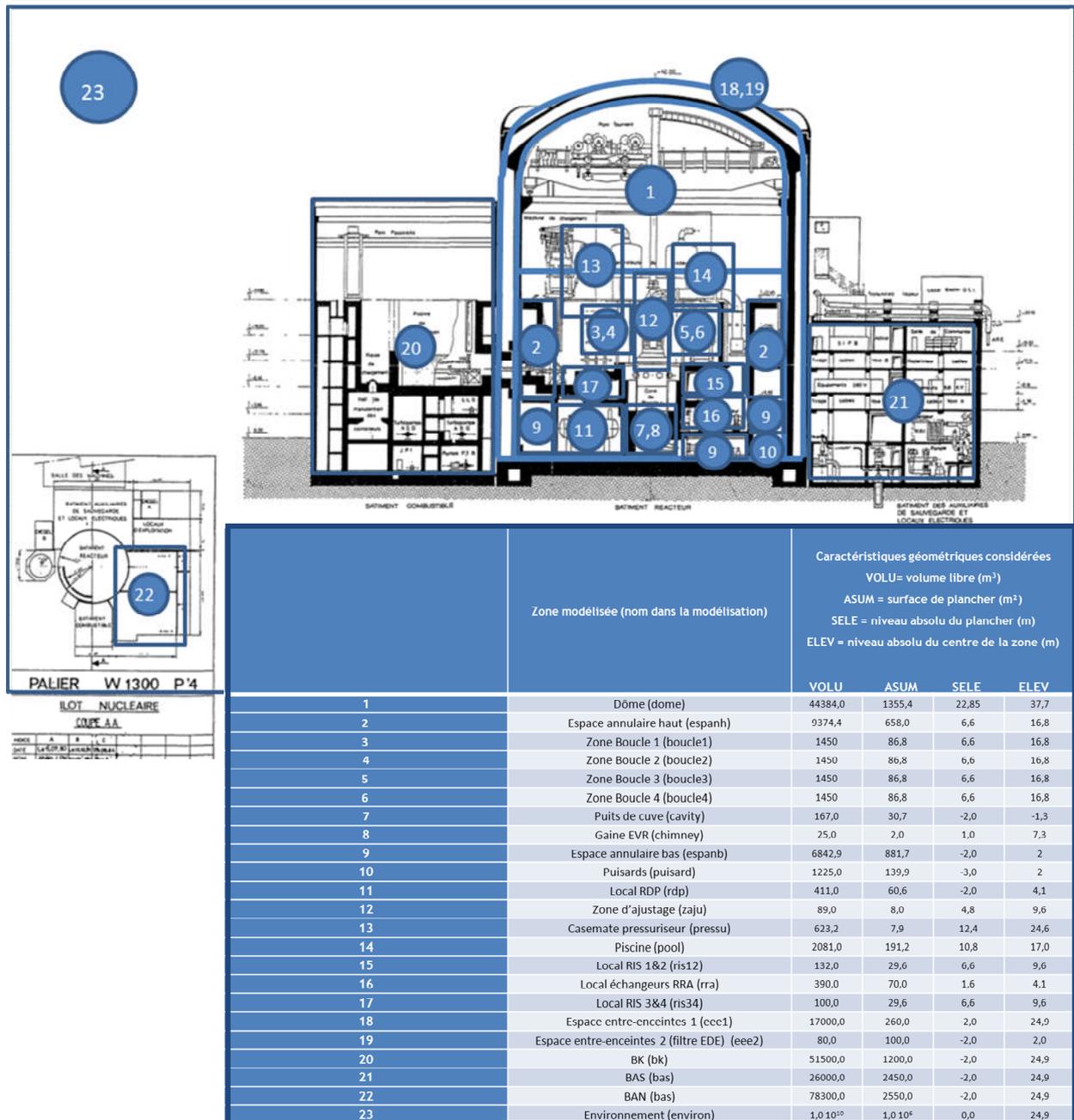


Figure 7 : Détail du domaine de modélisation

Phénoménologie et rejets dans l'environnement (calculs ASTEC V2)

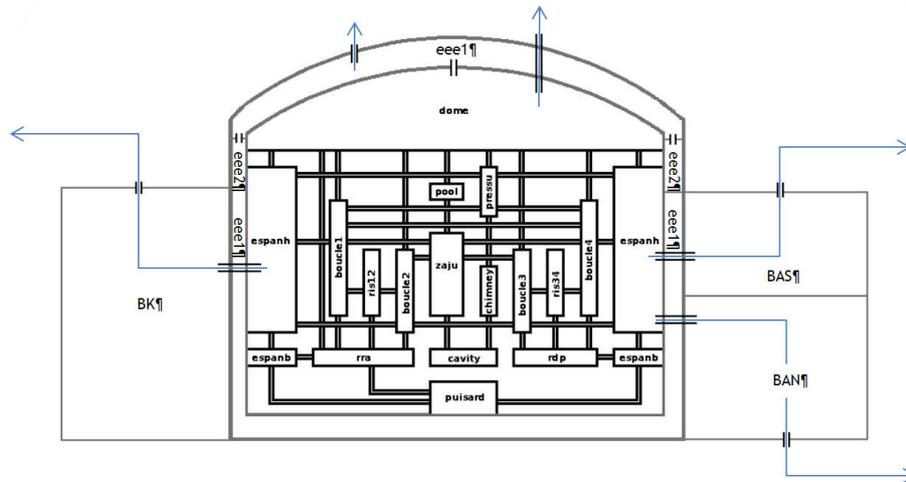


Figure 8 : Jonctions entre les différents volumes considérés dans la modélisation et mise en évidence des chemins de fuite

L'architecture de la mise en données pour le calcul de dégradation SYSINT/CESAR/ICARE/ELSA/CPA/ISODOP, appelant 204 fichiers *.dat à partir des fichiers steady.dat (régime permanent), transitoire.dat (initiateur et conduite accidentelle), et dégradation.dat, est présentée dans le tableau 9.

| N1 | N2 | N3 | N4 | N5 |
|-----------------|--|--|--|--|
| steady.dat | call generic.dat call /COMMUN/DATA/primary.dat call param.dat call /COMMUN/DATA/secondar.dat call /COMMUN/DATA/param_VD.dat call /COMMUN/DATA/vessel-MAGMA.dat call /COMMUN/DATA/powe1300.dat call /COMMUN/DATA/cavity.dat call /COMMUN/DATA/mbd.dat call /COMMUN/DATA/systems.dat call connect_steady.dat call /COMMUN/SENSOR/sensor_steady.dat call /COMMUN/DATA/containm.dat call /COMMUN/DATA/gestion_debit_EDE_air.dat call /COMMUN/AUTOM/regu_steady.dat | call /COMMUN/DATA/rra.dat call /COMMUN/DATA/pumpP4.dat call /COMMUN/DATA/pumpBETHSY.dat | | |
| transitoire.dat | call /EPS2/TRANS/trans.dat | call /EPS2/TRANS/connecti.dat call /COMMUN/AUTOM/automatisme.dat call /COMMUN/SENSOR/sensor.dat call /EPS2/TRANS/sensor_init.dat call initiateur.dat | call (/COMMUN/SENSOR/*.dat)x134 call /COMMUN/BIBLIO_EVENT/LBA.dat call /COMMUN/BIBLIO_EVENT/breche_IGMPP.dat call /COMMUN/BIBLIO_EVENT/perte_ISBP_sollicitation.dat call /COMMUN/BIBLIO_EVENT/perte_ISMP_sollicitation.dat call /COMMUN/BIBLIO_EVENT/echec_gave_ouvert.dat call /COMMUN/BIBLIO_EVENT/gv_OK_sans_REFMAX.dat call /COMMUN/BIBLIO_EVENT/gv_OK_sans_REF56.dat call /COMMUN/BIBLIO_EVENT/FH_chargeRCV.dat | |
| | | call /COMMUN/CONDUITE/conduite.dat | call /COMMUN/CONDUITE/flag.dat call /COMMUN/CONDUITE/dos.dat call /COMMUN/CONDUITE/ecp1.dat call /COMMUN/CONDUITE/ecp2.dat call /COMMUN/CONDUITE/ecp3.dat call /COMMUN/CONDUITE/ecp4.dat call /COMMUN/CONDUITE/ecs.dat | call (/COMMUN/CONDUITE/*.dat)x12 call (/COMMUN/CONDUITE/*.dat)x10 call (/COMMUN/CONDUITE/*.dat)x6 call (/COMMUN/CONDUITE/*.dat)x6 call (/COMMUN/CONDUITE/*.dat)x7 call (/COMMUN/CONDUITE/*.dat)x4 |
| | | call /COMMUN/BIBLIO_EVENT/arret_conduite_APE.dat call /EPS2/TRANS/arret_TS.dat call /EPS2/TRANS/PSEB_enceinte.dat call /COMMUN/DATA/gestion_debit_EDE_air.dat call /COMMUN/DATA/chgt_zone_REL_FP.dat | | |
| degradation.dat | call /TRANS/reprise_degradation.dat | | | |

Tableau 9 : Architecture de la mise en données pour le calcul depuis le régime permanent jusqu'à la dégradation

L'architecture de la mise en données pour le calcul enceinte est présentée en tableau 10 (46 fichiers *.dat). Comme évoqué précédemment, le fichier *presid.dat* est ajouté afin de renseigner correctement l'évolution de la puissance résiduelle du corium dans MEDICIS, ses données étant obtenues depuis un calcul ISODOP support (voir l'évolution de cette puissance au § 3.3.3).

| N1 | N2 | N3 |
|-------------|--------------------------------|--|
| generic.dat | call sources.dat | call fluides.dat (fluides entrant en enceinte) |
| | | call PFi.dat x29 (cinétiques d'émission des produits de fissions et noyaux lourds en enceinte) |
| | | call SMi.dat x3 (cinétiques d'émission des matériaux de structure en enceinte) |
| | | call I2.dat (cinétique d'émission de l'iode gazeux à la brèche) |
| | call ouverture_U5_.dat | |
| | call gestion_debit_EDE_air.dat | |
| | call percee_radiale_pdc.dat | |
| | call PercRadICB.dat | |
| | call cavity.dat | call mdb.dat |
| | | call presid.dat |
| | call fpheat.dat | |
| | call containm.dat | |
| | call systems.dat | |

Tableau 10 : Architecture de la mise en données pour le calcul détaillé CPA/MEDICIS/ISODOP/IODE/DOSE

3.3 RESULTATS DETAILLES

3.3.1 PHENOMENOLOGIE ACCIDENTELLE GLOBALE

Le tableau 13 ci-dessous présente la chronologie événementielle de la séquence accidentelle avec mise en exergue des événements importants.

| Temps (s) | Evénement |
|---------------|--|
| 0.0 | BRECHE 12 pouces en BC2 |
| 0.0 | Perte EAS à la sollicitation + perte ISBP à la sollicitation +perte ISMP à la sollicitation+ perte ASG à t=0h |
| 0.0 | Appoints autre que l'IJPP indisponibles |
| 0.1 | A: FBA indisponible + A: Borication directe déclarée indisponible+A: IS indisponible +A: ASG indisponible+H: GCTc indisponible+Demande de fermeture des purges APG |
| 3.0 | A: Isolement de l'aspersion normale pressuriseur |
| 4.3 | A: Signal d AAR sur basse pression pressu (P<131bar et P7) |
| 4.4 | A: Signal isolement TURBINE sur AU |
| 4.4 | Demande d application du DOS sur signal AAR |
| 4.5 | A: AAR Arret Automatique du reacteur |
| 4.5 | A: Signal Isolement decharge sur bas niveau pressu <16% |
| 4.5 | A: Signal d isolement des chauffelettes sur bas niveau pressu <16% |
| 4.5 | A: Isolement TURBINE |
| 4.6 | A: Isolement de la decharge RCV |
| 4.6 | A: Aspiration du systeme RCV basculée sur le PTR sur décharge isolée ou indisponible (IJPP + charge) |
| 4.6 | A: chauffelettes momentanément indisponibles sur bas niveau pressu |
| 5.4 | A: Bas Debit ARE GV2, GV3, GV4 +A: Signal ATWT bas debit ARE et DT_boucle eleve |
| 5.8 | A: Signal d IS sur tres basse pression pressu (P<121 bar sans blocage P11) |
| 6.0 | A: Mise en memoire du signal d IS +A: Signal isolement ARE sur IS |
| 11.9 | A: Bas Debit ARE GV1 |
| 13.2 | A: Isolement effectif ARE GV1, GV2, GV3, GV4 |
| 26.6 | A: Signal IV GV1 , GV2, GV3, GV4 sur haute pression enceinte MAX3 (P>1.9 Bar) |
| 26.7 | A: Isolement vapeur GV1, GV2, GV3, GV4 demandé |
| 27.8 | A: Isolement vapeur GV1, GV2, GV3, GV4 |
| 59.8 | A: Signal EAS sur Tres Haute pression enceinte MAX4 (P>2.6 Bar) |
| 140.2 | Start of RIS001, 002, 003, 004 BA accumulator discharge (s) |
| 325.9 | Accumulator RIS001, 002, 003, 004 BA is empty (s) |
| 428.7 | DOS Réacteur Orientation initiale A: Entree dans le DOS |
| 493.7 | DOS REACTEUR Page 1 Module ACTIONS PRELIMINAIRES |
| 493.7 | DOS REACTEUR Page 1 A: Demande verifications secondaires (OP-V) |
| 558.7 | DOS REACTEUR Page 1 Module ORIENTATION INITIALE |
| 583.7 | DOS VAPEUR Page 1 A: Débit du GV1 , GV2, GV3, GV4 à 20 m3/h car son niveau GE est supérieur à 15% |
| 627.4 | Début de relâchement des matériaux de structure |
| 628.7 | DOS REACTEUR Page 1 Module VERIFICATION DU DEROULEMENT DE l AAR |
| 634.0 | Début d'oxydation du coeur |
| 698.7 | DOS REACTEUR Page 2 Module VERIFICATION DU DEROULEMENT SEQUENCE IS |
| 773.7 | DOS REACTEUR Page 2 Module VERIFICATION DU DEROULEMENT SEQUENCE EAS |
| 773.7 | DOS REACTEUR Page 2 A: Demande arret GMPP1, GMPP2, GMPP3, GMPP4 |
| 773.7 | DOS REACTEUR Page 2 A: Attendre 2 minutes avant de lire l ebulliometre |
| 778.7 | A: Arret GMPP1, GMPP2, GMPP3, GMPP4 |
| 783.7 | A: Indisponibilite aspersion normale pressuriseur RCP201VP sur arret GMPP1 |
| 783.7 | A: Indisponibilite aspersion normale pressuriseur RCP202VP sur arret GMPP2 |
| 788.7 | A: Indisponibilite Aspersion normale pressuriseur |
| 835.3 | Premières ruptures de gaines et début du relâchement des radioéléments |
| 838.7 | DOS REACTEUR Page 2 A: RAZ de l IS lorsque le signal est allumé depuis 5 minutes |
| 843.7 | A: RAZ de l IS |
| 853.7 | DOS REACTEUR Page 3 Module VERIFICATION ET PRE ORIENTATION |
| 889.6 | First cladding perforation by grid (s) |
| 918.7 | DOS REACTEUR Page 3 Module CONFIGURATION GMPP ET ASPERSION NORMALE |
| 983.7 | DOS REACTEUR Page 4 A: Demande d application de la consigne ECP4 et ECS + : Demande de sortie du DOS |
| 1128.7 | DOS VAPEUR Page 1a A: Application de ECS + Sortie du DOS |
| 1298.7 | Hypothese EPS2 : arrêt de la conduite APE sur critère demande GIAG (TRIC>1100°C) |
| 1558.7 | Entree dans ECS |
| 2250.7 | First material slump in lower plenum (s) |
| 2250.7 | First slump of corium with FPs in lower plenum (s) |
| 2502.2 | Melting pool formation in the core (s) |
| 2663.7 | Dénoyage total du coeur |
| 6133.8 | RUPTURE CUVE + début ICB |
| 36535 | Arret des modules dégradation sur divergence + arret d'émission de PF +arret de coulées de corium (taux de fusion ~70%) |
| 81400 | Rupture des parois latérales du puits de cuve |
| 285310 | (3.3 jours) Ouverture U5 (sur critère P=6 bars) |
| 402620 | (4.7 jours) Percée du radier (sur critère d'ablation axiale= -3m) |
| 604800 | (7 jours) Arrêt du calcul |

Tableau 13 : Chronologie événementielle de la séquence accidentelle calculée

3.3.2 DEGRADATION, FORMATION DU CORIUM, EMISSION EN ENCEINTE

Pour cette séquence avec tous les appoints en eau totalement indisponibles (hors injection aux joints de pompes primaires et décharges des accumulateurs), la cinétique de dégradation est particulièrement rapide. Les premières gaines sont rompues à $t = 835$ s, temps de début du relâchement des radioéléments, le cœur est totalement dénoyé à $t = 2664$ s, et la rupture cuve intervient, par fusion, à $t = 6134$ s (tableau 13). Le calcul de dégradation est poursuivi au-delà de la rupture cuve, jusqu'à divergence des modules ICARE/CESAR à $t = 36535$ s. La figure 9 montre la masse totale de corium formé depuis la dégradation du cœur et sa composition, ici déclinée en termes d'espèces chimiques, solidifiées en débris (par exemple les 15 tonnes d'acier 'STEEL' représentées), et pour l'état fondu, issues de la dégradation des matériaux du cœur, les produits de fission accompagnant l' UO_2 . Le taux de fusion du cœur représenté est défini comme étant le ratio entre la masse totale d'uranium transféré dans le corium, en fond de cuve, et la masse initiale d'uranium du cœur à l'AAR. A la rupture de la cuve, les 43 % de l' UO_2 qui étaient présents dans le fond de cuve sont instantanément (dans la modélisation) transférés dans le puits de cuve. 29 % supplémentaires proviennent de la suite de la dégradation du cœur suite à la rupture de la cuve. Le taux final de fusion du cœur obtenu par le calcul est ainsi de 72 %.

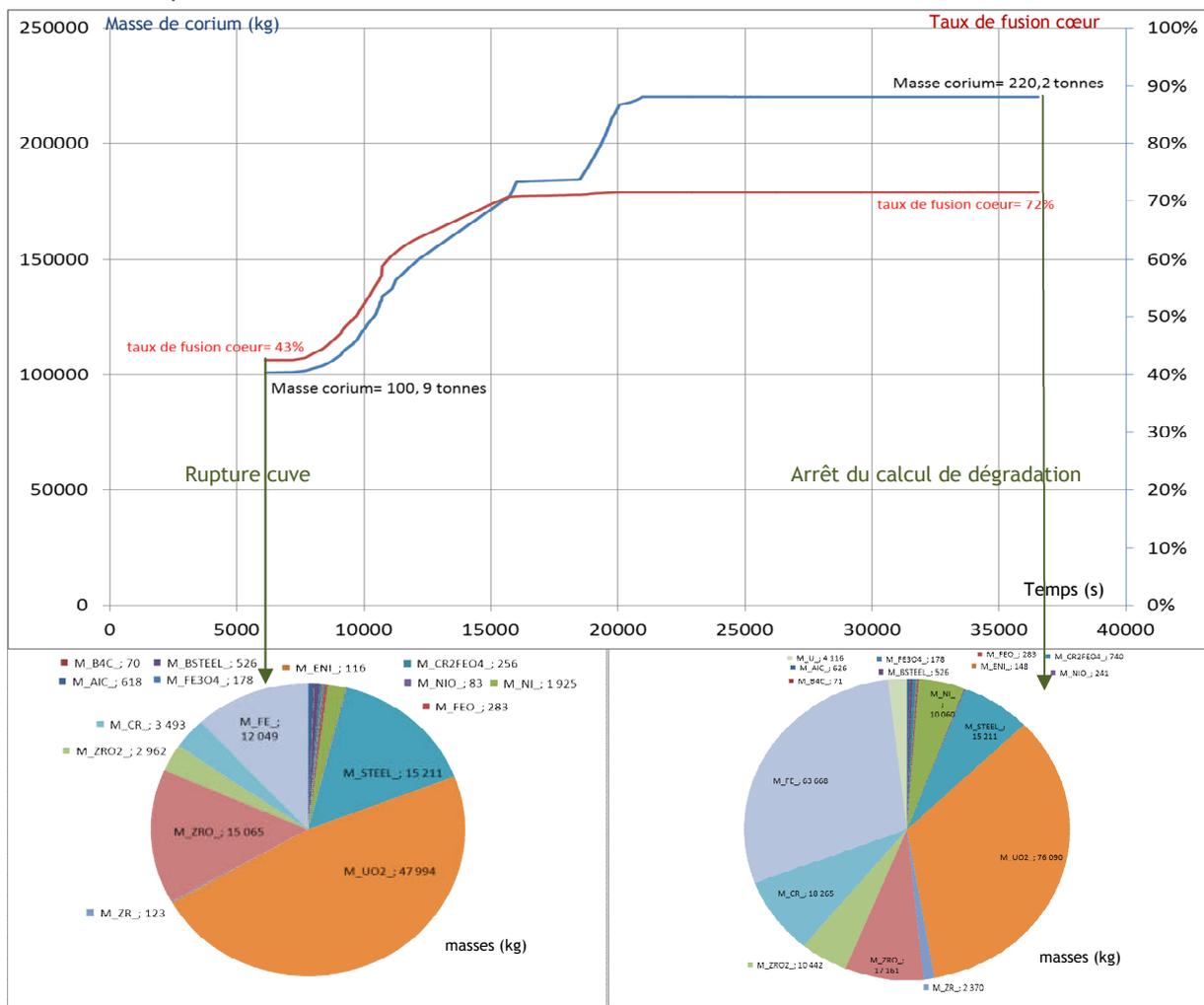


Figure 9 : Masse, composition et évolution du corium issu de la dégradation du cœur (les composants provenant du béton, incorporés au corium lors de la phase d'interaction corium béton, ne sont donc pas représentés)

La figure 10 présente les cinétiques d'émission dans l'enceinte des divers radioéléments et matériaux de structure, avec les valeurs finales émises (masses et % de l'inventaire initial -i. i.). La ligne verticale grise sur les graphiques représente l'instant de rupture cuve ($t = 6130$ s), ce qui montre l'intérêt de considérer les relâchements issus du cœur au-delà de cet instant. Les quantités de lanthanides (La, Ce, Eu), de baryum, de strontium et de ruthénium émises dans l'enceinte augmentent significativement durant ce laps de temps supplémentaire.

En fin de calcul de dégradation, la quasi-totalité des gaz rares (Xe, Kr), des halogènes (I, Br) et du césium (Cs) est émise dans l'enceinte. La masse totale d'aérosols émis (radioéléments et matériaux de structure) est de 1188 kg, dont 647 kg (54 %) de matériaux de structure et **546 kg (46 %) de produits de fission hors gaz rares.**

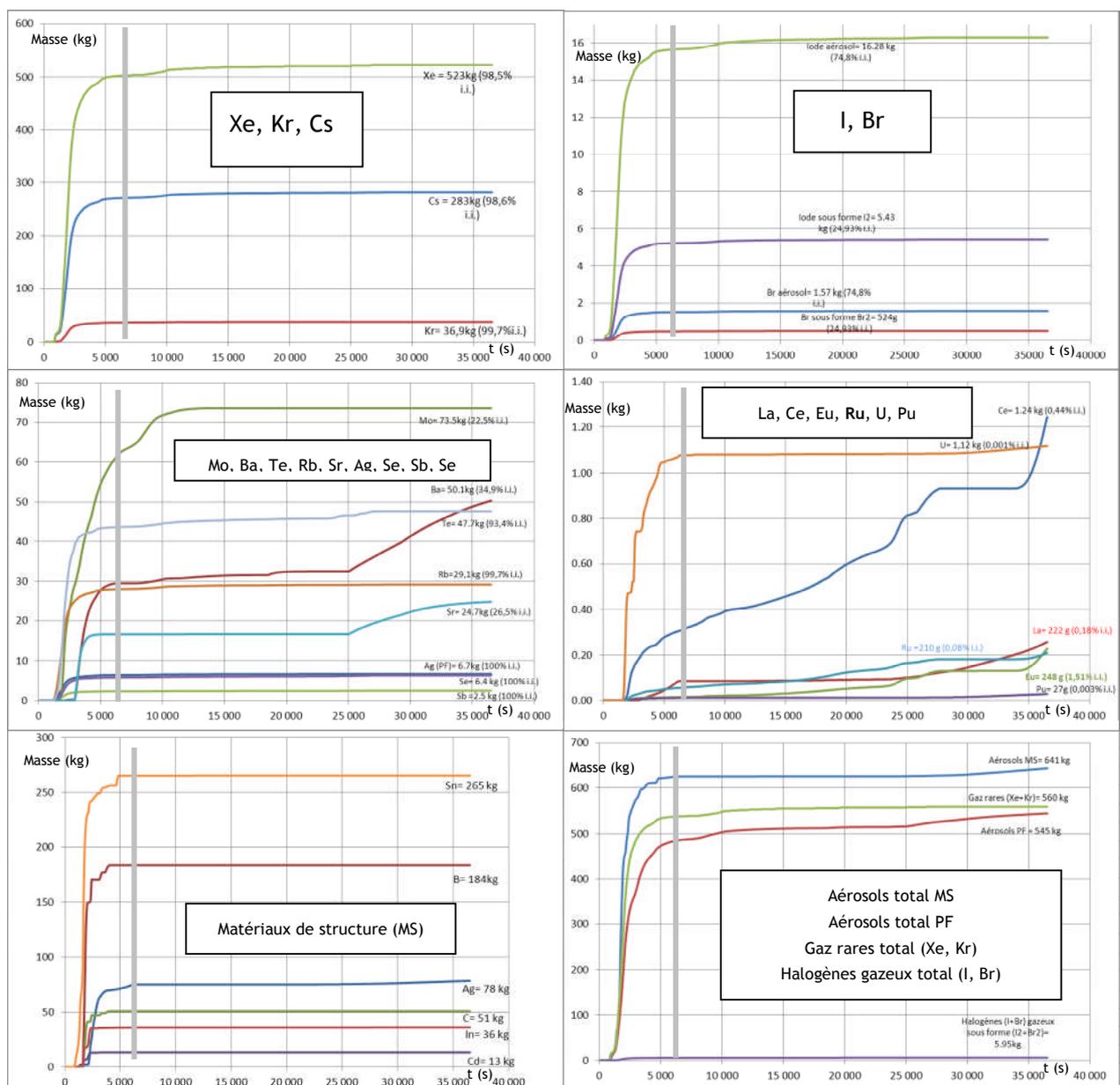


Figure 10 : Cinétiques d'émission en enceinte des divers radioéléments et matériaux de structure (seuls les éléments les plus significatifs sont représentés)

3.3.3 INTERACTION CORIUM-BETON

Outre la composition évolutive en U, Zr, O, et matériaux de structure présentée en figure 9, les radioéléments porteurs de puissance sont injectés selon la même cinétique que les coulées d'UO₂, considérant que ce qui n'est pas relâché depuis le combustible vers l'enceinte est entraîné par l'UO₂ vers le corium. L'inventaire en radioéléments dans l'UO₂ à un instant t prend en compte toute la phase de relâchement vers l'enceinte qui précède cet instant.

Cette cinétique d'incorporation des radioéléments dans le corium permet de calculer très précisément l'évolution de la puissance résiduelle du corium dans le puit de cuve au cours du temps, au moyen d'un calcul support CPA/ISODOP pour lequel les radioéléments entraînés par la délocalisation de l'UO₂ sont transportés d'un volume fictif à un autre.

On obtient ainsi l'évolution de puissance résiduelle présentée en figure 11. Notons l'intérêt de considérer les coulées secondaires et terminales de corium au-delà de la rupture cuve (la puissance corium serait sous estimée de 25% sinon).

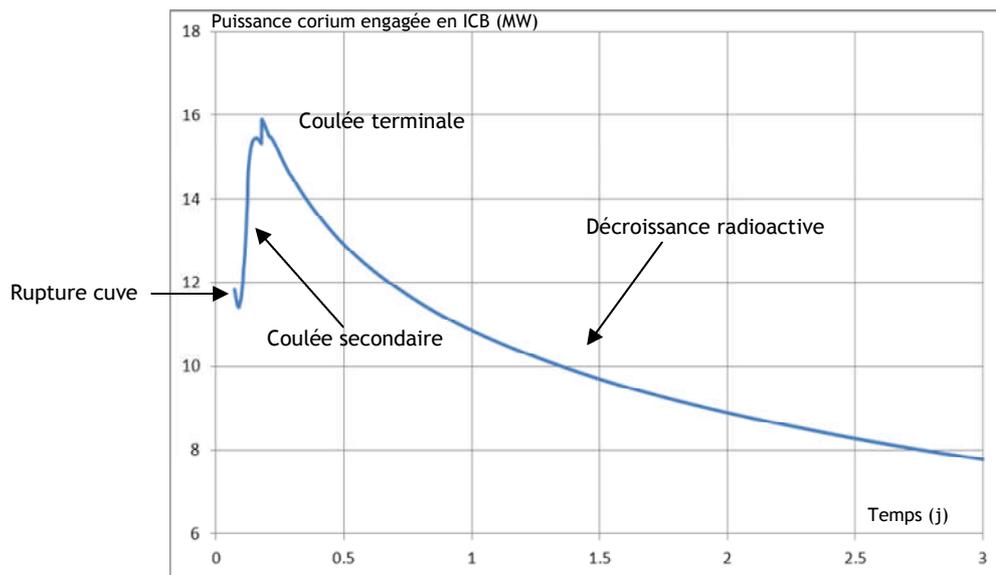


Figure 11 : Puissance résiduelle injectée pour le corium dans le puits de cuve

Notons également qu'un reclassement d'espèces chimiques composant le corium a été effectué depuis les résultats issus du calcul de dégradation. En effet, les espèces ZrO, Cr₂FeO₄, Fe₃O₄, et Fe₂O₃ calculées par le module ICARE ne peuvent être lues que si elles ont été déclarées au préalable dans la STRUCTURE MDB de MEDICIS. Afin de s'affranchir de cette étape, on a donc procédé à la décomposition molaire ci-dessous, en variables adéquates pour MEDICIS, afin d'ajuster l'inventaire issu d'ICARE :

- $ZrO = \frac{1}{2} Zr + \frac{1}{2} ZrO_2$
- $Cr_2FeO_4 = Cr_2O_3 + FeO$
- $Fe_3O_4 = 4 FeO - Fe$
- $Fe_2O_3 = 3 FeO - Fe$

En termes de résultats, la figure 12 montre une ablation radiale assez rapide qui conduit à la percée des parois latérales du puits de cuve à $t = 81400$ s. Cet événement est visible sur la thermohydraulique dans l'enceinte (§ 3.3.4). La percée du radier, sur critère d'ablation axiale de -3 mètres est atteinte à 402620 s, soit 4.7 jours.

La figure 13 montre une évolution géométrique isotrope de la cavité (imposée par les hypothèses du calcul).

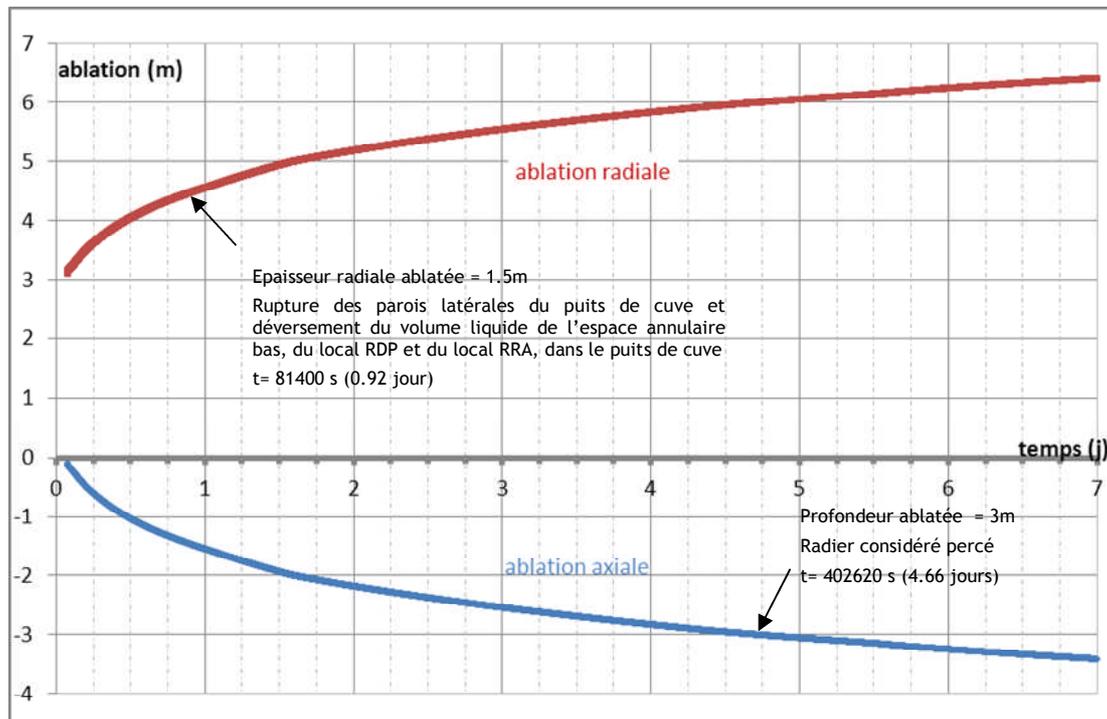


Figure 12 : Profondeurs radiales et axiales d'ablation du béton dans le puits de cuve par interaction corium-béton

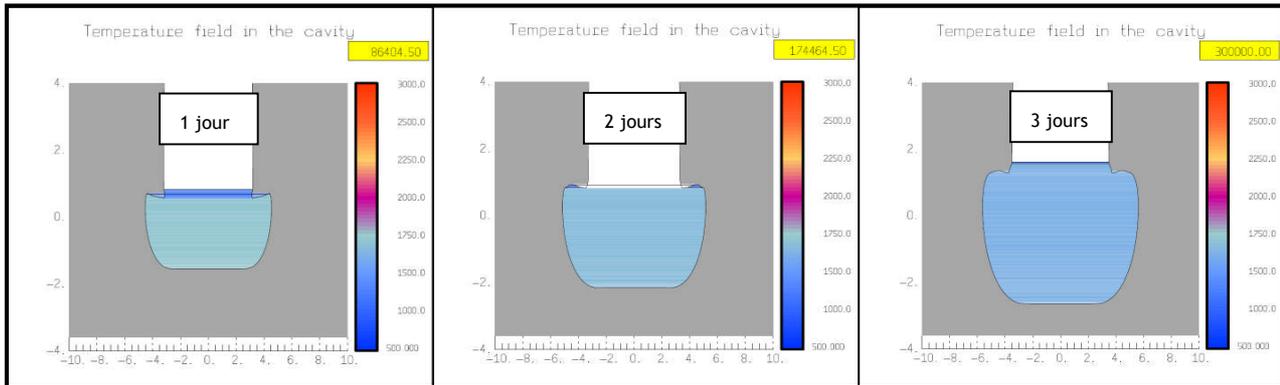


Figure 13 : Evolution géométrique de la zone d'interaction corium-béton dans le puits de cuve sur trois jours et champ de température

3.3.4 THERMOHYDRAULIQUE DANS L'ENCEINTE ET TRANSPORT DES AEROSOLS

- Thermohydraulique générale

La figure 14 montre l'évolution de pression partielle des gaz présents dans l'enceinte. On y repère facilement les grands événements de la séquence. La pression totale atteint 6 bar, critère retenu dans l'étude pour l'ouverture du filtre U5, à $t = 285300$ s (3.3 jours).

Cette montée en pression est principalement due à :

- une injection à la brèche du circuit primaire de vapeur d'eau et d'hydrogène pendant la phase de progression de l'accident en cuve (contribution initiale +2.6 bar) ;
- la production de vapeur d'eau et d'hydrogène, de dioxyde et de monoxyde de carbone depuis l'interaction corium béton (contribution pour l'ensemble de +1 bar) ;
- la vaporisation des volumes liquides adjacents au puits de cuve (espace annulaire bas, local RRA, local RDP cf-fig.15) déversés sur le corium à partir de la percée des parois latérales du puits de cuve à $t = 81400$ s (contribution de +2.5 bar avant condensation de la vapeur).

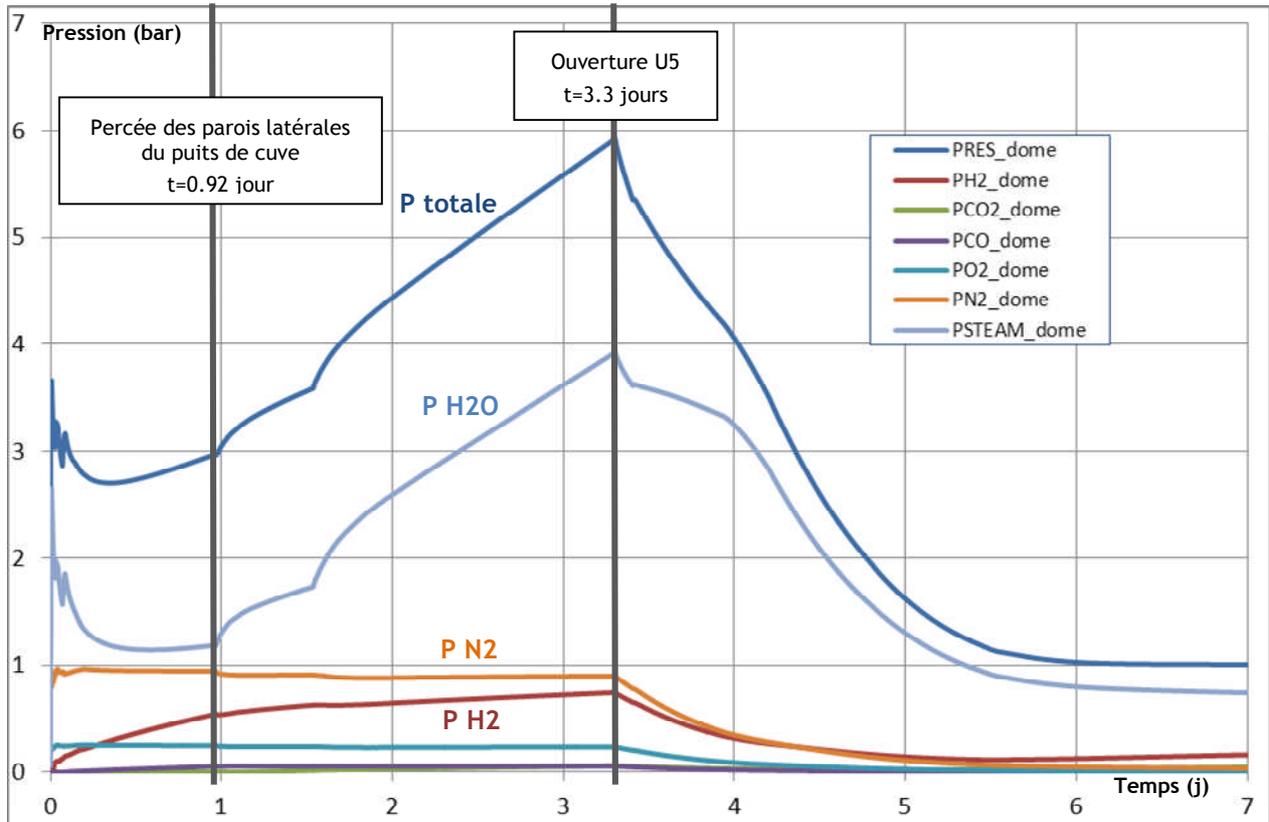


Figure 14 : Evolution de la pression partielle des gaz présents dans l'enceinte et pression totale

La figure 15 montre l'évolution des volumes liquides principaux de l'enceinte (volumes bas de l'enceinte). On y repère :

- la vaporisation quasi-instantanée de l'eau dans le puits de cuve à $t = 6130$ s (rupture cuve et début d'ICB) ;
- le déversement progressif des volumes adjacents au puits de cuve dans le puits de cuve (espace annulaire bas, local RDP, et local RRA -non significatif) suite à la percée de ses parois latérales à $t = 81400$ s, ainsi que la vaporisation quasi-instantanée de ces volumes déversés (visibles sur la perte en eau du total enceinte)

Ce dernier déversement présente plusieurs phases intimement liées au transfert de chaleur entre le corium et l'eau déversée en surface, en concordance avec les phases de variation de l'épaisseur de croûte (voir fig. 24) formée en surface du corium au fur et à mesure du déversement de l'eau provenant des espaces adjacents (les jonctions entre les zones adjacentes et le puits de cuve sont traduites numériquement par des équilibres de niveaux, si bien que la vaporisation dans le puits de cuve influe sur la cinétique de déversement). Ces phases de déversement se répercutent ainsi sur la pression de vapeur d'eau dans l'enceinte et la pression totale, observables en figure 14. Notons enfin qu'une fois tout le volume de l'espace annulaire bas déversé dans le puits de cuve et vaporisé sur le corium ($t > 4.2$ jours), la totalité de l'eau dans l'enceinte est contenue dans les puisards.

Au-delà de la fin de ce déversement, le volume liquide total dans l'enceinte est en légère décroissance, les puisards étant à température de saturation (cf -fig. 16).

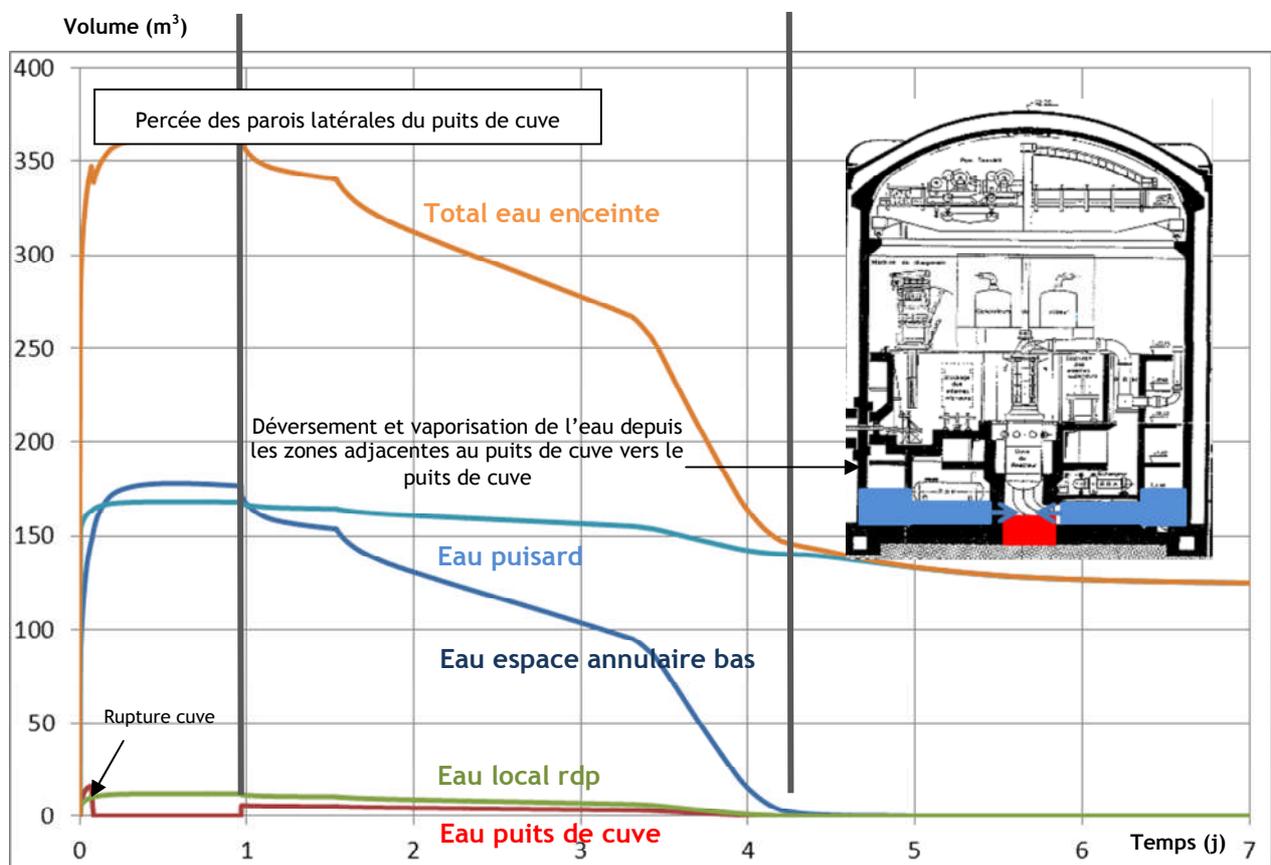


Figure 15 : Evolution des volumes d'eau dans l'enceinte

La figure 16 présente l'évolution de la température en phase gaz dans l'enceinte, de la température de l'eau dans les puisards et de la température de saturation, fonction de la pression totale dans l'enceinte.

Concernant la température en phase gaz, on repère plusieurs événements concordants avec les précédentes observations :

Phénoménologie et rejets dans l'environnement (calculs ASTEC V2)

- la percée des parois latérales du puits de cuve, qui se traduit par une importante émission de vapeur d'eau dans l'enceinte, à température de saturation, faisant chuter la température en phase gaz ;
- une fenêtre de temps (1 à 3.5 jours) où les conditions sont favorables à la condensation de la vapeur dans l'enceinte ($T_{\text{gaz}} < T_{\text{sat}}$) ;
- l'élévation de température enceinte à la fin du déversement intégral de l'eau du volume de l'espace annulaire bas dans le puits de cuve, se traduisant numériquement par la restitution de puissance des aérosols transportés dans le puits de cuve puis asséchés (la restitution de puissance ne se fait numériquement que lorsque le volume considéré est totalement asséché, condition sine qua non) ;
- la mise en conditions évaporantes des puisards au-delà de 4.5 jours ($T_{\text{liq}} > T_{\text{sat}}$).

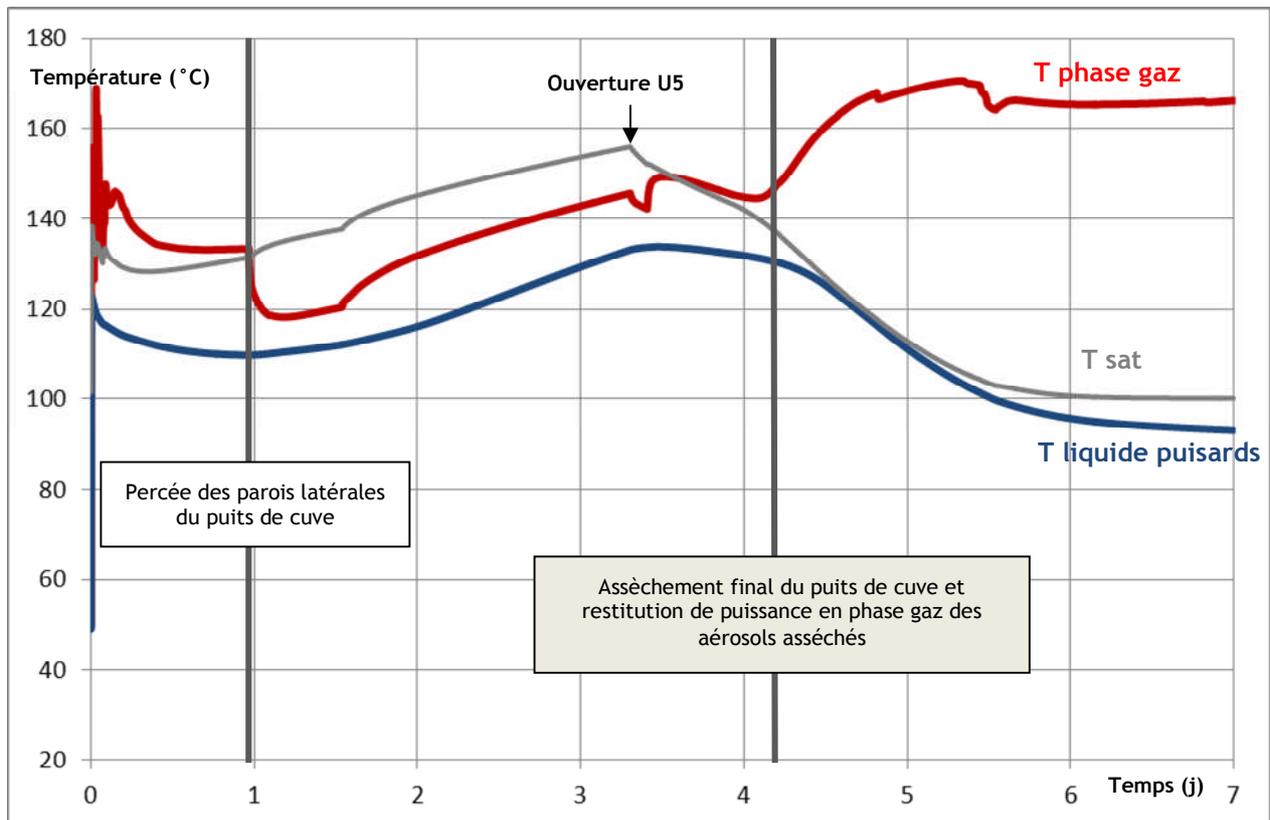
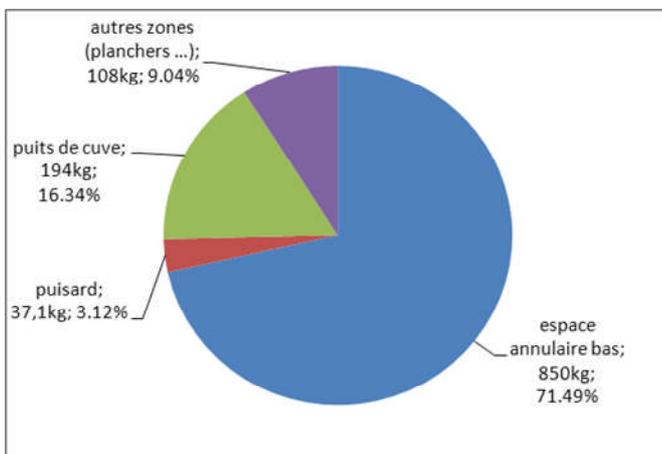
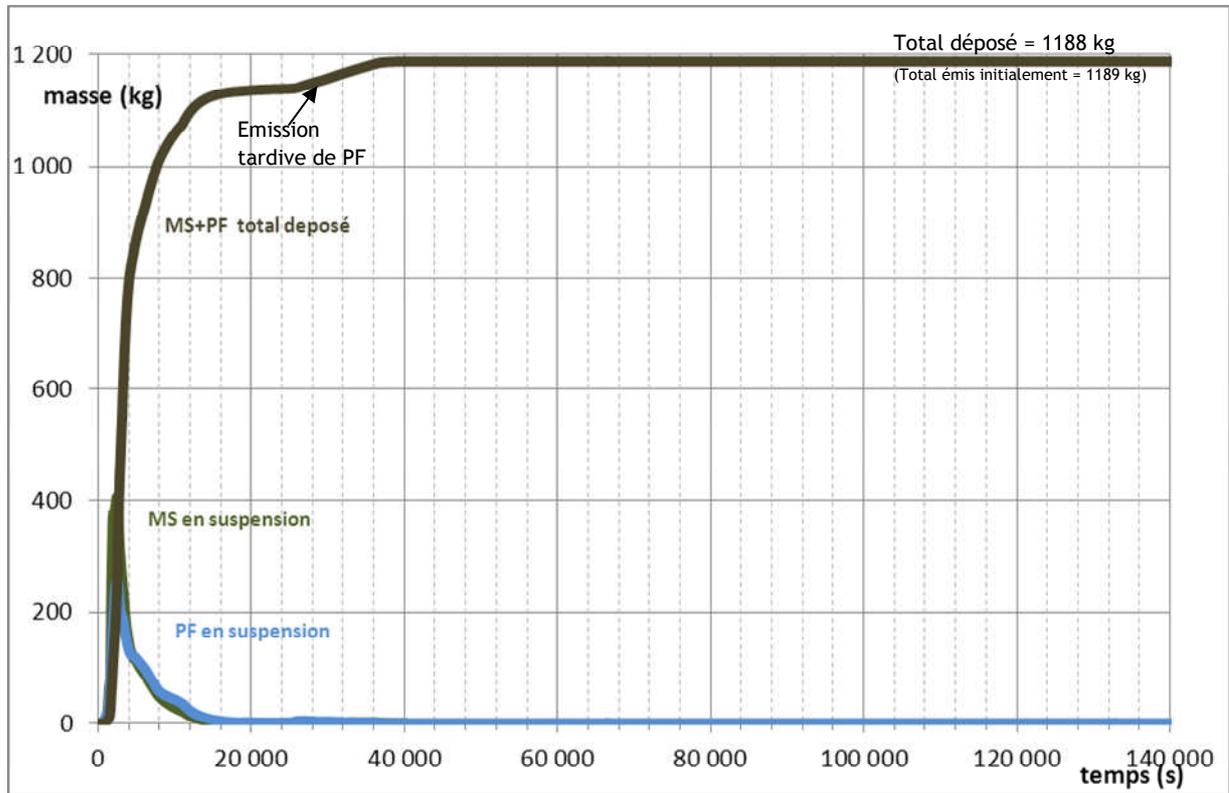


Figure 16 : Evolution des température en phase gaz dans l'enceinte (dôme), température de l'eau des puisards et température de saturation au cours de la séquence

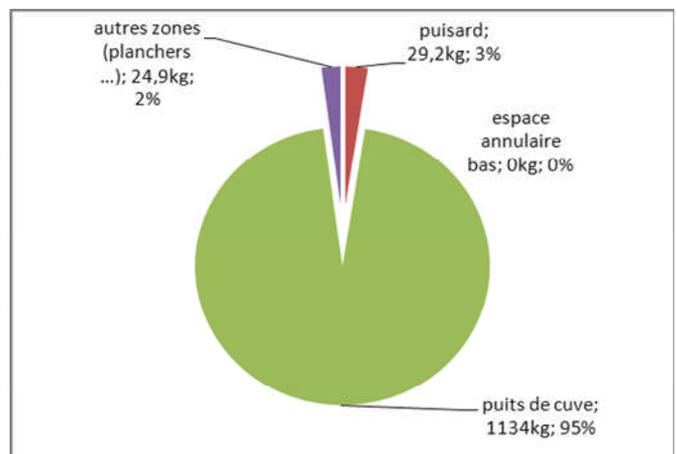
- **Transport des aérosols dans l'enceinte**

La figure 17 montre l'évolution des masses d'aérosols en suspension et déposés dans l'enceinte. On constate que les aérosols sont quasi intégralement déposés à $t = 40000$ s (~11 heures). On constate également une légère augmentation de la masse déposée de $t = 27000$ s à $t = 37000$ s, liée à l'émission tardive de radioéléments (notamment Ba et Sr) depuis le combustible au-delà du temps de rupture de la cuve, comme vu en figure 10 (§ 3.3.2). La quasi intégralité des aérosols émis est donc déposée dans l'enceinte à l'ouverture du filtre U5 (3.3 jours). En définitive, à la fin de la phase de déposition ($t = 11$ heures), 1188 kg d'aérosols sont déposés dans l'enceinte interne sur les 1189 kg initialement émis. La différence est distribuée dans les bâtiments auxiliaires, l'espace entre enceintes, et les divers filtres (filtre de l'EDE et filtres des bâtiments auxiliaires), ainsi que dans l'environnement (3.7 g d'aérosols de produits de fission à $t = 11$ heures, émis au travers des fuites directes).

On observe également en figure 17 la distribution des aérosols dans les différents volumes aux instants importants. On constate que la plus grande partie des aérosols déposés se situe dans l'espace annulaire bas (71.5 %) et le puits de cuve (16 %). Cette situation est stable jusqu'à la percée des parois latérales du puits de cuve, puis tous les aérosols contenus dans l'espace annulaire bas sont transférés avec l'eau sur le corium dans le puits de cuve. En fin de calcul, les aérosols déposés se retrouvent quasi intégralement (95 %) dans le puits de cuve. On verra ici que les aérosols ne sont pas, dans la modélisation actuelle, réémis depuis les phases liquides vaporisées, ce qui peut constituer une première perspective d'amélioration. Néanmoins, la puissance qu'ils contiennent est quant à elle correctement restituée, en phase gaz et dans les murs, ce qui est observable en figure 16 sur l'évolution de la température de la phase gaz de l'enceinte à la fin du déversement complet de l'espace annulaire bas vers le puits de cuve (comme évoqué précédemment, la restitution de puissance ne se fait que lorsque le volume est totalement asséché -atteinte d'un critère de hauteur d'eau minimale de 1 mm dans le volume).



Distribution des aérosols déposés (1188 kg) à l'instant de la percée des parois latérales du puits de cuve (t = 81400 s)



Distribution des aérosols déposés (1188 kg) après la fin du déversement et de la vaporisation de l'eau des zones adjacentes au puits de cuve (t = 4.2 jours)

Figure 17 : Evolution et distribution des quantités d'aérosols en suspension et déposés dans l'enceinte de confinement (MS= matériaux de structure, PF= produits de fission)

3.3.5 FOCUS SUR LA CHIMIE DE L'IODE DANS L'ENCEINTE

NB : Toutes les masses d'espèces d'iode mentionnées dans ce paragraphe représentent la « masse d'iode sous forme... ». Ainsi, par exemple, quand 1 kg de AgI est mentionné, cela signifie 1 kg d'iode sous forme AgI.

Au début du transitoire, 100 % de l'inventaire initial en iode (21,7 kg) est émis dans l'enceinte, sous forme d'aérosol (75 % de la masse d'iode initiale) et d'iode moléculaire gazeux (I₂).

La figure 18 représente la conversion globale de l'iode par réactions chimiques en fonction du temps et la localisation principale des espèces à 7 jours. L'espèce dite CH₃I (iode organique) correspond à la réaction de l'iode sur les peintures organiques de l'enceinte, l'espèce IOX désigne les oxydes d'iode, à l'état d'aérosol essentiellement issus de l'oxydation par les produits de radiolyse de l'air dans l'enceinte, HOI et I⁻ représentent respectivement l'acide hypoiodéux et l'ion iodure en phase aqueuse, et AgI l'iodure d'argent formé en surface des aérosols d'argent déposés dans les phases aqueuses.

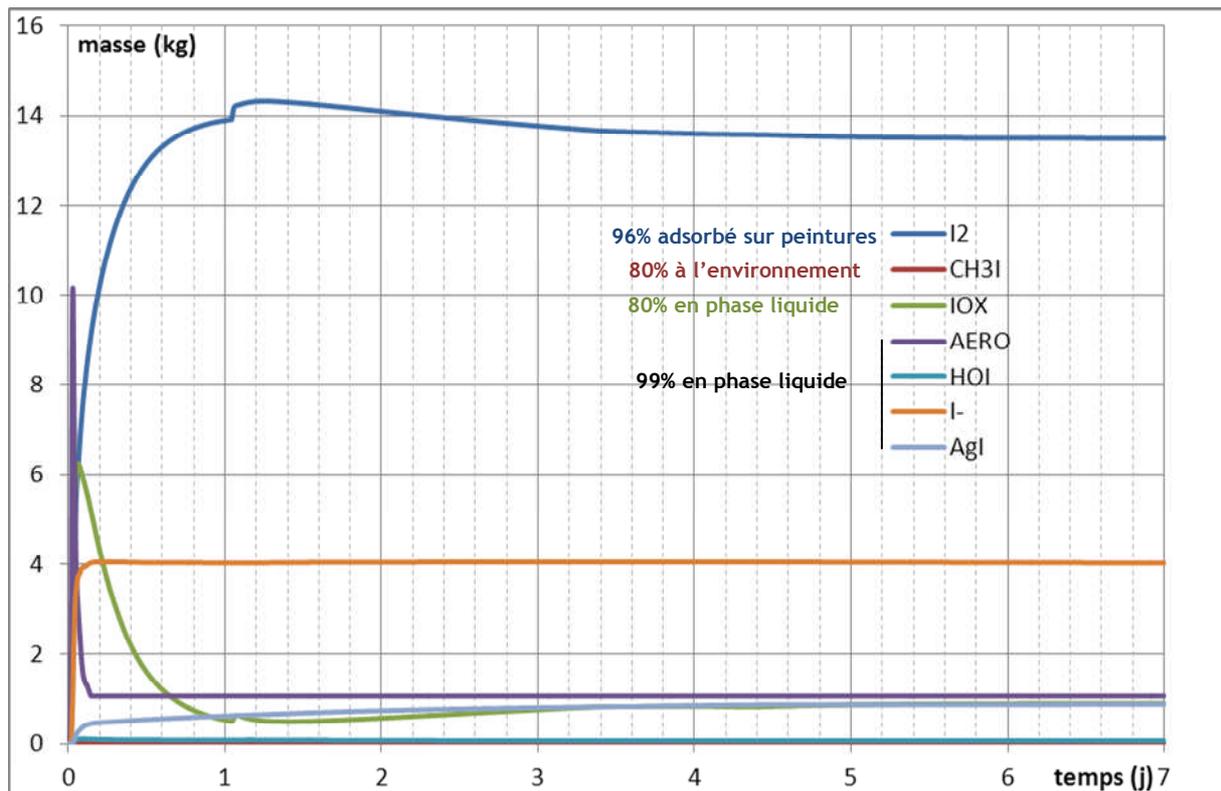


Figure 18 : Evolution des espèces d'iode formées au cours du temps

On constate ainsi que la proportion d'iode moléculaire passe du simple au double : pour 25 % de l'inventaire cœur initialement émis, la contribution de l'I₂ passe à 54 % en fin de calcul. La quasi-totalité de cet I₂ produit est rapidement localisée à l'état adsorbé sur les peintures (à t = 11 heures). Cette quantité d'iode moléculaire produit (14.3 kg) est importante.

Elle est due :

- à l'iode moléculaire émis depuis le circuit primaire rapidement adsorbé (5.5 kg) ;
- à l'absence d'EAS, amenant un pH acide dans toutes les phases liquides, favorisant la conversion des iodures solubilisés en I₂ ;
- au déficit en argent dans les phases liquides par rapport à l'iode rendant son piégeage moins conséquent (seulement 882 g d'iode sous forme d'AgI à 7 jours) ;
- au fait que de nombreux volumes liquides soient vaporisés ou à saturation, ce qui favorise le dégazage de I₂ et déplace par conséquent tous les équilibres chimiques en phase liquide vers la formation d'I₂ ;
- à une constante de désorption de l'I₂ sur les peintures considérée nulle et une faible cinétique de conversion de cet iode adsorbé en IOx.

3.4 REJETS, TERME SOURCE, ET RESULTATS COMPLEMENTAIRES

3.4.1 REJETS HORS IODE AVEC FILIATIONS

La figure 19 présente le rejet des différents produits de fission au cours du temps.

Ce résultat provient du post-traitement des variables afférentes au transport/filiation des espèces calculé par le module ISODOP. Il n'est pas possible actuellement de donner le Terme Source hors filiation qui correspondrait au traitement de variables afférentes au transport des espèces calculé par le module CPA. En effet, pour ce module, les espèces sont transportées avec leurs fluides porteurs. Les critères d'erreur admissible sur ces débits de fluides sont actuellement fixés à 1 kg/s (option CPA « ICLI=0 ») afin d'obtenir un temps de calcul raisonnable (2 jours de temps CPU pour 7 jours de temps physique). **Ainsi, avec ce critère de tolérance, le module CPA donne des rejets nuls pour de nombreux produits de fission (Ru, La, Pu, Np, etc ...).**

Les résultats actuels hors filiation rendus par CPA sont donnés au tableau 13 pour indication.

On repère en figure 19 l'ouverture du filtre U5 sur le rejet en gaz rares. On observe également à cet instant une augmentation des masses de Cs et Rb dans l'environnement, provenant de la filiation respectivement du Xe et du Kr dont les rejets sont augmentés à l'ouverture du filtre. Pour information, hors filiation les rejets finaux en Cs et Rb sont respectivement de 3 g (276 g avec filiation) et de 0.3 g (1.75 g avec filiation)

L'ouverture du filtre n'est en revanche pas repérable sur les autres produits de fission, les aérosols étant déjà quasi-intégralement déposés. On constate par ailleurs que leurs masses ne varient pas significativement par filiation dans l'environnement. Seule leur distribution isotopique change avec le temps, et pourrait être post-traitée.

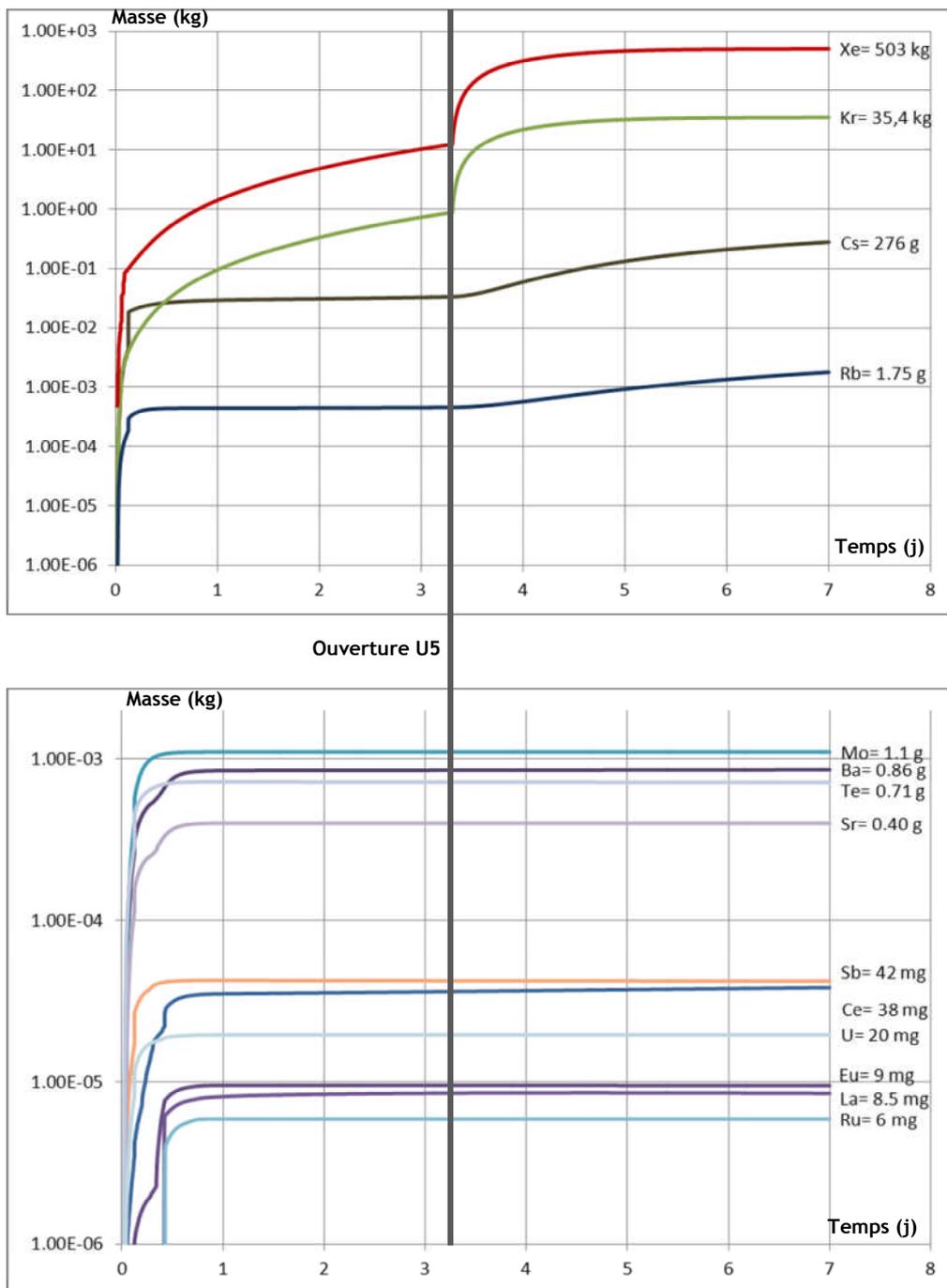


Figure 19 : Evolution des rejets en produits de fission hors iode, filiation dans l'enceinte et dans l'environnement comprises.

3.4.2 REJETS EN IODE HORS FILIATION

Comme évoqué précédemment (§ 3.3.5), le rejet en iode ne peut pas être donné par les résultats du module ISODOP, qui ne considère pas en tant que variables de calcul les espèces formées par le module IODE.

On donne ainsi ici les résultats des modules CPA/IODE pour le rejet des diverses espèces chimiques d'iode (figure 20). Notons qu'à 7 jours le rejet n'est pas stabilisé. En effet, une conversion de l'I₂ adsorbé sur les peintures en IO_x s'établit sur le long terme. Ces IO_x sont ensuite en partie émis à l'environnement via le filtre U5. Par ailleurs, le relâchement d'I₂ depuis les puisards continue de se produire. Néanmoins, la considération de la filiation de l'iode montrerait que le rejet massique est stabilisé et décroît avant 7 jours.

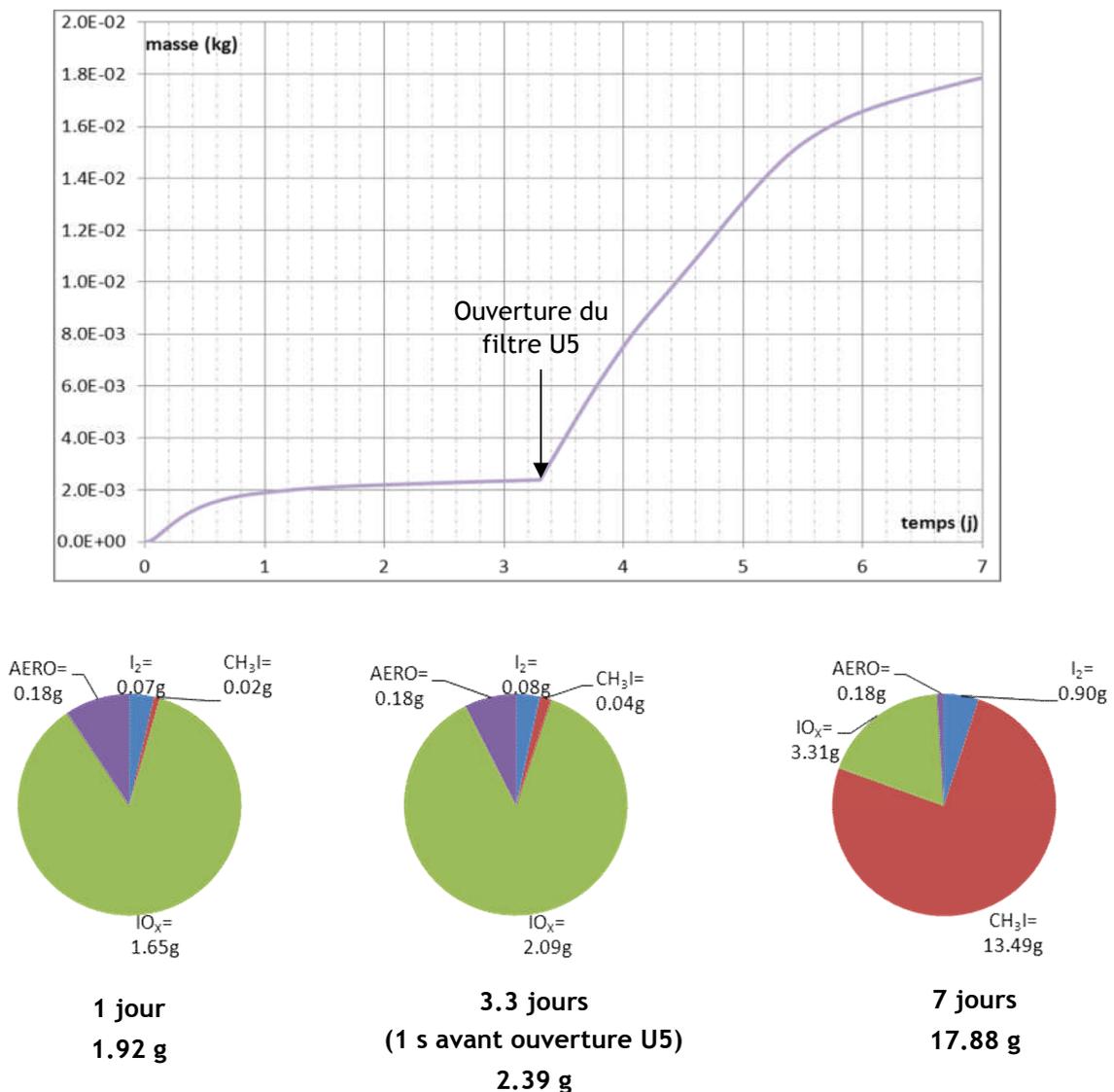


Figure 20 : Evolution et spéciation des rejets en iode, filiation dans l'enceinte et dans l'environnement non comprises.

3.4.3 TERME SOURCE ET COMPARAISON A L'EVALUATION S3 DE 2000 [1]

Le tableau 12 compare en premier lieu les instants caractéristiques des deux évaluations pour la même séquence accidentelle.

| Séquence APRP 12 branche chaude absence totale IS et EAS | Evaluation de 2000 [1] | Présente évaluation |
|---|---|---|
| Taux de fusion de cœur et d'émission de PF en enceinte | Taux de fusion postulé à 100% Masse et puissance engagée dans l'ICB: 100% cœur Emission de PF postulée pour un taux de fusion de 100% | Taux de fusion final calculé: 70% (arrêt du calcul de dégradation sur divergence) Masse et puissance engagée dans l'ICB: calculées Emission de PF calculée |
| Rupture cuve et début d'ICB | 1,8 h | 1,7 h |
| Percée des parois latérales du puits de cuve | 15,3 h | 22,6 h |
| Ouverture du filtre U5 | - | 3,3 j |
| Percée du radier | 40,8h | 4,7 j |

Tableau 12 : Comparaison des temps caractéristiques entre l'évaluation de 2000 et la présente évaluation.

Le tableau 13 compare les résultats du Terme Source entre les deux évaluations. Notons que la classification des produits de fissions en termes d'isotopes représentatifs, reprise de l'évaluation de 2000 pour comparaison, est à réétudier à la lumière des nouveaux résultats. Par exemple, l'isotope 144 du Ce n'a pas vocation à représenter le Terme Source des lanthanides dans leur globalité (même remarque pour le Pu²³⁹ en regard des actinides).

| Famille de produits de fission et noyaux lourds | Isotope représentatif | Evaluation de 2000 avec les hypothèses relatives à 100% de fusion de cœur (hors filiation) [1] | Présents résultats CPA (hors filiation et avec erreur –sous évaluation de l'ordre de 30% pour certains PF, en raison du critère de tolérance sur les débits de fuite dans CPA) | Présents résultats ISODOP (avec filiation dans l'enceinte et dans l'environnement) |
|---|-----------------------|--|--|--|
| Gaz rares | Xe133 | 0,8 | 0,96 | 0,96 |
| Iodes aérosols | I131 | 4,5E-05 | (aérosols + IOx) 1,6E-04 | - |
| Iode moléculaire (I ₂) | I131 | 1,4E-05 | 4,1E-05 | - |
| Iode organique (ICH ₃) | I131 | 4,9E-03 | 6,2E-04 | - |
| Césiums | Cs137 | 3,5E-05 | 1,1E-05 | 1,0E-03 |
| Tellures | Te132 | 2,6E-05 | 1,1E-05 | 1,5E-05 |
| Strontiums | Sr90 | 9,9E-07 | 3,6E-06 | 4,3E-06 |
| Ruthéniums | Ru106 | 9,9E-07 | 0 | 2,5E-08 |
| Molybdènes | Mo99 | 2,4E-05 | 2,9E-06 | 3,4E-06 |
| Lanthanides et terres rares | Ce144 | 9,9E-07 | 4,8E-08 | 1,4E-07 |
| Actinides | Pu239 | 9,9E-08 | 0 | 7,7E-8 |

Tableau 13 : Terme Source obtenu et comparaison à l'évaluation de 2000.

3.4.4 RESULTATS COMPLEMENTAIRES : PUISSANCE DEPOSEE DANS LES FILTRES, MASSE DE DIHYDROGENE DANS L'ENCEINTE INTERNE

On observe en figure 21 des puissances déposées dans le filtre U5 et le filtre de l'EDE (filtration dans l'espace entre enceintes), de l'ordre du kW.

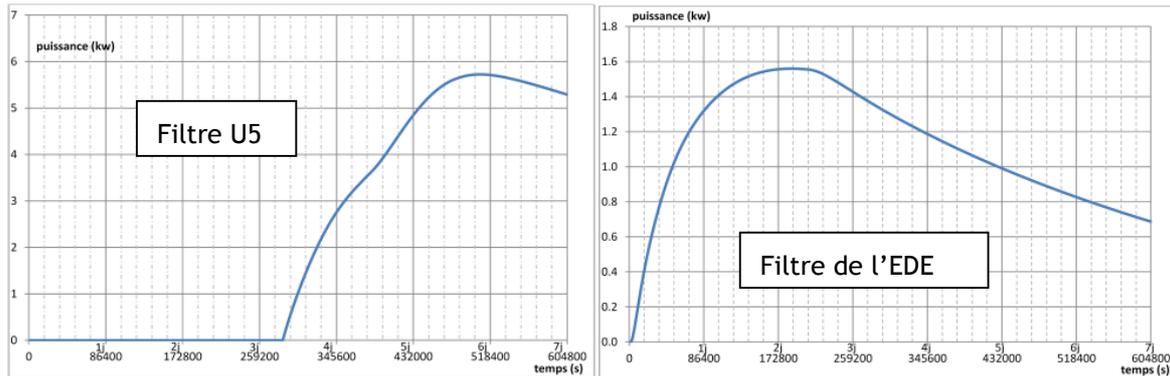


Figure 21 : Puissance radioactive accumulée dans les filtres U5 et EDE.

Les recombineurs autocatalytiques passifs ont été désactivés dans ce premier calcul (afin de pouvoir observer leur influence sur la thermique de l'enceinte dans un second temps). On observe en figure 22 l'évolution de la masse de dihydrogène dans l'enceinte interne, qui atteint un maximum de 3300 kg à l'instant d'ouverture du filtre U5. L'influence des recombineurs est étudiée ci-après (§ 3.5).

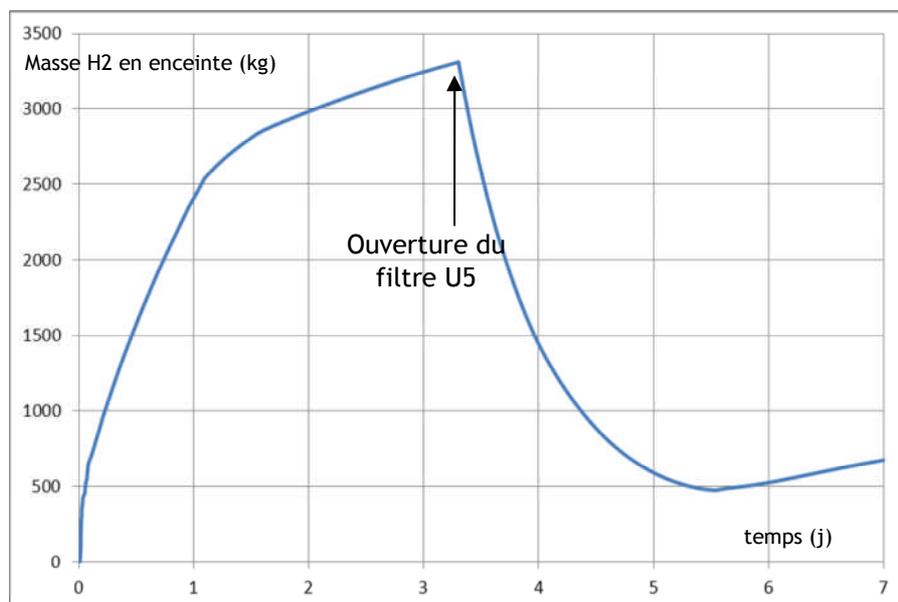


Figure 22 : Evolution de la masse de dihydrogène dans l'enceinte interne.

3.5 ANALYSES DE SENSIBILITE

On cherche ici dans un premier temps à quantifier la sensibilité du délai d'ouverture U5 à certains paramètres physiques ou aux défauts de couplage identifiés, et ayant conditionné la méthode de calcul comme expliqué au § 2.2.

Le tableau 14 présente les analyses de sensibilités réalisées :

- le calcul de base précédemment présenté est dénommé ci-après C1 ;
- le calcul C2 vise à caractériser l'influence du paramètre γ utilisé dans MEDICIS pour la détermination de la température de solidification du corium ($T_{solidification} = \gamma T_{solidus} + (1-\gamma) T_{liquidus}$) ;
- le calcul C3 vise à caractériser la performance et l'influence des recombineurs, en particulier sur la thermique enceinte et le délai d'ouverture U5 (les recombineurs en service dégagent une puissance en phase gaz de l'ordre de 1 MW) - un calcul C3 bis est également mené avec correction d'un paramètre ;
- le calcul C4 vise à caractériser l'influence, toujours sur le transitoire de pression en enceinte, de la non-rétroaction de IODE vers CPA, ne permettant pas de considérer la puissance dégagée en phase gaz et sur les murs par l'I₂ émis depuis la brèche et les phases liquides, et adsorbé sur les peintures notamment (puissance de l'ordre d'1 MW pour les 14.3 kg d'I₂ adsorbés -cf fig. 18) ;
- le calcul C5 vise à caractériser l'influence du défaut de couplage entre MEDICIS et ISODOP concernant la détermination exacte de la puissance corium en cours d'ICB.

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| | CALCUL DE BASE | C1/C2 : effet du γ | C1/C3 : effet des recombineurs | C1/C4 : effet du défaut de couplage CPA/IODE | C2/C5 : effet du défaut de couplage MEDICIS/ISODOP |
| Paramètre γ pour le calcul de la température de solidification du corium | $\gamma=1$ | $\gamma=0.2$ | $\gamma=1$ | $\gamma=1$ | $\gamma=0.2$ |
| Recombineurs H2 | Désactivés | Désactivés | Activés | Activés | Activés |
| Considération de la puissance émise par les formes gazeuses de l'iode | Non considéré | Non considéré | Non considéré | Considééré (I : FP_NG=0.25) | Non considéré |
| Détermination de la puissance corium | Exacte (calcul ISODOP stand alone) | Approchée (MEDICIS/ISODOP avec défaut de couplage) |

Tableau 14 : Paramètres des calculs de sensibilité

- Calcul C2 : influence du paramètre γ

Pour le calcul de base C1 précédemment présenté, la température de solidification du corium était prise égale au solidus, soit $\gamma=1$. Il apparaît que la valeur $\gamma = 0.2$ est plus recommandée (SAG/LETR).

La figure 23 présente l'écart sur le transitoire de pression en enceinte et l'instant d'atteinte d'une pression de 6 bars (+0.5 jours)

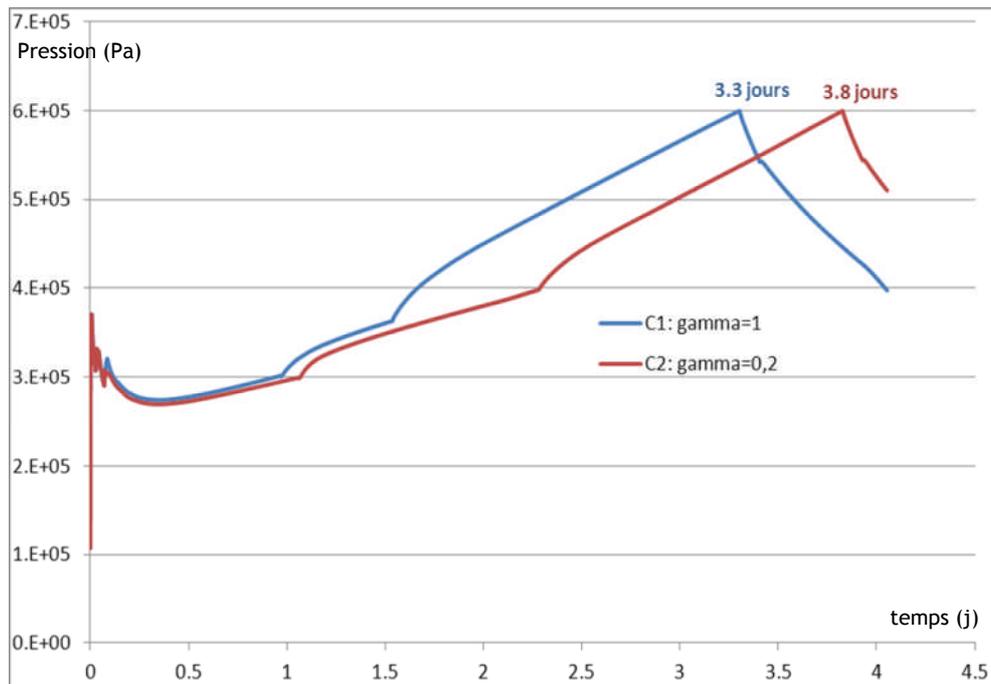


Figure 23 : Transitoires de pression en enceinte pour les paramètres $\gamma = 0.2$ et $\gamma = 1$

Ce résultat s'entend facilement en observant que pour un paramètre $\gamma = 0.2$, au lieu de 1, la solidification du corium intervient plus facilement (à plus haute température). Les épaisseurs de croûte calculées par MEDICIS dans les deux cas sont présentées en figure 24. Dans le cas $\gamma = 0.2$, la progression axiale de la croûte supérieure est élevée conduisant alors à une solidification en masse très importante du corium réduisant ainsi fortement les transferts thermiques entre le bain solidifié et l'interface béton, d'où in fine un ralentissement de l'ICB et de la pressurisation de l'enceinte.

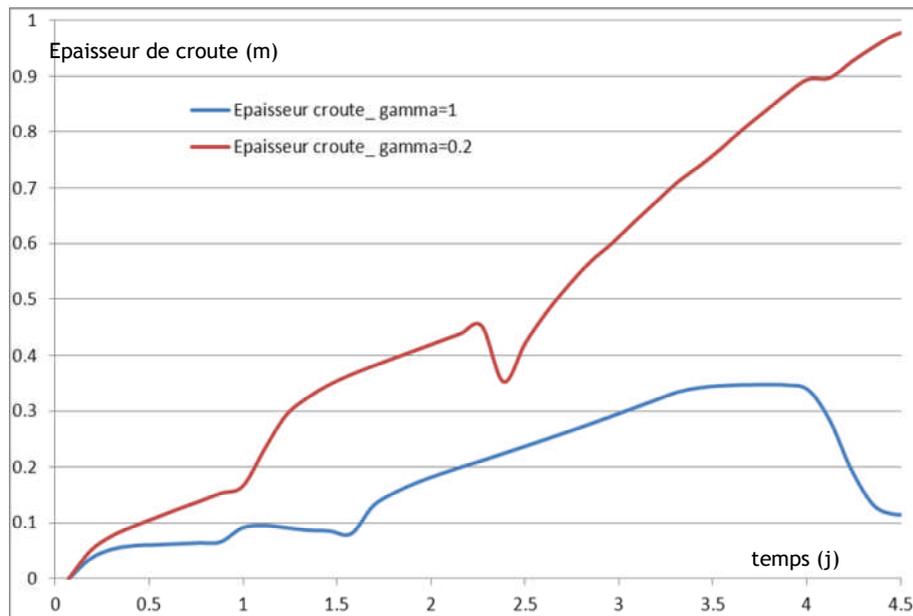


Figure 24 : épaisseurs de croûte formée en surface du corium dans le puits de cuve pour les paramètres $\gamma = 0.2$ et $\gamma = 1$

- *Calcul C3 : activation des recombineurs*

Les recombineurs modélisés sont de type AECL.

La figure 25 présente la différence de masse d' H_2 en enceinte suite à la recombinaison (efficacité maximale de recombinaison ~80%).

On constate également en figure 25 que les recombineurs sont désactivés à $t = 0.75$ jour sur critère $xO_2 = 1\%$ (valeur par défaut dans le jeu de données).

On présente en figure 26 l'impact thermique de l'activation des recombineurs, ainsi qu'en figure 27 l'impact sur le transitoire de pression en enceinte. Tant que les recombineurs sont activés, la température de la phase gaz enceinte est de l'ordre de $20^\circ C$ au-dessus de la température calculée en l'absence de recombineurs. Par ailleurs, bien que les recombineurs puissent favorablement faire baisser la pression (conversion de 1.5 mole en phase gaz en 1 mole), cet effet est contrebalancé par une température plus élevée en phase gaz, si bien que la pression est également plus importante dans la fenêtre de temps où les recombineurs sont activés. En définitive l'impact sur le délai d'ouverture U5 est peu significatif (+0.1 jour).

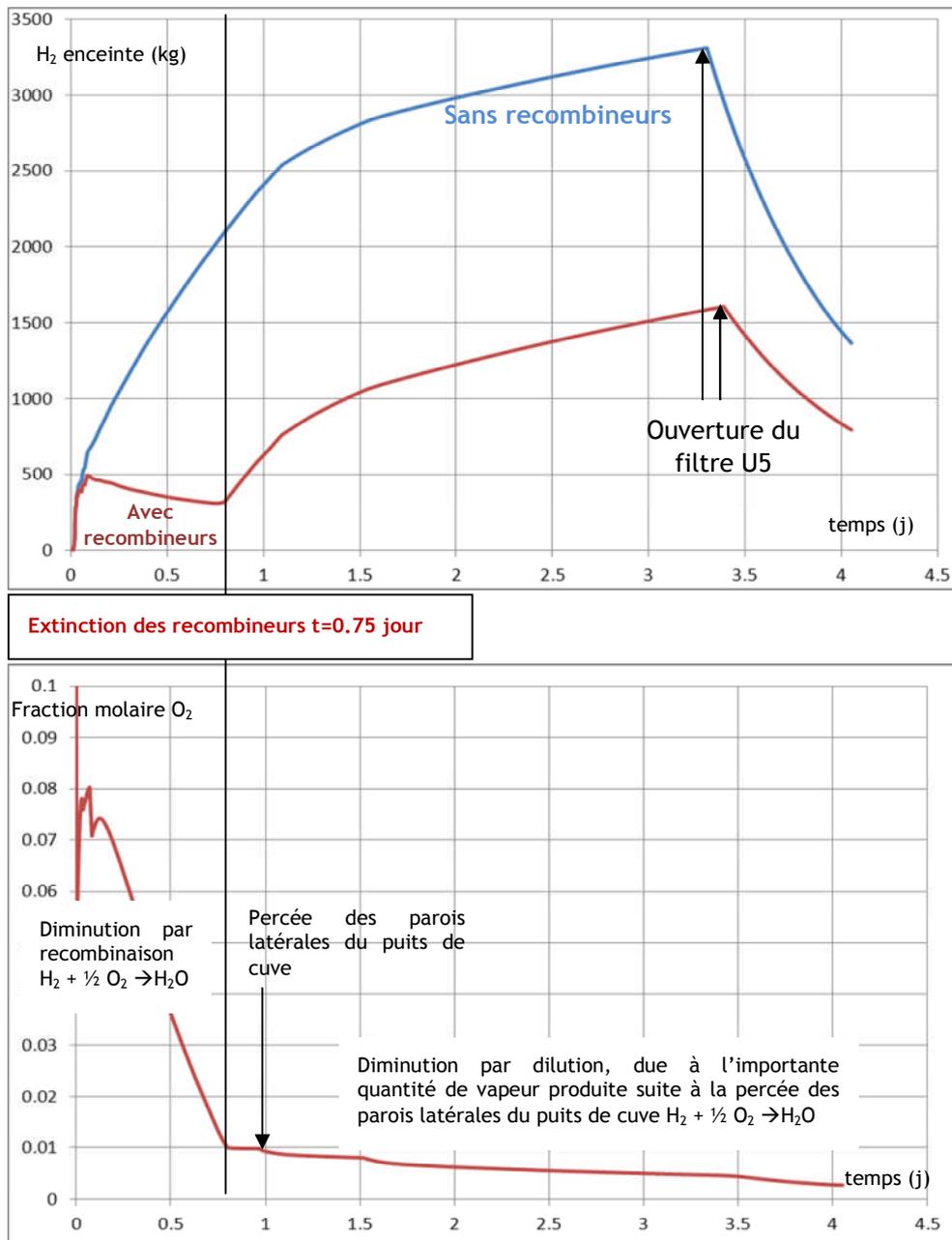


Figure 25 : Masse de dihydrogène en enceinte avec et sans recombineurs et auto-extinction des recombineurs sur critère de fraction minimale de dioxygène.

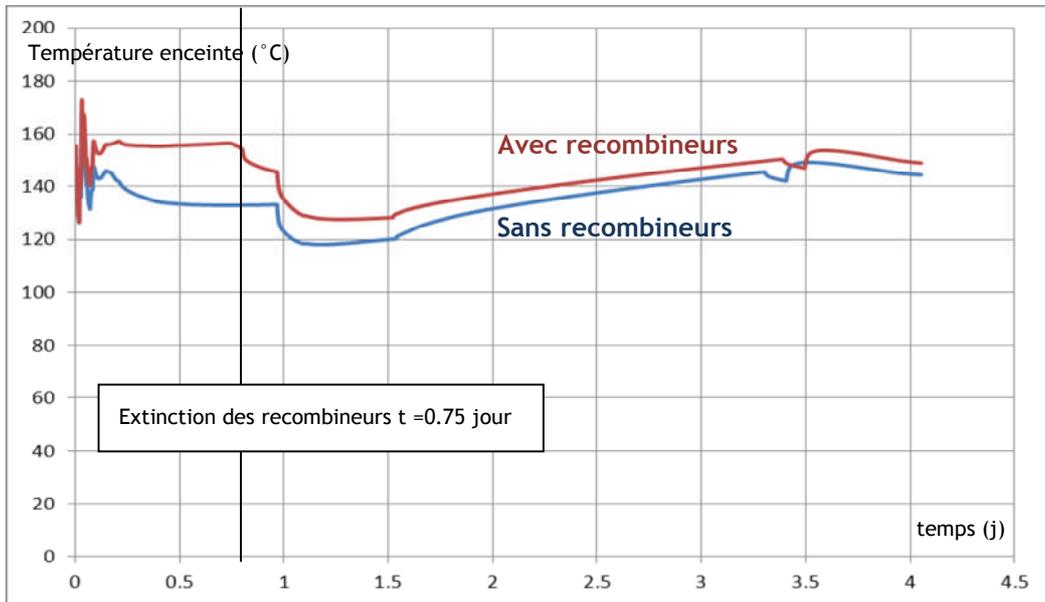


Figure 26 : transitoires de température en enceinte avec et sans recombineurs

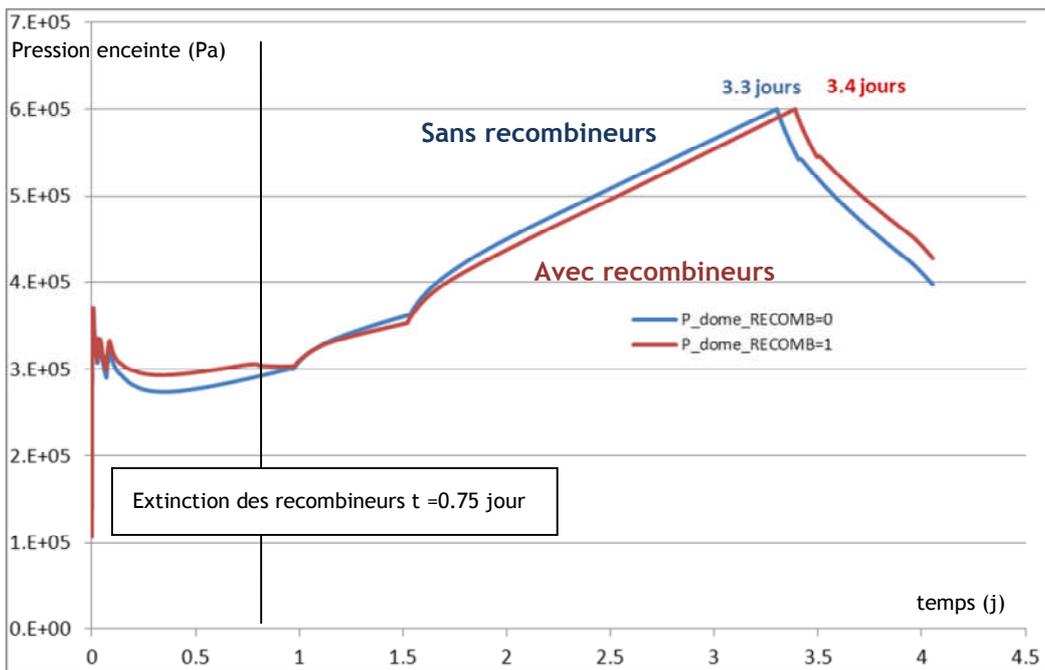


Figure 27 : Transitoires de pression en enceinte avec et sans recombineurs

- *Calcul C3 bis : correction de la fraction limite d'extinction des recombineurs*

Comme évoqué précédemment, le paramètre par défaut dans la modélisation pour l'extinction des recombineurs est fixé $xO_2 = 1\%$, alors qu'une valeur de 0.025% est en conformité avec les données constructeur et les expériences réalisées.

La figure 28 montre que les recombineurs atteignent maintenant leur limite d'extinction à 1.5 jour au lieu de 0.75 jour, sur ce nouveau critère. On constate par ailleurs en figure 29 que le prolongement du fonctionnement des recombineurs entre 0.75 jour et 1.5 jour n'a pas d'impact significatif sur le transitoire de pression en enceinte (contrebalancement entre la libération d'énergie et la conversion molaire). On constate néanmoins que le prolongement du fonctionnement des recombineurs permet de réduire la masse maximale de dihydrogène en enceinte de 200 kg.

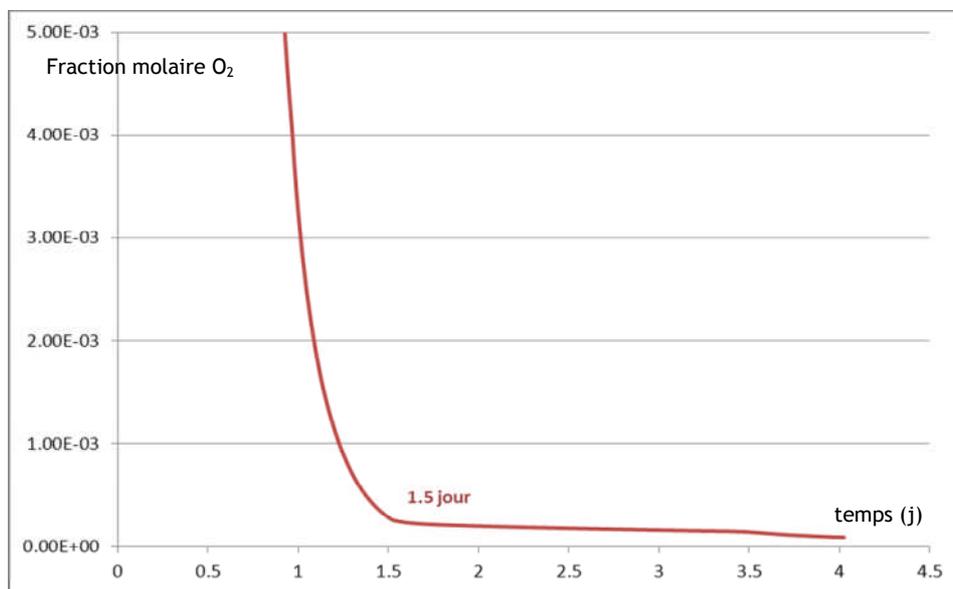


Figure 28 : Extinction des recombineurs à 1.5 jour sur critère $xO_2 = 0.025\%$

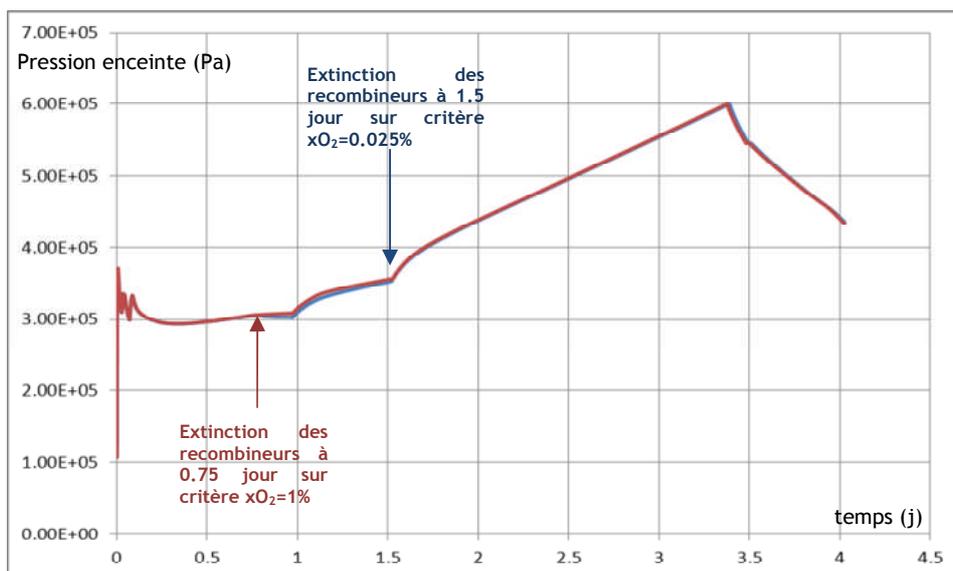


Figure 29 : Transitoires de pression en enceinte pour des fractions limite d'extinction des recombineurs $xO_2 = 1\%$ et $xO_2 = 0.025\%$
(courbes quasi-confondues)

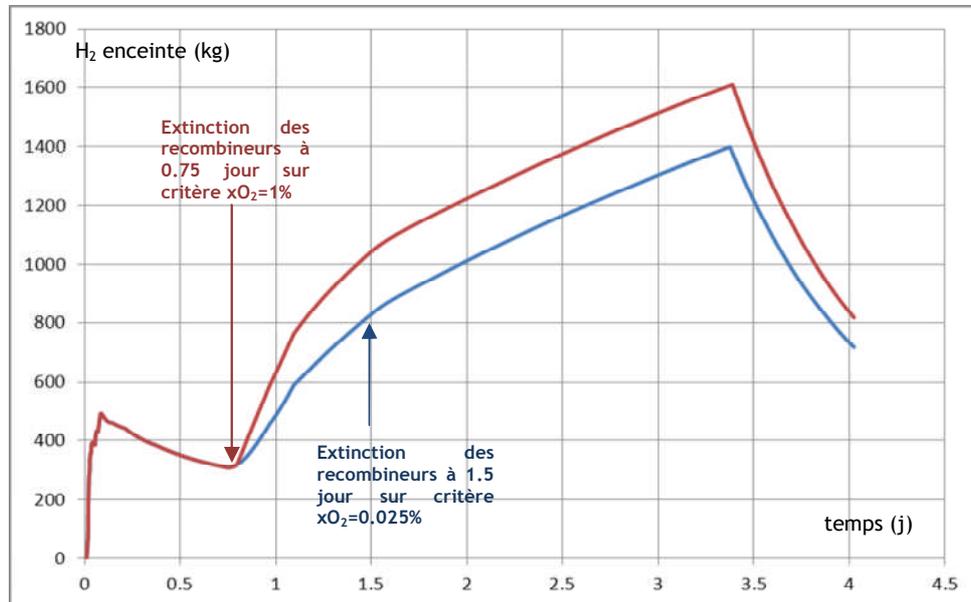


Figure 30 : Masse de dihydrogène en enceinte pour des fractions limite d'extinction des recombineurs $xO_2 = 1\%$ et $xO_2 = 0.025\%$

- Calcul C4 : influence de la non-rétroaction IODE → CPA

Afin de prendre en compte la puissance radioactive des espèces gazeuses d'iode formées par le module IODE, ou a minima d'iode moléculaire I_2 , dans le calcul de la thermohydraulique de l'enceinte géré par le module CPA, il est possible de déclarer une quantité initiale d'iode gazeux à la brèche sous forme virtuelle d'un gaz rare (donc sans interaction avec le module IODE), mais cette méthode ne rend pas actuellement des résultats convergents¹ et ne permet pas de considérer les formes gazeuses d'iode produites par les réactions chimiques dans l'enceinte.

Néanmoins, comme évoqué précédemment, les puissances dégagées par les recombineurs et par l'iode en phase gaz sont toutes deux de l'ordre de 1 MW. Il est ainsi possible par analogie avec les figures 26 et 27 d'estimer que l'augmentation de température apportée par la présence de formes gazeuses d'iode dans l'enceinte serait limitée à +25°C sans impact significatif sur le transitoire de pression en enceinte.

¹ Les résultats convergent pour un domaine de calcul sans fuites vers l'environnement uniquement.

- *Calcul C5 : influence du défaut de couplage entre MEDICIS et ISODOP*

Comme évoqué au tableau 1, lors d'un calcul couplé, MEDICIS récupère partiellement la puissance du corium calculée par ISODOP.

Une illustration simple est présentée en figure 31 sur un cas analytique, pour lequel 100 kg de molybdène sont injectés dans une modélisation MEDICIS/ISODOP. La puissance calculée par ISODOP correspond à la puissance du molybdène et de tous ses descendants β^- . La puissance lue par MEDICIS, et donc considérée dans le calcul de l'interaction corium béton ne correspond qu'à la puissance du molybdène.

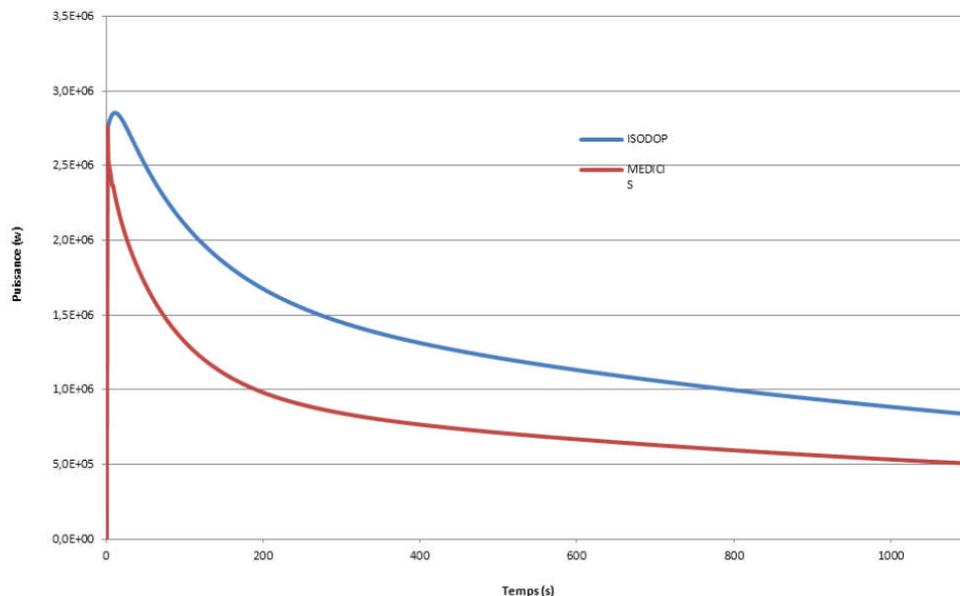


Figure 30 : Puissance calculée par ISODOP et réellement considérée par MEDICIS pour l'injection de 100 kg de Mo dans un calcul test MEDICIS/ISODOP

La figure 31 présente ainsi les différences sur la puissance totale corium pour le calcul de base, avec pré-calcul exact de la puissance par ISODOP et injection des valeurs dans MEDICIS et le calcul MEDICIS/ISODOP. L'écart global est assez faible, en termes de puissance, mais il sera croissant tout au long de la séquence en termes d'énergie disponible pour l'ICB.

En terme de transitoire de pression (figure 32), cette sous-évaluation de l'énergie engagée dans l'ICB amène une ouverture du filtre U5 plus tardive (+0.4 jour).

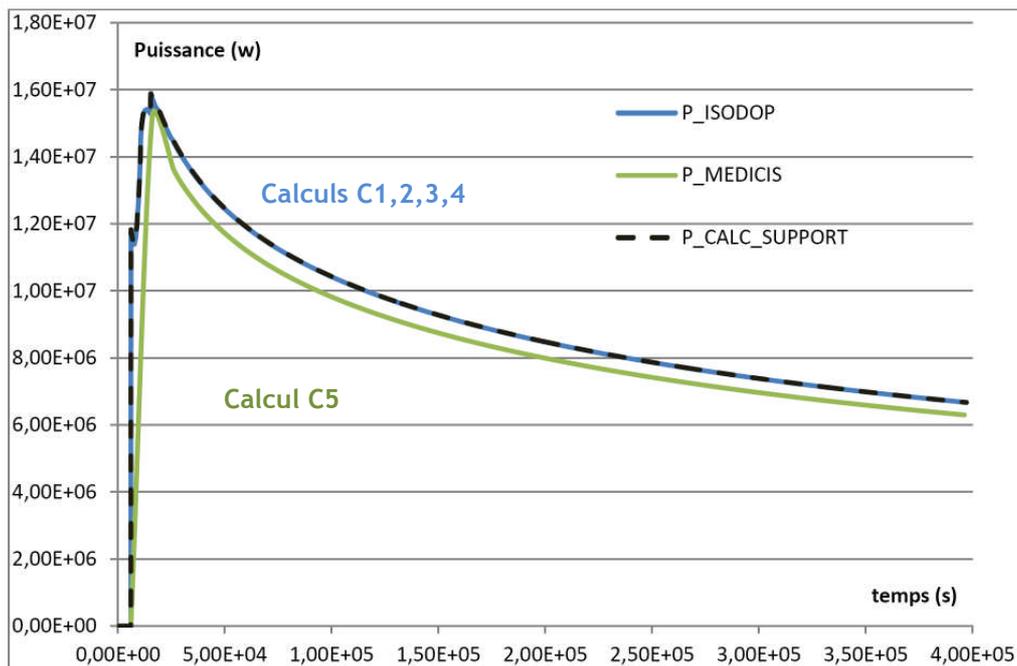


Figure 31 : Différence entre les puissances calculées par ISODOP pour le corium et réellement lues par MEDICIS en mode MEDICIS/ISODOP couplé

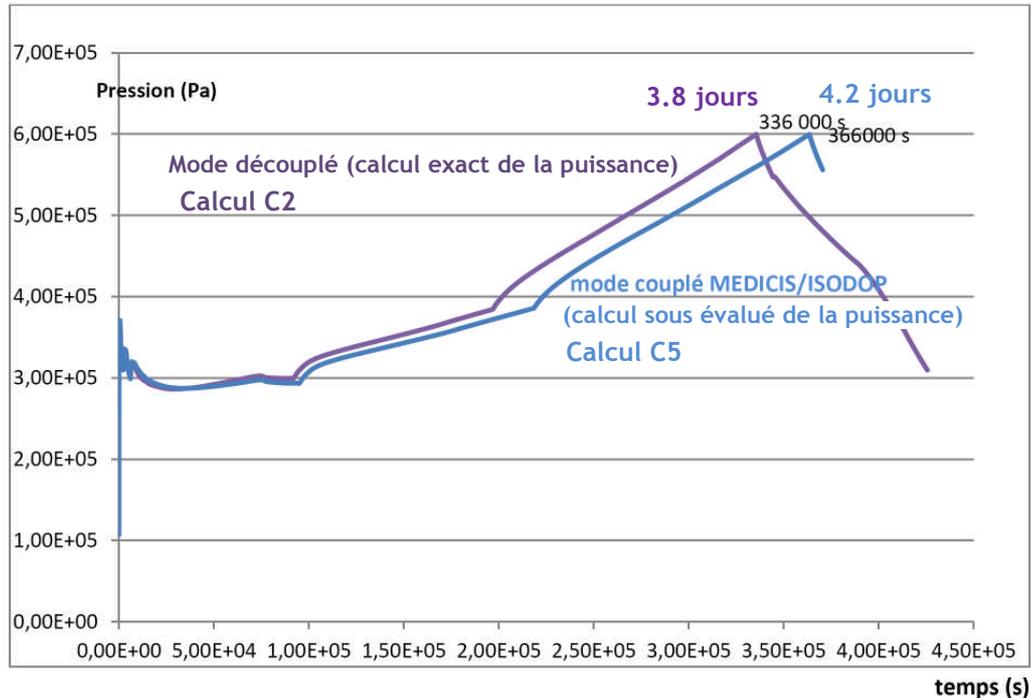


Figure 32 : Différence entre les transitoires de pression entre les calculs C2 et C5 (cf. tableau 16)

- *Modification du critère d'ouverture du filtre U5 et synthèse*

Le tableau 15 récapitule les résultats obtenus en termes de délais d'ouverture U5 pour les analyses de sensibilité et sur les critères 6 bar ou 5.2 bar (critère retenu actuellement dans le GIAG).

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| | CALCUL DE BASE | C1/C2 : effet du γ | C1/C3 : effet des recombineurs | C1/C4 : effet du défaut de couplage CPA/IODE | C2/C5 : effet du défaut de couplage MEDICIS/ISODOP |
| Paramètre γ pour le calcul de la température de solidification du corium | $\gamma=1$ | $\gamma=0.2$ | $\gamma=1$ | $\gamma=1$ | $\gamma=0.2$ |
| Recombineurs H2 | Désactivés | Désactivés | Activés | Activés | Activés |
| Considération de la puissance émise par les formes gazeuses de l'iode | Non considéré | Non considéré | Non considéré | Non calculé en l'état mais évalué | Non considéré |
| Détermination de la puissance corium | Exacte (calcul ISODOP stand alone) | Approchée (MEDICIS/ISODOP avec défaut de couplage) |
| Délai d'ouverture U5 sur critère 6 bars | AAR+ 3,3 jours | AAR+ 3,8 jours | AAR+ 3,4 jours | AAR+ ~3,4 jours | AAR+ 4,2 jours |
| Délai d'ouverture U5 sur critère 5,2 bars | AAR+ 2,6 jours | AAR+ 3,2 jours | AAR+ 2,7 jours | AAR+ ~2,7 jours | AAR+ 3,6 jours |

Tableau 15 : Délais d'ouverture U5 sur critères 6 bar et 5.2 bar pour les calculs de sensibilité

3.6 AMELIORATION DU CALCUL DE DEGRADATION

Un calcul dégradation complémentaire est effectué en activant le module RUPUICUV² (patch du 12/07/2012) qui permet de transférer le corium contenu du fond de cuve vers la cavité, depuis l'instant de rupture cuve, en considérant les coulées secondaires. Avec ce module activé, le calcul ne diverge pas et permet de trouver une dégradation totale du cœur (97% de l'UO₂ initial en cœur sont relocalisés dans le puits de cuve et ainsi engagés dans l'ICB -cf fig. 33), après un délai de l'ordre de 9 heures au-delà de l'AAR.

Le calcul Terme Source sera ainsi reconduit avec le module RUPUICUV activé, la dégradation secondaire pouvant sensiblement augmenter le niveau de rejet des lanthanides et actinides dans l'enceinte de confinement, et par voie de conséquence, à l'environnement.

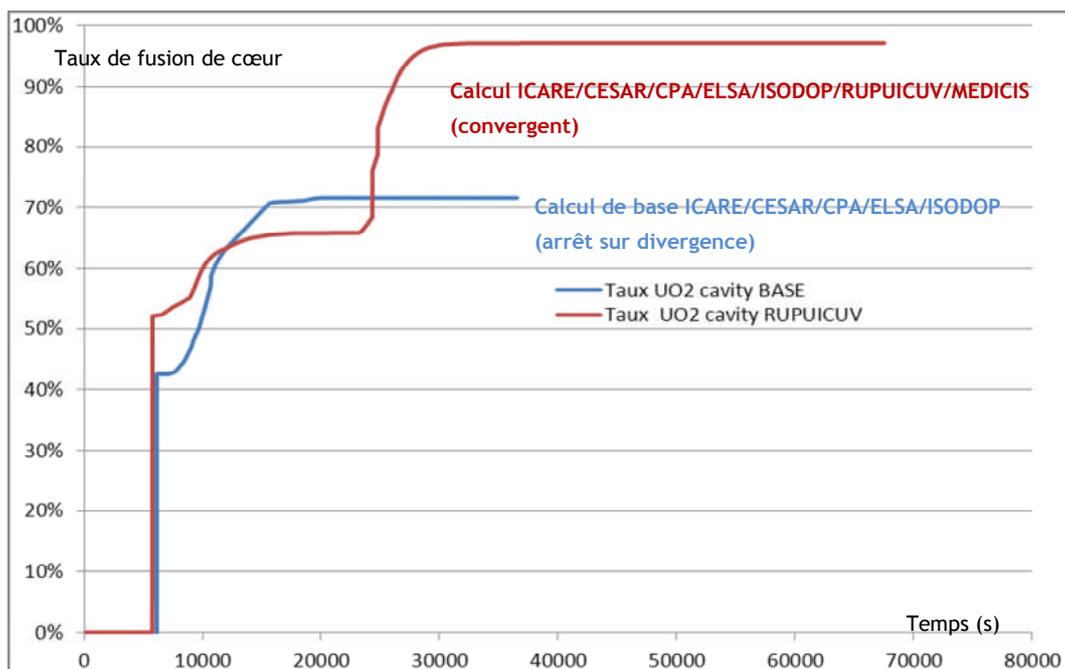


Figure 33 : Utilisation du module RUPUICUV et obtention d'une dégradation totale du cœur à 30000s

² ASTEC v201 patch 2 β + patch additionnel du 12/07/2012 (source/icare/degradation/icare-cavity.f90)

4 CONCLUSION

Un calcul terme source préliminaire a été mené en mettant en œuvre tous les modules d'ASTEC sur une séquence grosse brèche de 12 pouces en branche chaude (avec rétention dans le circuit primaire considérée nulle), avec une modélisation détaillée d'un REP 1300 MWe. Ce calcul donne des résultats cohérents sur les plans de la thermohydraulique globale et du rejet des produits de fission.

Ainsi, pour cette séquence à dégradation de cœur très rapide, le délai de perte de confinement par ouverture du filtre U5 est atteint, sur critère d'ouverture pour une pression de 5.2 bar en enceinte, à -3 jours, soit largement au-delà de la phase de déposition des aérosols. Les Termes Sources, en fraction d'inventaire cœur à l'AAR, actuellement calculés sont de l'ordre de 1 pour les gaz rares, 10^{-4} pour l'iode et 10^{-5} pour le césium, hors filiation dans l'enceinte.

Les prochaines étapes de ce projet ont été définies de la manière suivante (réunion interne du SAG du 02/10/2012) :

1 Basculer le JDD (jeu de données) ASTEC de l'étude terme source dans le système de gestion JPAC.

2 Vérifier l'unicité des modèles ASTEC utilisés pour l'étude terme source.

3 Etablir les hypothèses génériques associées aux études terme source (taux de fuite «nominal» enceinte en distinguant avant et après AG, modèle EDE, hypothèses sur certains modèles - ex : ICB, recombineurs, calculs d'activités en lien avec les besoins SESUC pour les calculs de dispersion atmosphérique ...).

4 Etablir un rapport d'étude détaillé sur le recalcul du scénario APRP BC sans IS et sans EAS et ouverture du dispositif U5, par la méthodologie convergée (calcul tous modules en une seule fois).

Le rapport traitera en particulier les points suivants :

- l'analyse de l'état du corium à la rupture de la cuve et après rupture de la cuve, et l'analyse des dépôts en cuve,
- les hypothèses relatives aux filiations radioactives avec d'éventuelles simplifications,
- l'analyse des températures en phase gazeuse en discutant la validité des modèles de rayonnement des particules vers la phase gaz,
- la description de la répartition de l'eau au fond de l'enceinte et son évolution au cours du temps,
- l'analyse des transferts de PF et gaz dans l'EEE et du risque d'inflammation de l'atmosphère de l'EEE.

L'étude sera menée dans une logique «best-estimate». Les limites d'ASTEC connues seront identifiées (exemple entrée d'air). L'évaluation des incertitudes sera menée dans une étude ultérieure. Les résultats seront comparés à l'étude S3 (2000) de l'IPSN et aux résultats obtenus avec le Modèle d'Evaluation des Rejets de l'EPS2.

5 REFERENCES

- [1] : D. Manesse, A. Fallot, Y. Billarand, M. Durin, *Réévaluation des termes sources de référence, résultats et synthèse*, DPEA/SEAC/2000/073
- [2] : F. Cousin, *Calculs de Terme Source avec le code ASTEC*, DPAM-SEMIC-2011-214
- [3] : G. Nicaise, E. Ben Messaouda, *Analyse de sensibilité sur la chimie des halogènes en accident grave pour la réévaluation du terme source REP 1300 MWe*, DSR/SAGR N°00237
- [4] : S. Phoudiah, *Mise à niveau et description des jeux de données CPA ASTEC v1.2 pour le palier P'4*, DSR/SAGR/06-135
- [5] : M. Baïchi, *Masse, activité et puissance résiduelle des produits de fission pour la gestion Gemmes 4%*, DSR/SAGR/07 N°173