



Diffusé le : Voir code barres ci-dessus

Entité émettrice: **Groupe GC**

Rédacteur : **MASSON B.**

Nbre de pages : 19

Domaine d'application : **P4**

Nbre d'annexes :

Titre : **Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2**

ENSGGC10070	A	← Référence	081151/EDINTE7N
		Code Projet →	

Type de document : **Note d'étude**

Mots clés : FUIITE – ACCIDENT GRAVE – ENCEINTE

Résumé : Cette note présente la démarche d'estimation de la fuite en situation d'accident grave pour une enceinte à double paroi. Le calcul est réalisé pour l'enceinte de Flamanville 2 à 40 ans. La pression de sollicitation est de 6,2 bars absolus.

Rédacteur		Vérificateur		Approbateur			
Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa	Chef d'entité		Chef de rang supérieur	
Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa	Nom-Date	Visa
MASSON B. 20/07/2010		GALLITRE E. 21/07/2010		LAZZARINI P. 27/07/2010			

EVOLUTIONS DES TROIS DERNIERS INDICES

Cocher s'il y a un 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 : NON	Archivé au FDU : OUI	Copyright EDF 2010
Livrable principal : NON		
<input type="checkbox"/> 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.	
<input type="checkbox"/> Restreint	L'initiateur établit une liste explicite des destinataires. Chacun d'eux peut étendre la diffusion sous sa responsabilité (sur la base d'une liste explicite et avec information de l'initiateur).	
<input checked="" type="checkbox"/> Interne	Ne peut être transmis à l'extérieur d'EDF/DPI (et entités autorisées) que par une personne habilitée.	

Ce document contient des informations sensibles relevant du secret et juridiquement protégées. Il est réservé à l'usage exclusif des personnes désignées comme destinataires du document et/ou autorisées à y accéder. Il est illégal de photocopier, distribuer, divulguer, ou d'utiliser de toute autre manière les informations contenues dans ce document sans accord du service émetteur de la DIN.

EDF SEPTEN	Note d'étude ENGSGC100070		Indice A	Page 2/19	
Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2					
FICHE DE GESTION					
Important pour la sûreté (IPS)		OUI <input type="checkbox"/>	NON <input checked="" 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 : VALFORT, GOSSIAX (CIPN) DUBREUIL, LAMBERT, ISARD (7N)					
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'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2****SYNTHÈSE**

Depuis de nombreuses années, EDF s'attache à mieux comprendre et quantifier les fuites des enceintes en béton. Il s'agit d'une part d'anticiper le vieillissement des ouvrages qui se manifeste par une augmentation de la fuite lors des épreuves d'enceinte, et d'autre part, d'être en mesure d'évaluer la fuite en situation accidentelle afin de dimensionner les dispositifs de secours.

Le but de cette note est d'explorer le domaine hors dimensionnement, c'est à dire des conditions de pression et température allant au-delà de celles de l'APRP. Le scénario accidentel étudié comporte une pression maximale de 6,2 bars absolus (pour 4,9 en APRP) et une température de 155°C. L'ouvrage étudié est l'enceinte de Flamanville 2 (palier P4) car elle présente la configuration la plus défavorable pour les enceintes à double paroi : Elle est fondée sur sol dur, ce qui est pénalisant pour les contraintes dans le gousset, et la paroi est mince (0,90 m pour le palier P4 au lieu de 1,20 m pour le palier P'4), ce qui limite la longueur du chemin de fuite. Par ailleurs, elle est le siège de déformations différées importantes.

Le comportement de l'enceinte à 40 ans et durant le scénario d'accident est modélisé en intégrant les paramètres physiques importants : fluage, retrait et séchage du béton, relaxation des câbles, endommagement de la structure. L'endommagement est ensuite traduit en fissuration en utilisant une approche réglementaire (Eurocode II). Enfin, la fuite au travers des fissures est calculée en utilisant un modèle 2D représentant une fissure à travers un bloc de béton où sont représentés les armatures et les câbles de précontrainte. L'effet de circulation du fluide chaud et humide dans la paroi initialement froide est pris en compte.

L'ensemble du calcul est largement conservatif de sorte qu'on aboutit à une borne supérieure de la fuite. De plus, le revêtement posé à l'intrados est considéré inefficace dès le début du scénario, ce qui n'est très vraisemblablement pas le cas même si la qualification des revêtements à l'accident grave n'est pas démontrée.

Les résultats obtenus pour cette situation sont :

- Une zone endommagée de 334m², localisée autour de l'accès matériel, apparaît. Les déformations calculées sur cette zone sont cependant largement surestimées ce qui ne permet pas de calculer un débit de fuite réaliste.
- En dehors de cette zone endommagée, la fuite de l'enceinte à 6,2 bars, atteindrait un pic de 1380Nm³/h pour atteindre 500Nm³/h au bout de 24h.

Au-delà d'une première tentative d'estimation réaliste du débit de fuite en situation d'accident grave, cette note vise à faire un point d'étape des méthodes et outils disponibles au sein d'EDF pour mener à bien de telles simulations. Les résultats montrent qu'un calcul de fuite pertinent en situation accidentelle est accessible. Par rapport au modèle utilisé, les évolutions suivantes sont d'ores et déjà retenues dans un modèle en cours de conception

- Prise en compte du ferrailage passif (utilisation des éléments GRILLE_MEMBRANE) pour limiter l'endommagement calculé.
- Critère de fissuration moins conservatif que celui utilisé dans l'étude à proposer (ϵ_0 de B. Gerard doit pouvoir être augmenté).
- Compatibilité des modèles de fluage et d'endommagement à améliorer (utilisation de BETON_UMLV préconisée).
- Les hypothèses sur la viscosité du mélange dans la fissure (moyenne pondérée par les volumes respectifs des constituants) sont conservatives et peuvent être pénalisantes (la moyenne pondérée par les masses serait largement plus favorable).

**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2**

Une étude destinée à valider l'une ou l'autre des hypothèses devrait être engagée, à condition de disposer de résultats expérimentaux.

A moyen terme, cette étude a également permis de déterminer les leviers sur lesquels il fallait progresser :

- La prise en compte des couplages entre fluage et endommagement améliorera le réalisme du modèle. Cette action est attendue à moyen terme (3-4 ans).
- Amélioration de la prise en compte de la liaison acier béton dans les modèles. Une thèse avec le laboratoire 3SR de l'université de Grenoble est engagée sur cette problématique.

**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2****SOMMAIRE**

1. Références	6
2. Introduction	7
2.1 Contexte	7
2.2 Objectif de la note.....	7
2.3 Plan de la note	7
3. Rappel sur les mécanismes de fuite	7
3.1 La perméabilité du béton	8
3.2 Le béton, matériau fissuré	8
3.2.1 La fissuration pré-existante.....	9
3.2.2 La fissuration due au chargement accidentel.....	10
3.2.3 Calcul analytique du débit massique à travers une fissure	10
3.3 Evolution de la fuite dans le temps	10
3.3.1 Evolution de la fuite au travers du réseau poreux.....	10
3.3.2 Evolution de la fuite au travers des fissures.....	10
3.4 Méthodologie d'évaluation du taux de fuite en accident grave	11
3.4.1 Comportement de l'ouvrage en situation accidentelle	11
3.4.2 Fissuration induite par le chargement.....	13
3.4.3 Calcul de la fuite à travers une fissure	14
3.4.4 Calcul des longueurs de fissures	15
3.5 Calcul de la fuite en situation accidentelle.....	16
3.6 Exploitation des résultats	18
4. Conclusion	18
4.1 Réponse aux objectif.....	18
4.2 Perspectives.....	18

**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2****1. Références**

- [MAS1]** **B. Masson** « Fuites au travers des parois d'enceintes – Synthèse des études et connaissances actuelles (2005) »
Note d'étude SEPTEN ENGSDS050251-A, Sérapis N06D0037106
- [MAS2]** **B. Masson** « Planification Ressources Livrable du lot 8 du projet TE60 »
Note SEPTEN ENGSDS100001-A
- [MAS3]** **B. Masson** « Cahier des charges pour une caractérisation de la liaison acier-béton et de la fissuration dans les ouvrages spéciaux »
Note SEPTEN ENGSDS1000391-A
- [ASTER]** Documentation de Code_Aster® version 8.4

**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2**

2. Introduction

2.1 Contexte

Depuis de nombreuses années, EDF s'attache à mieux comprendre et quantifier les fuites des enceintes en béton. Il s'agit d'une part d'anticiper le vieillissement des ouvrages qui se manifeste notamment par une augmentation de la fuite lors des épreuves enceinte, et d'autre part, d'être en mesure d'évaluer la fuite en situation accidentelle afin de dimensionner les dispositifs de secours. Cette note s'inscrit dans le cadre du projet EV2, et constitue une étape clé dans le programme de travail d'évaluation des fuites en situation d'accident grave [MAS2].

2.2 Objectif de la note

Le but de cette note est d'explorer le domaine hors dimensionnement, c'est à dire des conditions de pression et température allant au-delà de celles de l'APRP. Le scénario accidentel retient une pression maximale de 6,2 bars (pour 4,7 en APRP) et une température de 155°C. L'ouvrage étudié est l'enceinte de Flamanville 2 (palier P4) car elle présente la configuration la plus défavorable pour les enceintes à double paroi. En effet, elle est le siège d'un fluage important et, comme les autres ouvrages du palier P4, possède une paroi plus mince (0,90m) que les autres enceintes à double paroi (1,20m).

Au-delà d'une première tentative d'estimation réaliste du débit de fuite en situation d'accident grave, cette note vise à faire un point d'étape des méthodes et outils disponibles au sein d'EDF pour mener à bien de telles simulations. Elle permettra d'élaborer un programme de travail pour disposer rapidement de modèles réalistes pertinents.

2.3 Plan de la note

Après un rappel des mécanismes de fuites associés aux enceintes en béton, et de leur évolution dans le temps, on propose une méthode d'évaluation de la fuite qui prend en compte, par un calcul aux éléments finis, le vieillissement de l'ouvrage et son endommagement sous chargement sévère. Le problème du passage de l'endommagement à la fissuration est ensuite traité via une approche réglementaire, puis le calcul de la fuite est présenté.

3. Rappel sur les mécanismes de fuite

Par nature, le béton est poreux et enclin à la fissuration, ce qui peut nuire à son étanchéité. Sa composition (le dosage en ciment), l'épaisseur des éléments envisagés, le taux et la répartition des armatures dans le cas du béton armé sont autant de facteurs jouant sur sa perméabilité.

Pour une évaluation de l'étanchéité d'une paroi, il convient donc de s'intéresser aux deux types d'infiltrations que sont les écoulements entre les granulats du matériau et les écoulements au travers des fissures [MAS1].

L'évaluation des fuites par les traversées, de l'ordre de quelques pourcents du taux de fuite global, ne rentre pas dans le cadre de cette étude. On considèrera par la suite que la totalité des fuites transite par le béton.

Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2

3.1 La perméabilité du béton

Le béton est un matériau poreux, c'est à dire qu'il est constitué d'une matrice et d'un espace interstitiel où peuvent coexister de l'air sec, de la vapeur et de l'eau liquide. L'espace interstitiel ou espace poreux connecté est l'espace par l'intermédiaire duquel s'effectuent les échanges de masse fluide. La matrice est alors définie par simple complémentarité avec l'espace précédent. Ainsi, la matrice peut être constituée à la fois d'une partie solide et d'un espace poreux occlus. Le terme de porosité désigne la porosité connectée, égale au rapport du volume de l'espace interstitiel au volume total.

Le milieu poreux [MAS1] est représenté par la superposition dans le temps et dans l'espace de deux milieux continus en interaction, le squelette solide et le fluide interstitiel qui peut comporter différentes phases. Pour le béton, la matrice constitue environ 85 à 90% du volume total (c'est à dire que la porosité représente 10 à 15% de ce volume).

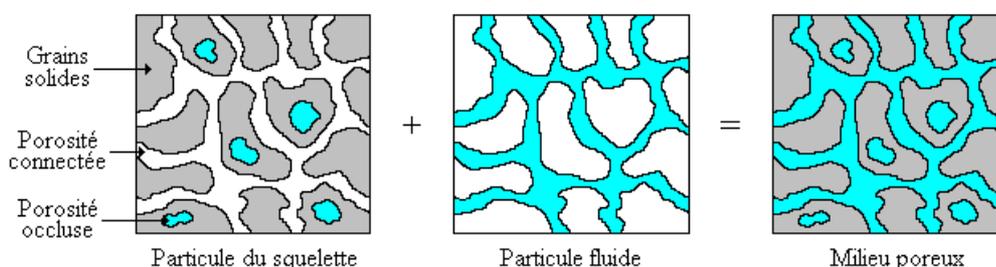


Figure 1: le milieu poreux vu comme la superposition de deux milieux continus

Les transferts à travers le béton poreux sont correctement appréhendés par la **loi de Darcy**. Exprimée en débit massique, elle s'écrit :

$$Q_m = K_{app} S \frac{P_2^2 - P_1^2}{2\mu e T} \cdot \frac{M}{R} \quad \text{où } K \text{ désigne la perméabilité apparente au fluide du milieu.}$$

Les transferts poreux ne représentent qu'une faible part (moins de 20%) du débit de fuite mesuré lors des épreuves enceintes. L'évolution du débit, proportionnel à la différence du carré des pressions, ne présente pas d'effet seuil. Ainsi, en première approximation, le débit de fuite en situation hors dimensionnement serait 1,8 fois plus important qu'à la pression d'APRP. Pour cette étude, qui vise à obtenir des résultats conservatifs, on choisit de traiter la fuite par le réseau poreux comme une fuite à travers une fissure, démarche plus pénalisante.

3.2 Le béton, matériau fissuré

Le second chemin de fuite à considérer est relatif aux fissures.

Parmi les fissures d'une paroi de béton, on peut distinguer les fissures liées au matériau lui-même et à sa mise en oeuvre, ces fissures constituant ce qu'on appellera par la suite les fissures pré existantes, en ce sens qu'elles sont présentes sur l'ouvrage au moment de l'accident, et les fissures directement causées par un chargement thermomécanique.

**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2****3.2.1 La fissuration pré-existante***3.2.1.1 La fissuration d'ordre « technologique »*

Une part importante des fissures constatées sur les enceintes peut être qualifiée d'ordre technologique en ce sens qu'elle est induite par le choix des matériaux, la formulation, ou encore la mise en œuvre du béton. On citera principalement :

- Les fissures dues au tassement du béton frais qui apparaissent quelques heures après le bétonnage, le long des barres ou aux changements de direction mais qui sont en général évitées par des mesures appropriées lors de la construction.
- Les fissures dues au retrait plastique qui apparaissent également quelques heures après le bétonnage, en réseau ou sous forme de longues fissures. Elles sont dues à la sédimentation du béton qui se produit avant sa prise, notamment lorsque la structure du squelette granulaire n'est pas optimum (cas des enceintes de Belleville). Ces fissures peuvent être traversantes.
- Les fissures liées au retrait thermique qui comporte à la fois un effet de masse, puisque l'augmentation de température a pour origine la réaction exothermique d'hydratation du ciment (pendant environ 24h), et un effet de surface puisque le refroidissement se fait à partir des faces de l'élément. Lorsque l'élément est empêché de se déformer, il finit en traction car durant l'élévation de température, le béton est beaucoup plus déformable et fluant que dans la phase de refroidissement. Ce phénomène conduit souvent à des fissures traversantes.
- Les fissures induites par la corrosion des armatures, qui peuvent survenir plusieurs années après la construction, le long des barres. En ambiance humide, elles peuvent conduire à un éclatement du béton d'enrobage sous l'effet du gonflement des produits de corrosion. Les dispositions de conception et celles prises lors de la construction permettent de s'en prémunir efficacement, les enceintes ne sont pas affectées par cette pathologie.
- Les fissures consécutives à la réaction alcali-granulats qui peuvent survenir quelques années après la construction, pour des ambiances humides et avec un certain type de granulats. Cette pathologie n'a toutefois pas encore été identifiée sur les enceintes.
- Les fissures provoquées par la réaction sulfatique interne, dont l'apparition peut être très tardive. La formulation du béton permet de limiter ce phénomène qui n'est à ce jour pas constaté sur les enceintes.
- Les fissures liées au retrait de dessiccation qui se développe à partir des faces exposées au séchage. Les granulats l'entravent et sont à l'origine de contraintes de traction dans la pâte de ciment qui conduisent à des microfissures. Toutefois, le phénomène de séchage est un phénomène très lent si bien qu'en pratique, il n'atteint quasiment jamais le cœur des éléments et reste limité aux bords.
- Les fissures liées au retrait endogène qui affecte la masse entière du béton. Ce retrait est entravé par les granulats, ce qui conduit à des contraintes de traction dans la pâte de ciment qui se concentrent autour des granulats et à un raccourcissement d'ensemble. Ces autocontraintes peuvent conduire à des microfissures réparties dans la masse du béton. Si l'élément est empêché de se raccourcir, les fissures peuvent être traversantes.

On notera que les zones de discontinuité qui engendrent des retraits inhomogènes (entre deux levées, au niveau d'une variation d'épaisseur) favorisent l'apparition des fissures.

**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2****3.2.1.2 Fissures sous sollicitations normales de service**

Par conception, on a cherché à empêcher l'apparition de ces fissures sur les enceintes en limitant les zones tendues à des valeurs non préjudiciables par application d'une précontrainte adéquate. Toutefois, dans les zones singulières, des fissures ont pu apparaître lors des premiers chargements d'épreuve (par exemple, au niveau du gousset qui est le siège d'importantes déformations de flexion en épreuve ou dans la zone de l'accès matériel où le bridage par la traversée est préjudiciable), nécessitant la mise en place de compléments d'étanchéité à ce niveau.

3.2.2 La fissuration due au chargement accidentel

Lors d'un chargement accidentel, les contraintes apparaissant dans la paroi peuvent être largement supérieures à celles évaluées pour le dimensionnement, d'une part parce que la pression d'accident est supérieure à la pression de dimensionnement, et d'autre part parce que les gradients thermiques génèrent des moments importants dans la paroi. Une des difficultés de l'étude est précisément d'évaluer la fissuration induite par ces contraintes.

3.2.3 Calcul analytique du débit massique à travers une fissure

Les formulations analytiques permettent d'appréhender les paramètres clés des écoulements à travers les fissures. Les équations de conservation de la masse, de l'énergie, et la loi des gaz parfaits aboutissent pour un écoulement compressible isotherme entre deux plans parallèles (longueur e , largeur l , écartement w) à la formulation générale du débit massique Q suivante :

$$Q_{\text{réel}} = \xi \frac{lM}{24RT\mu} \frac{(p_1^2 - p_2^2)}{e} w^3$$

où ξ est le coefficient de tortuosité. Ce coefficient est inférieur à l'unité (il varie de 0,08 à 0,7 selon les auteurs, selon les types de béton utilisés et selon les conditions de l'expérience, et est déterminé de façon empirique) puisqu'en effet la tortuosité de la fissure implique des pertes en débit, du fait notamment de la plus grande longueur traversée par le fluide.

Cette formulation, relativement simple d'utilisation, permet d'évaluer le débit à travers la fissure et montre que dès lors que des fissures vont s'ouvrir, l'augmentation de débit, proportionnelle au cube de l'ouverture de fissure, sera très importante.

3.3 Evolution de la fuite dans le temps

L'évolution dans le temps des deux mécanismes de fuite se pose dès lors que l'on s'intéresse à la question de la durée de vie de l'ouvrage.

3.3.1 Evolution de la fuite au travers du réseau poreux

La perméabilité du réseau poreux évolue sous l'effet du séchage qui se poursuit tout au long de la vie de l'ouvrage. Cependant, son impact sur la fuite de l'enceinte est modéré pour des bétons classiques d'enceinte (perméabilité $< 5,10^{-17}$), pour lesquels la fuite à travers le réseau poreux est limitée (cf. : §1.1).

3.3.2 Evolution de la fuite au travers des fissures

Le moteur de l'évolution des fissures existantes est la perte de précontrainte qui évolue sous l'action du fluage du béton de l'enceinte et de la relaxation des câbles. Dans le temps, la compression résiduelle dans la paroi diminue, ce qui peut entraîner :

- Une ouverture plus importante des fissures, la compression au niveau des lèvres de la fissure étant moindre.

**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2**

- Une étendue plus importante des fissures (progression de fissures), voire une apparition de nouvelles fissures, par augmentation des zones tendues en situation d'épreuve ou d'accident sur l'ouvrage.

3.4 Méthodologie d'évaluation du taux de fuite en accident grave

Dans les paragraphes précédents, les deux chemins de fuites possibles à travers une paroi en béton ont été présentés. Pour mettre en oeuvre un calcul de fuite, il convient d'identifier la part respective de chacun des modes de fuite, sachant qu'à chaque type de fuite correspond une physique particulière, que l'on présente sous forme de lois différentes :

- Loi de type Darcy pour les écoulements poreux, avec une évolution linéaire en fonction de la différence des carrés des pressions interne et externe,
- Loi de type Poiseuille, pour les fuites à travers les fissures avec une évolution linéaire en fonction de la différence des carrés des pressions interne et externe et linéaire avec le cube de l'ouverture de fissure. Ce type d'évolution est largement plus pénalisant en terme de fuite.

Pour le calcul du débit de fuite en situation d'accident grave, on considèrera pour limiter les calculs que toutes les fuites transitent par les fissures, ce qui assurera un conservatisme certain aux résultats présentés.

La problématique à résoudre pour le calcul de la fuite est la suivante :

- Quantifier la fissuration existante avant l'accident.
- Déterminer l'état thermo mécanique de l'ouvrage durant l'accident.
- Quantifier et localiser les fissures induites par le chargement accidentel.
- Calculer le débit de fuite transitant par les fissures, en tenant compte du couplage fluide-structure.

Le calcul est décomposé en deux phases :

- Une première phase avec un modèle d'enceinte complète qui permet, en prenant en compte le vieillissement de l'ouvrage, d'établir l'état thermo mécanique de l'ouvrage durant le scénario accidentel. Les résultats obtenus à l'aide de ce modèle permettent également de déterminer les nouvelles fissures résultant de l'endommagement de la paroi.
- Une seconde phase où l'on évalue la fuite à l'aide d'un modèle 2D de fissure. Ce modèle présente l'avantage de pouvoir prendre en compte l'interaction fluide-structure et les changements de phase du fluide à l'intérieur de la fissure.

3.4.1 Comportement de l'ouvrage en situation accidentelle

Le comportement de l'enceinte est simulé pour une situation accidentelle survenant après 40 ans d'exploitation en prenant en compte le séchage de l'ouvrage, le retrait et le fluage du béton, la relaxation des câbles de précontrainte depuis la fin de la construction. On retient pour le béton une loi de comportement endommageable (loi de Mazars) qui permet de prendre en compte la redistribution de contraintes qui s'opère lorsque la paroi s'endommage.

Dès que le béton a atteint sa limite de plasticité, des fissures apparaissent et la contrainte diminue. Le comportement du béton est ainsi qualifié d'élastique à écrouissage négatif, il est représenté sur la figure ci dessous.

Le modèle de comportement de Mazars [ASTER] est un modèle simple, réputé robuste, basé sur la mécanique de l'endommagement, qui permet de décrire la diminution de la rigidité du matériau sous l'effet de la création de micro-fissures dans le béton. Il s'appuie sur

**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2**

une seule variable interne scalaire D , décrivant l'endommagement de façon isotrope, mais distinguant malgré tout l'endommagement de traction et l'endommagement de compression.

Outre les paramètres thermo-élastiques E , ν , α , le modèle de Mazars fait intervenir 6 paramètres matériau : A_c , B_c , A_t , B_t , ε_{d0} et β (indice c pour la phase de compression, t pour la phase de traction).

- ε_{d0} est le seuil d'endommagement. Il agit évidemment sur la contrainte au pic mais également sur la forme de la courbe post-pic. En effet, la chute de contrainte est d'autant moins brutale que ε_{d0} est petit. La limite en traction du béton de Flamanville étant de $\sigma_{d0}=3,18$ MPa, il vient $\varepsilon_{d0}=0,86 \cdot 10^{-4}$.
- A introduit une asymptote horizontale qui est l'axe des ε pour $A = 1$ et l'horizontale passant par le pic pour $A = 0$. Ce paramètre traduit la capacité du matériau à reprendre des efforts une fois endommagé. A_c est compris entre 1 et 1,15 (on prend 1,01). Pour A_t , on prend $A_t=0,8$ valeur classiquement utilisée. Les aciers passifs n'étant pas modélisés, une valeur plus faible de A_t aurait pu être utilisée, traduisant le fait qu'une partie des efforts est reprise par ces aciers.
- B selon sa valeur peut correspondre à une chute brutale de contrainte ($B > 10\ 000$) ou une phase préliminaire d'accroissement de contrainte suivie, après passage par un maximum, d'une décroissance plus ou moins rapide comme on peut le voir sur la figure ci dessous. En général B_c est compris entre 1000 et 2000 (on prend 1500) et B_t entre 10 000 et 100 000 (on prend 15000).
- β est un facteur correctif permettant d'améliorer la réponse en cisaillement par rapport à la version initiale du modèle (qui correspond à $\beta=1$ qui est la valeur choisie ici).

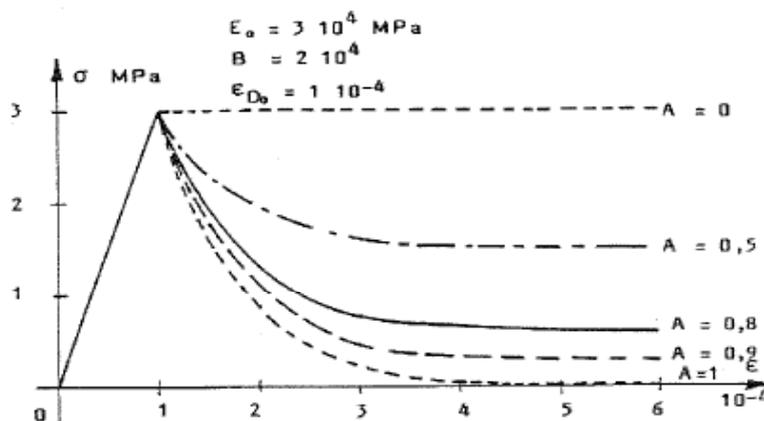
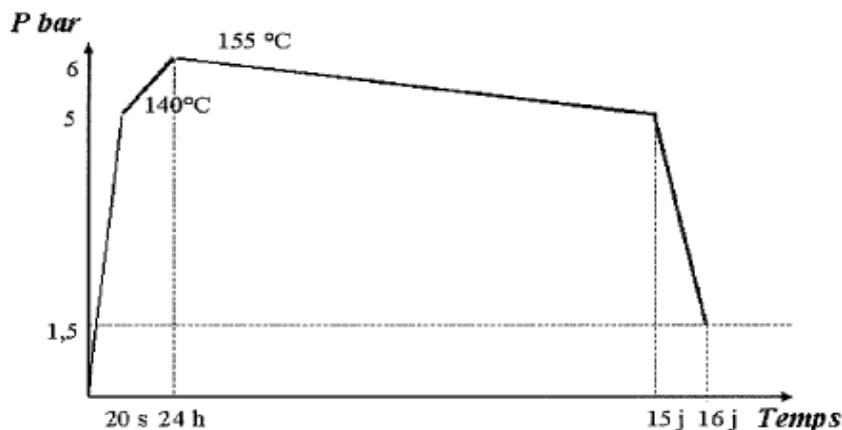


Figure 2 : loi de Mazars

Le comportement de l'ouvrage est simulé en appliquant les conditions de pression et température de l'accident (Figure 3) sur l'intrados de la paroi. Pour l'extrados, on considère la situation hivernale ($T=15^\circ\text{C}$) plus pénalisante car augmentant les moments thermiques. Pour chaque instant du scénario accidentel, on calcule les déformations mécaniques, les déformations totales, les contraintes dans la paroi.

**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2***Figure 3 : scénario accidentel***3.4.2 Fissuration induite par le chargement**

La localisation des fissures est un problème délicat, qui ne peut pas être à ce jour considéré comme résolu par les modèles numériques. On se propose donc d'utiliser une approche réglementaire (Eurocode 2), détaillée ci dessous, pour estimer ces nouvelles fissures. Au préalable, la zone endommagée aura été déterminée par le calcul éléments finis, en retenant un critère d'endommagement adapté. Une difficulté de cette approche est donc de déterminer le seuil de fissuration traversante. Les essais de la littérature ne concernent que des éprouvettes ou tirants peu représentatifs d'une paroi fortement armée. Si on retient le seuil de rupture (ce qui correspond à l'extrémité des courbes de la Figure 2), on ne tient pas compte du réseau de fissures qui se crée avant rupture et qui contribue à augmenter la fuite. Cette approche non conservatrice n'est pas retenue. Dans la thèse de B. Gerard (LMT-Cachan-1996, p126), il est constaté que la perméabilité d'une éprouvette augmente d'un facteur 100 lorsque l'on dépasse le seuil d'endommagement de Mazars de 46%. Cette approche est retenue pour l'étude, bien que probablement très conservatrice compte tenu de l'épaisseur et du ferrailage de la paroi. Elle conduit à proposer le critère suivant : la paroi est endommagée si sur 85% de son épaisseur (en pratique 5 noeuds sur 6), la déformation mécanique (sans effet thermique) dépasse la valeur de 126 μm , seuil défini comme étant la valeur ε_{d0} du critère de Mazars majoré de 46%.

L'application de ce critère conduit, en intégrant les zones endommagées sur la totalité du scénario accidentel, à un endommagement de 334 m² de la paroi, localisé dans la zone de l'accès matériel. A titre d'exemple, la Figure 4 présente l'endommagement à 24 h. On constate que la zone de l'accès matériel est endommagée dans l'épaisseur, le reste de l'ouvrage restant sain (sauf l'extrados de la paroi qui est en traction et endommagé en surface).

**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2**

Figure 4 : endommagement à 24 h

3.4.3 Calcul de la fuite à travers une fissure

Le calcul de fuite à travers une fissure est réalisé à l'aide d'un modèle 2D représentant une fissure à travers une paroi d'enceinte (Figure 5). Le calcul d'écoulement (1D) est couplé au calcul mécanique, de sorte que l'échange thermique entre le fluide et les lèvres de la fissure et l'effet de la pression du fluide sur la fissure sont pris en compte. Au bord du modèle, les déformations de la paroi (déformations normales moyennes dans l'épaisseur), en essai ou en accident, calculées sur le modèle 3D, sont imposées sous forme de déplacements. Les conditions de pression, température et hygrométrie du fluide sont prises en compte pour le calcul d'écoulement. La viscosité dynamique moyenne du mélange est prise comme étant égale à la moyenne des viscosités des constituants du mélange pondérée des volumes respectifs des différents constituants. Cette hypothèse est conservative par rapport à une pondération par les masses qui pourrait être envisagée, à condition toutefois d'être validée sur des résultats expérimentaux.

**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2**

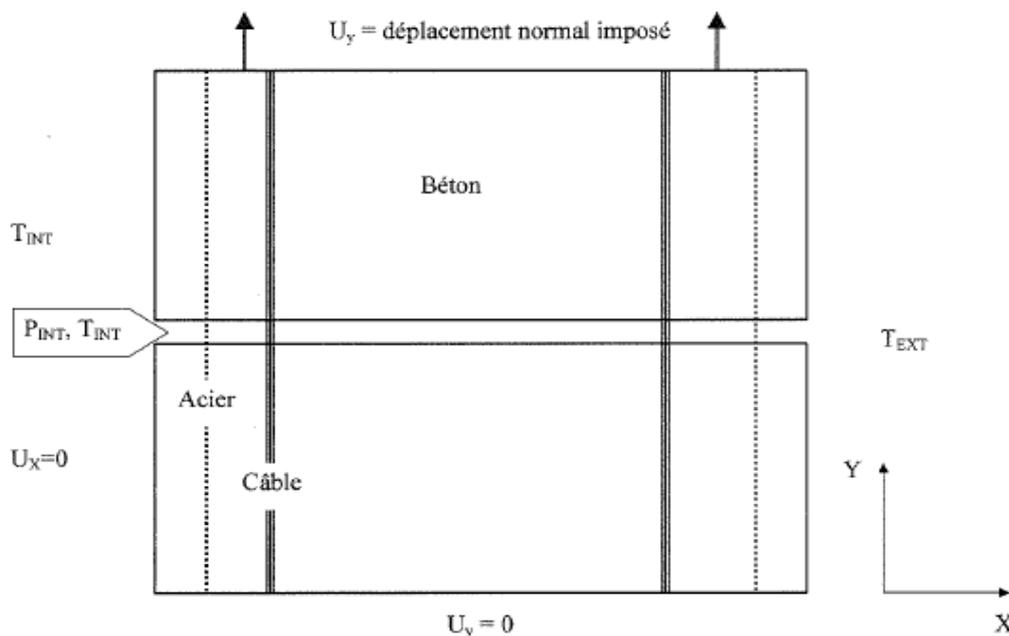


Figure 5 : modèle 2D de fissure à travers une paroi d'enceinte

Le résultat du calcul fournit le débit massique total ainsi que les débits en air sec, en vapeur et en eau.

3.4.4 Calcul des longueurs de fissures

3.4.4.1 Fissures pré-existantes

Les fissures pré existantes sont celles qui existent avant l'accident, donc en particulier au moment de l'épreuve enceinte. Les mesures réalisées montrent, sauf cas particulier, que les fissures restent comprimées en épreuve. En imposant donc un déplacement nul sur le modèle 2D de fissure, et en considérant que les fissures ont une ouverture apparente de $20\mu\text{m}$ (valeur courante dans la littérature, cohérente avec les essais réalisés sur dalles épaisses représentatives de la paroi d'enceinte), on obtient pour la totalité de l'ouvrage 1659m de fissures. Cette valeur est basée sur l'essai VD1 où la fuite mesurée sur le fût, hors zone du TAM, était de $150\text{ Nm}^3/\text{h}$. Il est légitime de ne pas retenir la zone du TAM dans le calcul de la longueur fissurée car les fissures de cette zone seront intégrées dans le calcul de longueur de fissures de la zone endommagée.

3.4.4.2 Fissures créées par le chargement

La zone endommagée a été déterminée au §2.2. Elle s'étend sur 334 m². Le linéaire de fissures de cette zone est calculé à partir de l'approche réglementaire de l'Eurocode 2. La démarche est résumée dans les lignes suivantes.

L'espacement maximum entre fissures (cas où l'entraxe entre les armatures est suffisamment faible $<5(c+\Phi)/2$, c épaisseur d'enrobage) est donné par la formule suivante :

$$s_{r,\max} = 3,4c + 0,425 \times 0,8 \frac{\phi}{\rho_{p,\text{eff}}}$$

**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2**

où l'on tient compte des différentes sections des aciers passifs Φ_1 , Φ_2 par l'expression suivante :

$$\phi = \frac{n_1 \phi_1^2 + n_2 \phi_2^2}{n_1 \phi_1 + n_2 \phi_2}$$

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s + \xi \frac{\phi_s}{\phi_p} A_p}{A_{c,eff}}$$

où ξ est le ratio des contraintes d'adhérence acier-béton pour les aciers passifs et les câbles de précontrainte et avec :

$A_{c,eff}$ aire de section effective de béton autour des armatures tendues,

A_x aire d'acier passif (indice s) ou de précontrainte (indice p).

L'application de l'Eurocode 2, en fonction du ferrailage de la paroi en zone courante conduit sur les 334m² endommagés à un pas de fissuration de 341 mm soit environ 980 m de fissures créées. On notera que l'approche réglementaire est conservatrice, d'une part car on ne tient pas compte de la surépaisseur au niveau de l'accès matériel, d'autre part car l'Eurocode n'est pas spécifiquement adapté pour les parois épaisses (ce qui a été démontré sur les essais MAEVA).

3.5 Calcul de la fuite en situation accidentelle

Afin de limiter les calculs, seules deux zones de l'enceintes sont prises en compte : la zone courante de l'enceinte et la zone endommagée. Les déformations imposées aux différents instants sont obtenues par moyenne des déformations dans l'épaisseur sur la zone considérée (Figure 6).

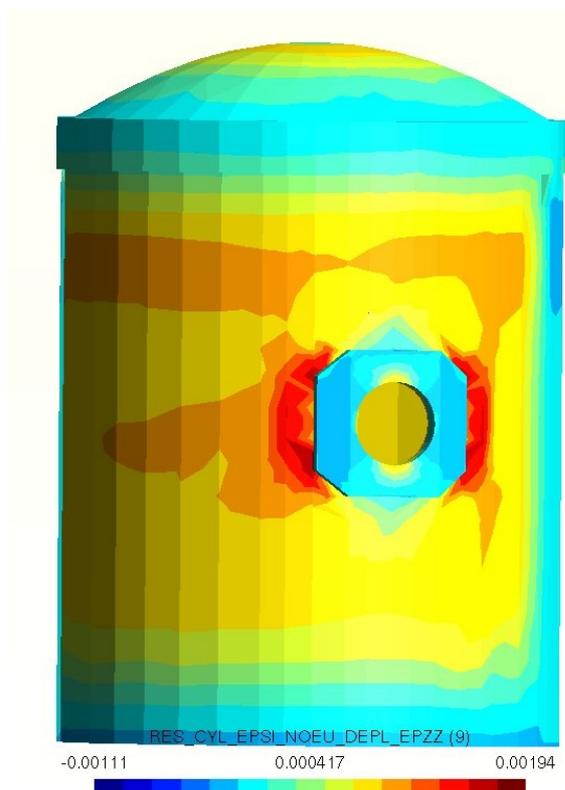
**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2**

Figure 6 : déformations tangentielles $\epsilon_{\theta\theta}$ à 24h

Comme cela a été souligné, le modèle n'intègre pas le ferrailage passif ce qui conduit à surestimer les déformations, en particulier dans la zone endommagée. L'ouverture de fissure alors calculée est largement majorée (on obtient quelques fissures dont l'ouverture atteint plusieurs mm) et les débits, qui évoluent en fonction du cube de l'ouverture de fissure, ne sont plus réalistes. On ne présente ici (Figure 7) que les débits de fuites calculés pour la zone non endommagée.

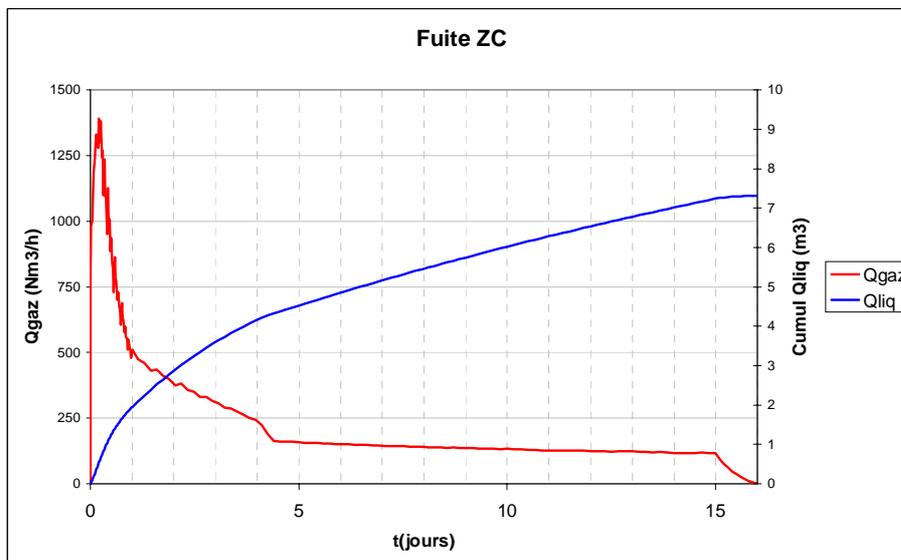


Figure 7 : taux de fuite hors Z

**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2**

Hors de la zone endommagée pour laquelle le calcul n'est pas adapté faute d'avoir pris en compte le ferrailage passif, le débit de fuite de l'enceinte atteint un niveau élevé de 1380 Nm³/h (env 8%). Au bout de 24h, alors que l'on atteint le pic de pression (6,2 bar), le débit de fuite a fortement diminué du fait de la re-fermeture des fissures par effet thermique. On constate qu'un débit liquide apparaît, résultat de la condensation d'une partie de la vapeur dans les fissures.

3.6 Exploitation des résultats

Le calcul de fuite en zone endommagée, qui correspond à la zone de l'accès matériel, n'est pas exploitable car non pertinent. Cette zone est cependant masquée par les revêtements d'étanchéité appliqués à l'intrados de la paroi. Si l'on suppose que ceux ci restent efficaces, ce qui n'est pas démontré pour l'accident grave, la fuite de l'enceinte est donnée par la fuite de la zone courante dont le calcul est conservatif.

4. Conclusion

4.1 Réponse aux objectifs

Cette note n'a pas entièrement répondu aux objectifs puisque le débit de fuite calculé en accident grave (6,2 bars absolus) n'est pas jugé réaliste, le modèle n'étant pas pertinent en zone endommagée. Elle démontre cependant qu'un tel calcul est réalisable avec les outils EDF (Code_Aster® et Ecrevisse) mais qu'une adaptation du modèle doit être réalisée pour tout à la fois limiter les conservatismes et rendre le modèle représentatif en zone endommagée.

4.2 Perspectives

L'étude a mis en évidence que pour améliorer la méthode d'évaluation réaliste de la fuite, le modèle doit être ainsi élaboré:

- Il doit représenter l'enceinte entière, la liaison au sol pouvant être traitée par un modèle type bac de sol ou par des ressorts de sol représentatifs de la raideur de ce dernier.
- Les câbles doivent être représentés un à un (pas d'agrégation), avec leurs déviations.
- En plus de l'accès matériel, les principales traversées doivent être modélisées. Pour la prochaine étude, les deux sas personnels seront intégrés au modèle.
- La compatibilité des modèles de fluage et d'endommagement sera assurée en utilisant la modélisation BETON_UMLV associée au modèle d'endommagement de Mazars en non local, choisi pour sa robustesse et sa simplicité relative.
- Le critère de fissuration retenu (déformation du béton de $1,2 \cdot 10^{-4}$ m/m) doit être ré examiné pour une paroi d'enceinte. Il apparaît trop défavorable.

Deux modèles, l'un pour le palier P4, l'autre pour le palier P'4 sont en cours de construction avec ces recommandations (cf PMP projet EV2 [MAS2]). Les résultats seront disponibles au second semestre 2010.

A moyen terme (3-4 ans), le passage endommagement-fissuration, actuellement traité via une approche réglementaire, sera ré examiné :

**Méthodologie d'estimation réaliste du débit de fuite en Accident Grave
d'une enceinte à double paroi – application à Flamanville 2**

- Via le projet ANR CEOS.fr (Comportement et Evaluation des Ouvrages Spéciaux, fissuration-retrait) dont l'un des objectifs est l'adaptation des règlements existants aux pièces de fortes sections.
- A travers une nouvelle approche numérique en collaboration avec le laboratoire 3SR de l'université de Grenoble [MAS3].

Egalement, la prise en compte des couplages entre fluage et endommagement améliorera le réalisme du modèle de même que la prise en compte des caractéristiques de la liaison acier béton par le développement de nouveaux éléments, en collaboration avec R&D et le laboratoire 3SR.