



Diffusé le Voir code barres ci-dessus

Réf. ENGSGC070091-A

Entité émettrice **Génie Civil - Installation - Structures**

Rédacteur **D. CREMIEUX**

Nbre de pages **24**

Domaine d'application **REP hors EPR**

Nbre d'annexes **4**

Titre **Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise**

ENGSGC070091	A	← Référence	E264/005921/E001N
		Code Projet →	

Type de document . **Note d'étude**

Mots clés . Enceintes – Confinement – Etanchéité – Crise

Résumé : Suite au dépassement du critère d'étanchéité lors de certaines épreuves sur des Enceintes à Double Paroi, le GCAC (Groupe de Coordination des Activités de Crise : mixte EDF-IRSN) a demandé la ré-évaluation des taux de fuite à prendre en compte en cas de crise pour ces réacteurs C'est dans ce but que la présente note synthétise les résultats d'études récentes

Un taux de fuite moyen constant de 0,05%/jour est proposé pour les Enceintes à Simple Paroi pour des pressions comprises entre 0,2 et 0,6 MPa absolus.

Les Enceintes à Double Paroi sont classées en 3 familles (Sensibles, Moyennes et Non Sensibles) Leurs taux de fuite évoluent avec la pression et la dose intégrée par les revêtements (influençant leur efficacité). Les estimations varient de 0,2 à 12%/jour

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
D. CREMIEUX 17/09/2007		E. GALLITRE 17/09/07		P. LAZZARINI 19/09/07			

Evolutions des trois derniers indices

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

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

Archivage long	OUI	Archivé au FDU	OUI	Copyright EDF 2007
<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"/> Dif Restreinte	L'initiateur établit une liste explicite des destinataires Le chef de service d'un destinataire peut étendre la diffusion sous sa responsabilité et dans sa Direction (sur la base d'une liste explicite)			
<input checked="" type="checkbox"/> Accès E D F	Ne peut être transmis à l'extérieur d'EDF que par un chef de service			
<input type="checkbox"/> Accès libre	Document public			

EDF SEPTEN		Note d'étude ENGSGC070091			Indice A	Page 2/24
Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise						
FICHE DE GESTION						
Important pour la sûreté (IPS)		OUI <input checked="" type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/>				
Document HPIC .				OUI <input type="checkbox"/>	NON <input checked="" 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"/>	
Auprès de V DELAMARE, G COUDERT (UNIE/SONC) MT. BLANCHARD, A. DUBREUIL-CHAMBARDEL (SEPTEN/SN) JP PERRIN (SEPTEN/DP) A. SEROT (SEPTEN/FC) F ANDREO (SEPTEN/TE) E GALLITRE, S GUIEU (SEPTEN/GS)						
Existe-t-il un dossier d'étude associé à la note à cet indice ?				OUI <input checked="" type="checkbox"/>	NON <input type="checkbox"/>	
Note support à une position technique formalisée du SEPTEN				OUI <input type="checkbox"/>	NON <input checked="" type="checkbox"/>	
Contrôle linguistique renforcé				OUI <input type="checkbox"/>	NON <input checked="" type="checkbox"/>	

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise**SYNTHÈSE**

Les Epreuves Enceintes réalisées sur le parc nucléaire d'EDF ont mis en évidence que le taux de fuite de l'enceinte retenu dans les outils de crise pour les tranches de 1300 et 1450 MWe, était dans certains cas, sous-évalué. Il a donc été acté, à la première réunion du GCAC (cf [GCAC1]), que ces taux soient réévalués en conséquence

D'après trois documents récents sur ce sujet mais élaborés pour d'autres finalités ([Trav900], [TravP4] et [EDPAG]), la présente note propose des taux de fuite réalistes moyens pour l'ensemble des enceintes de confinement du parc nucléaire d'EDF à utiliser en cas de crise

Les fuites estimées sont séparées en 2 catégories, collectées et non collectées. Les fuites non collectées n'étant pas parfaitement filtrées, elles peuvent contribuer aux conséquences radiologiques, mais cet aspect n'est pas intégré à la présente étude.

Si l'analyse pour les Enceintes à Simple Paroi du parc de 900 MWe ne présente pas de difficulté particulière, plusieurs hypothèses simplificatrices ont été prises pour les Enceintes à Double Paroi afin de fournir des estimations réalistes et exploitables en situation de crise .

- l'étanchéité des EDP évoluant avec le temps sous l'effet du retrait-fluage du béton, elle est estimée, de façon conservatrice **après 40 ans d'exploitation** ;
- **aucune fuite par le radier** n'est prise en compte, celui-ci étant considéré noyé ,
- les fuites par le béton sont estimées avec les formules de **Darcy** (fuite diffuse dont le débit est proportionnel à une perméabilité K) et de **Poiseuille** (fuite par des fissures dont le débit est proportionnel à leur longueur L et au cube de leur ouverture w) ;
- l'**efficacité du revêtement** composite est supposée décroissante à partir du relâchement massif de produits de fission dans le BR ou tant que la température est supérieure à 100°C, elle est prise nulle après 48 h à plus de 100°C ,
- les EDP sont classées en **3 familles** : 11 Enceintes Non Sensibles, 8 Enceintes Moyennes et 5 Enceintes Sensibles (cf Annexe 2)

Pour les Enceintes à Simple Paroi, on retiendra que **les fuites non collectées représentent 15% d'une fuite totale relativement faible dont le taux est indépendant de la pression 0,05%/j de 0,2 à 0,6 MPa abs.**

Pour les Enceintes à Double Paroi, on retiendra que :

- ✓ **le taux de fuite dépend de la nature de l'enceinte et il évolue avec la pression, la température dans le BR et la dose intégrée par les revêtements** (impactant leur efficacité). Il paraît nécessaire de prendre en compte ces paramètres afin de garder un bon niveau de réalisme. Entre 0,2 et 0,6 MPa absolu, le taux de fuite moyen varie
 - de 0,4 à 12%/jour pour les Enceintes Sensibles,
 - de 0,3 à 7%/jour pour les Moyennes et
 - de 0,2 à 2,2%/jour pour les Non Sensibles ;
- ✓ **les fuites non collectées représentent de 0,01 à 0,6% de la fuite totale** (minimum dans le cas d'une Enceinte Sensible à pression élevée et maximum dans le cas d'une Enceinte Non Sensible à faible pression) ,
- ✓ **les fuites des Parois Externes sont directes, leur taux, indépendant de la pression est de 0,5% du volume délimité par leur parement interne sous 3 hPa de dépression.**

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise**SOMMAIRE**

1. Références	5
2. Introduction.....	5
2.1 Contexte	5
2.2 Objectif de la note	5
2.3 Abréviations.....	6
2.4 Rappel de conception	6
3. Enceintes à Simple Paroi	7
3.1 Fuites par les traversées.....	7
3.2 Fuites par la peau	7
3.3 Extrapolations.....	7
3.4 Synthèse.....	8
4. Enceintes à Double Paroi	9
4.1 Hypothèses relatives à la nature des fuites	9
4.2 Classement des EDP	9
4.3 Hypothèses relatives au calcul des fuites par le béton	10
4.4 Tenue des revêtements.....	11
4.5 Fuite transitante.....	12
4.6 Fuite non transitante	14
4.7 Synthèse sur les Parois Internes	15
4.8 Fuite de la Paroi Externe.....	18
5. Conclusion	20
Annexe 1 : Débit de fuite volumique moyen des ESP	21
Annexe 2 : Proposition de classement des EDP	21
Annexe 3 : Graphiques des fuites transitantes pour chaque type d'EDP	22
Annexe 4 : Débit de fuite volumique moyen des EDP	24

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise**1. Références**

- [GCAC1] Fiche technique IRSN DE/SESUC/06-82 . Compte-rendu de la première réunion du Groupe de Coordination des Activités de Crise (Serapis N06A0056804)
- [GTGCAC3] Compte-rendu IRSN 07-016 de la 3^{ème} réunion du GT GCAC du 14/11/2006 (Serapis N07A0072106)
- [Trav900] Note d'étude EDF ENGSGC060126-A : Estimation et répartition des fuites par les traversées en AG (Serapis N06D0039042)
- [TravP4] Note d'étude EDF ENGSGC070171-A : Estimation et répartition des fuites par les traversées des enceintes de type P4 en situation d'AG (Serapis N07D0052173)
- [EDPAG] Note d'étude EDF ENGSGC060438-A . Evaluation du débit de fuite des Enceintes à Double Paroi en Accident Grave (Serapis N06D0045805)
- [QualRev] Note technique ENSGC9900544-A : Enceinte de confinement – Synthèse des résultats d'essais de qualification des revêtements susceptibles de résister à la fissuration (Osiris 99D09094)
- [RevAG1] Note ENSGC0000204-A : Revêtements d'étanchéité des enceintes à double paroi – Bilan des résultats d'essais disponibles en vue de l'analyse du comportement en situation d'Accident Grave (Osiris 00D03010)
- [RevAG2] Fiche de communication ENGSGC060288 . Réévaluation des doses intégrées par les matériels en AG – comportement des revêtements d'étanchéité des enceintes à double paroi (Serapis N06D0041439)
- [Dose] Note d'étude ENTERP030121-A : Evaluation des doses intégrées par les matériels en accident grave (Serapis N04D0024946)

2. Introduction**2.1 Contexte**

Les Epreuves Enceintes réalisées sur le parc nucléaire d'EDF ont mis en évidence que le taux de fuite de l'enceinte retenu dans les outils de crise pour les tranches de 1300 et 1450 MWe, était dans certains cas, sous-évalué. Il a donc été acté, à la première réunion du GCAC (cf. [GCAC1]) que ces taux soient réévalués en conséquence.

2.2 Objectif de la note

D'après trois documents récents sur ce sujet mais élaborés pour d'autres finalités ([Trav900], [TravP4] et [EDPAG]), la présente note propose des taux de fuite réalistes moyens pour l'ensemble des enceintes de confinement du parc nucléaire d'EDF à utiliser en cas de crise.

Les fuites estimées sont séparées en 2 catégories, collectées et non collectées. Les fuites non collectées n'étant pas parfaitement filtrées, elles peuvent contribuer aux conséquences radiologiques, mais cet aspect n'est pas intégré à la présente étude.

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise

2.3 Abréviations

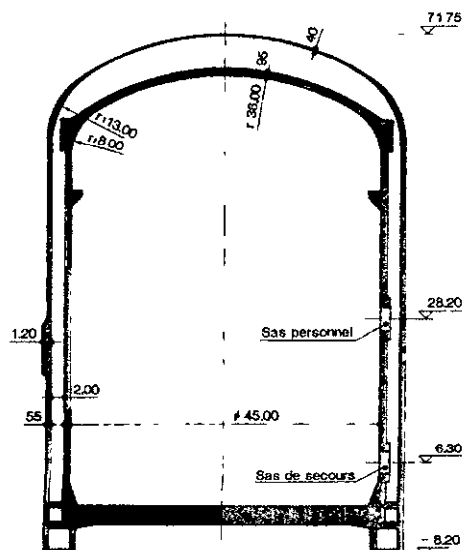
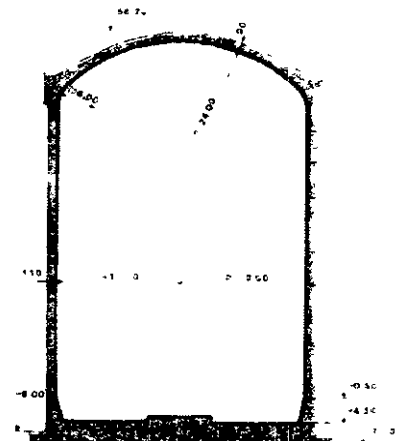
AG	Accident Grave
APRP	Accident de Perte du Réfrigérant Primaire
BR	Bâtiment Réacteur
DAC	Décret d'Autorisation de Création
EDE	Système de mise en dépression de l'espace entre enceintes
EDP	Enceinte à Double Paroi
EE	Epreuve Enceinte
EEE	Espace Entre Enceintes
EM	Enceinte (à double paroi) Moyenne
ENS	Enceinte (à double paroi) Non Sensible
ES	Enceinte (à double paroi) Sensible
ESP	Enceinte à Simple Paroi
GCAC	Groupe de Coordination des Activités de Crise (mixte EDF-IRSN)
TAM	Tampon de l'Accès des Matériels

2.4 Rappel de conception

Il existe deux types d'enceintes de confinement sur le parc nucléaire d'EDF en exploitation.

Les enceintes des 34 premiers réacteurs (de 900 MWe) sont constituées d'une paroi en béton précontraint dans laquelle est ancrée une **peau métallique** de 6 mm assurant l'étanchéité. On parle alors d'Enceinte à Simple Paroi.

Les fuites potentielles au travers de ce type d'enceinte se trouvent donc principalement au niveau des traversées. Selon leur localisation, soit elles sont collectées par le système de ventilation d'un bâtiment adjacent, soit elles partent dans l'environnement extérieur.



La conception des enceintes des 24 réacteurs suivants (de 1300 et de 1450 MWe) est très différente : le confinement repose sur la conjonction d'une **étanchéité statique** (béton précontraint de la Paroi Interne) **et** une **étanchéité dynamique** (système de mise en dépression de l'espace entre les Parois Interne et Externe). On parle alors d'Enceinte à Double Paroi.

Les fuites potentielles au travers des Parois Internes se trouvent également au niveau des traversées, mais surtout au travers du béton. Seules les fuites au niveau de rares traversées comme le TAM ne sont pas collectées ; les autres le sont dans l'Espace Entre Enceintes ou les bâtiments adjacents par les systèmes de ventilation associés.

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise**3. Enceintes à Simple Paroi****3.1 Fuites par les traversées**

Le document [Trav900] fournit une analyse statistique des fuites en air aux traversées dans une configuration de type Accident Grave tous les organes d'isolement intérieurs au BR sont considérés ouverts ; les extérieurs sont supposés fermés (si besoin, manuellement).

Ces estimations sont issues des résultats des essais périodiques réalisés entre 1996 et 2001 sur le palier CPY (par manque d'élément sur le CP0, ces données sont jugées représentatives de toutes les ESP)

Nota : la présente analyse est limitée à l'enceinte. Si les fuites non collectées sont clairement identifiées, une part non négligeable des produits de fission collectés par les systèmes de ventilation-filtration des bâtiments adjacents ne sont pas piégés. Ils peuvent donc contribuer aux conséquences radiologiques de l'accident considéré, mais ils ne sont pas comptabilisés dans la présente étude.

Donnés en Nm³ d'air par heure à 0,5 MPa absolus dans la note [Trav900], les débits volumiques moyens ont été convertis en débits massiques moyens pour un mélange air+vapeur à 140°C de 24 g/mol (environ 60% de vapeur et 40% d'air) .

	Fuite totale par les traversées	Fuite non collectée	Fuite collectée
Débit volumique moyen en air (en Nm ³ /h)	3,2	0,15	3,0
Débit massique moyen en air+vapeur à 140°C (en kg/h)	3,3	0,16	3,1

D'autre part, le document [Trav900] donne aussi la moyenne des fuites en air avec les 2 organes d'isolement fermés (cas de l'épreuve enceinte) : 1 Nm³/h

3.2 Fuites par la peau

La moyenne des Epreuves Enceintes réalisées sur l'ensemble du parc des enceintes CPY entre 1996 et 2001 est de 1,46 Nm³/h à 0,5 MPa absolus.

Ainsi, on peut estimer un ordre de grandeur des fuites par la peau : 1,46 - 1 = 0,46 Nm³/h, soit **0,5 kg/h** en air+vapeur à 140°C

Cette fuite se décompose, au prorata des surfaces de l'enceinte donnant sur un bâtiment ventilé (10%) ou à l'extérieur (90%) en **0,45 kg/h de fuite non collectée** et **0,05 kg/h de fuite collectée**

3.3 Extrapolations

L'écoulement des fuites par les traversées est turbulent. Pour l'estimer, on applique donc la formule de Nikuradze dans laquelle la pression intervient en $(P_{\text{amont}}^2 - P_{\text{aval}}^2)^{1/2}$.

D'autre part, l'étanchéité des ESP ne variant pas de façon régulière avec le temps, aucune majoration n'est prise en compte.

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise

3.4 Synthèse

D'après les éléments qui précèdent, on déduit les débits massiques et volumiques en air+vapeur à 140°C, les taux de fuite et les ratios rassemblés dans le tableau suivant et tracés sur le graphique 3.4 (les débits de fuite volumiques sont donnés en Annexe 1) :

Pression dans le BR (MPa abs.)	Taux de fuite (% <u>masse</u> de gaz / jour)	Fuite totale (kg/h)	Fuite collectée (kg/h)	Fuite non collectée (kg/h)	Ratio fuite non collectée / totale
0,1	0	0	0	0	-
0,2	0,05	1,3	1,1	0,2	15 %
0,3	0,05	2,2	1,8	0,3	15 %
0,4	0,05	2,9	2,5	0,5	15 %
0,5	0,05	3,7	3,1	0,6	15 %
0,6	0,05	4,5	3,8	0,7	15 %

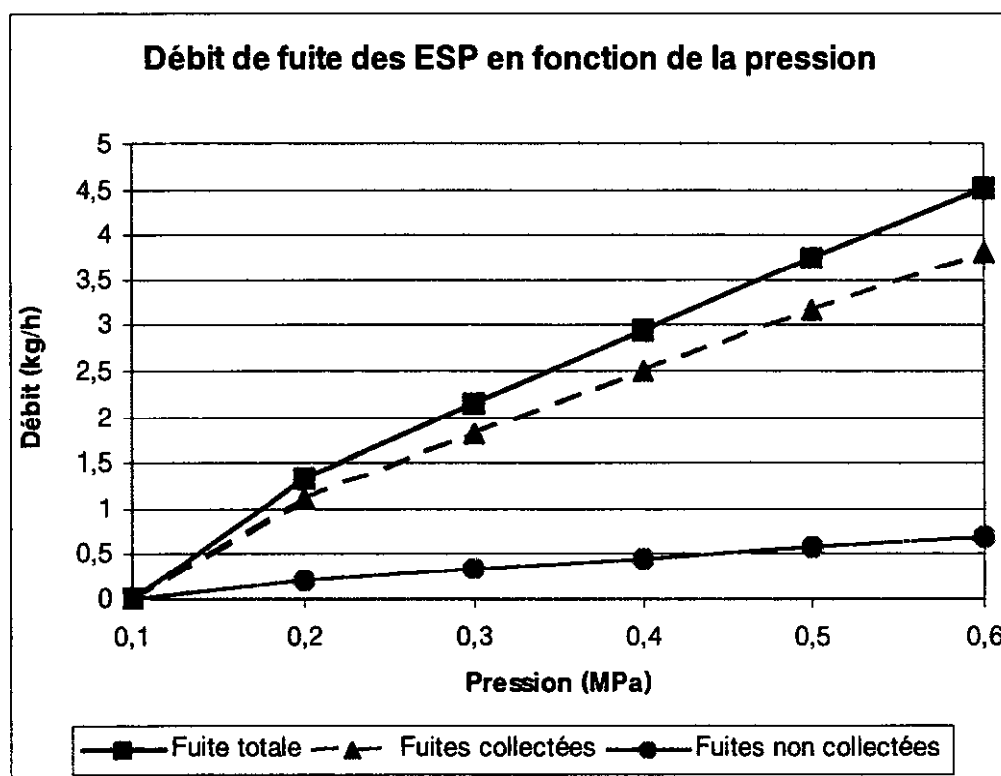


Tableau et Graphique 3.4 : Débit de fuite des ESP en fonction de la pression

Il faut retenir, de cette synthèse sur les ESP, que **les fuites non collectées représentent 15% d'une fuite totale relativement faible dont le taux est indépendant de la pression : 0,05%/j de 0,2 à 0,6 MPa abs.**

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise

4. Enceintes à Double Paroi

4.1 Hypothèses relatives à la nature des fuites

Comme schématisé sur la figure 4 2, les fuites à travers les Enceintes à Double Paroi peuvent se produire :

- par le **béton de la paroi interne**, il s'agit alors de fuites qui transitent par l'Espace Entre Enceintes (cf. § 4.5), elles y sont collectées par le système EDE ;
- par les **traversées** dont la plus grande partie est collectée par les bâtiments adjacents ou l'EDE, le REX montre que 5% ne sont pas collectées (cf. § 4 6) ,
- par la **paroi externe** (cf. § 4.8).

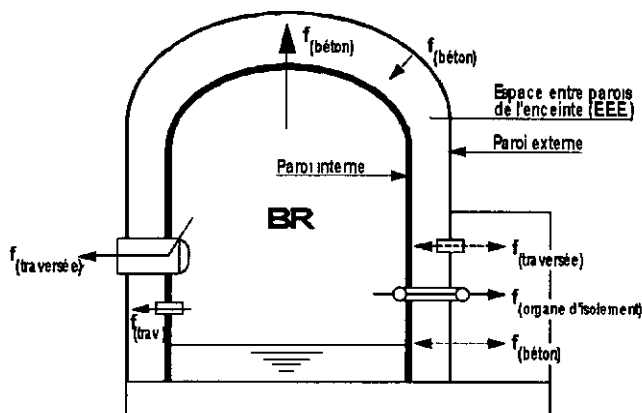


Figure 4 2 : Chemins de fuite des EDP

A noter qu'**aucune fuite par le radier** ne sera prise en compte dans la présente étude, celui-ci étant considéré noyé en accident. Cette hypothèse se justifie par l'importante quantité d'eau présente dans le BR dans la plupart des scénarii d'accident. Dans les rares cas où il n'y en a pas, la pression ne dépasse jamais 0,3 MPa, la fuite serait alors très faible.

4.2 Classement des EDP

Contrairement aux Enceintes à Simple Paroi, les Epreuves Enceintes réalisées sur celles à Double Paroi ont mis en relief quelques disparités, exclusivement en termes de fuites transitantes. Pour certaines enceintes, le critère d'étanchéité du DAC a parfois été dépassé à cause d'une fuite répartie sur l'ensemble de l'ouvrage ou au contraire sous l'effet de quelques fissures traversantes conséquentes. D'importants travaux d'injection et d'application de revêtement ont été effectués de façon à garantir le respect du critère d'étanchéité sur toutes les EDP (cf. § 4.4.1).

Le document [EDPAG] fournit des estimations des fuites en cas d'accident en air-vapeur à 140°C pour des pressions variant de 0,1 à 0,6 MPa pour 6 enceintes jugées représentatives du parc des EDP : 1 dite sensible par palier (dont le taux de fuite a dépassé le critère d'essai d'étanchéité de 1% masse / jour) : Flamanville 2, Belleville 1 et Civaux 1 et 1 dite non sensible : Paluel 1, Cattenom 2 et Chooz 2.

Afin de fournir des valeurs représentatives du plus grand nombre d'enceintes avec une représentativité maîtrisée, nous proposons de retenir 3 types d'enceintes .

- **les Enceintes dites Sensibles** dont la valeur de fuite sera la moyenne de celles des 3 enceintes sensibles étudiées dans [EDPAG],
- **les Enceintes dites Non Sensibles** dont la valeur de fuite sera la moyenne de celles des 3 enceintes non sensibles étudiées dans [EDPAG],
- **les Enceintes dites Moyennes** dont la valeur de fuite sera la moyenne entre les 2 valeurs précédentes

Un classement des 24 EDP dans ces 3 familles est proposé en Annexe 2.

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise

4.3 Hypothèses relatives au calcul des fuites par le béton

Dans la note [EDPAG], les débits de fuite des Parois Internes sont estimés avec les formules de Darcy (fuite diffuse dont le débit est proportionnel à une perméabilité K) et de Poiseuille (fuite par des fissures dont le débit est proportionnel à leur longueur L et au cube de leur ouverture w).

Ces formules peuvent être regroupées comme ceci :

$$Q_m = \frac{M \cdot s}{2 \mu e RT} \cdot (P_{amont}^2 - P_{aval}^2) \cdot \left(K + \sum_w \frac{L \cdot w^3}{12 \cdot s} \right) \quad (\text{Darcy \& Poiseuille})$$

où Q_m est le débit massique

- M la masse molaire du mélange considéré (24 g/mol ici)
- s la surface traversée par le mélange (de l'ordre de 10 000 m² pour les EDP)
- μ le coefficient de viscosité dynamique (1,8*10⁵ Pa*s)
- e l'épaisseur de la paroi (de l'ordre du mètre pour les EDP)
- R la constante des gaz parfaits (8,314 J/K/mol)
- T la température du mélange (de 413°K – 140°C)
- P_{amont} la pression dans le Bâtiment Réacteur (en Pa)
- P_{aval} la pression dans l'Espace Entre Enceintes (en Pa)
- K la perméabilité du matériau traversé par le mélange (en m²)
- L la longueur d'une fissure d'ouverture w (en m)
- w l'ouverture d'une fissure de longueur L (en m)

Les relevés de fissuration des parements des Parois Internes n'ont pas permis de déterminer de façon exhaustive et précise les caractéristiques des fissures débitantes. La seule certitude est que la proportion de fuite diffuse (passant par le béton sain, dont le débit peut s'écrire avec la loi de Darcy) est de l'ordre de 10%. Il est donc nécessaire de prendre des hypothèses simplificatrices pour l'estimation des fuites transitantes.

Nous proposons ici de déterminer une **perméabilité équivalente** $\left(K + \sum_w \frac{L \cdot w^3}{12 \cdot s} \right)$ d'après la

fuite lors de la dernière Epreuve Enceinte, amplifiée forfaitairement pour simuler une durée de vie de 40 ans (de fait, les valeurs utilisées ici viennent de [EDPAG] et sont basées sur une estimation à 60 ans, l'écart entre ces 2 échéances étant faible du point de vue étanchéité car le fluage étant amorti, on estime à moins de 5% l'évolution de l'étanchéité entre 40 et 60 ans). Elle regroupe la perméabilité du matériau ainsi que les fissures qui existaient lors de l'épreuve

Cette perméabilité équivalente est ensuite utilisée dans la formule (Darcy & Poiseuille) précédente pour estimer la fuite de l'enceinte considérée en condition accidentelle.

De plus, si la pression augmente et dépasse la pression de dimensionnement (environ 0,5 MPa), les fissures existantes peuvent s'ouvrir plus, voire s'allonger proportionnellement à la pression la perméabilité équivalente peut alors varier avec la puissance 4 de la pression, le débit de fuite variant donc avec la puissance 6 de la pression. Cette hypothèse étant plutôt pessimiste, en contre-partie, aucune création de fissure n'est considérée.

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise

4.4 Tenue des revêtements

4.4.1 Implantation des revêtements

Suite aux difficultés pour respecter le critère d'étanchéité du DAC lors de certaines VD1 1300, **des revêtements composites ont été qualifiés aux conditions accidentelles de dimensionnement. Ils ont été appliqués à l'intrados des Parois Internes** au niveau des zones les plus fuyardes (localisées suite à des constats de fuites locales en EE), étendues aux zones susceptibles, d'après des calculs de structures, d'être tendues lors d'une EE après 40 ans d'exploitation (cas enveloppe de l'APRP à la même échéance) Leur efficacité en terme d'étanchéité a été confirmée par les résultats des EE après application.

En fonction de la géométrie de l'ouvrage, de la nature du sol et des caractéristiques du béton utilisé, les zones revêtues (ou à revêtir) varient d'une tranche à l'autre. Le revêtement est (ou sera d'ici 2011) systématiquement appliqué autour de l'accès matériel, mais la surface traitée varie de 500 à 1500 m². La partie basse (gousset) et/ou la partie haute (sous-ceinture torique) du fût sont également parfois traitées.

Après les travaux prévus d'ici 2011, les surfaces totales revêtues varieront de 500 à plus de 4000 m² selon les enceintes

4.4.2 Comportement des revêtements sous irradiation

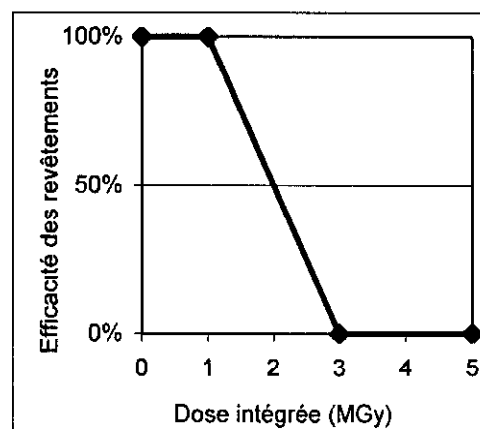
Les revêtements appliqués sur les Parois Internes ont été qualifiés à l'APRP [QualRev]. En effet, après avoir subi une irradiation de 850 kGy (représentant 250 kGy en fonctionnement normal + 600 en accident), ils possédaient toujours une fissure d'1 mm, présentaient une adhérence au support supérieure à 1 MPa et une perméabilité après retour à froid limitant le débit sous 0,5 MPa d'air à moins de 0,1 NL/h/m². On considérera donc qu'ils sont totalement efficaces tant que la dose totale ($\beta+\gamma$) reste inférieure à 1 MGy.

Au-delà, les essais en AG [RevAG1] et [RevAG2] permettent de certifier le maintien d'une adhérence non nulle et peu d'évolution d'aspect (léger farinage, mais aucun craquelage) jusqu'à 3,6 MGy et la non-libération de débris jusqu'à 10 MGy.

Dans l'attente d'étude ou essai complémentaire, on fera donc l'hypothèse suivante :

Les revêtements sont totalement efficaces jusqu'à 1 MGy d'irradiation ; ensuite, leur efficacité diminue linéairement de 1 MGy à 3 MGy où elle est nulle :

Pour la dose d	Efficacité
$d \leq 1$ MGy	100 %
$1 < d < 3$ MGy	$(3 - d) * 50 \%$
$d \geq 3$ MGy	0 %



Par ailleurs, le document [Dose] montre une **grande dispersion dans les doses intégrées par les revêtements**. En cas d'accident grave avec fusion totale, ceux proches du plancher de service peuvent être exposés à 1 MGy dès 12 h alors qu'en haut ou en bas du fût, cette valeur n'est atteinte qu'après une quinzaine de jours, voire plus en cas de fusion partielle.

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise**4.4.3 Comportement des revêtements en température**

L'effet de la température sur la dégradation des revêtements est relativement conséquente mais difficile à quantifier. Après 70 h à plus de 140°C, les revêtements appliqués sur la maquette MAEVA ont présenté une perméabilité correcte, mais leur adhérence était très dégradée (cf. [RevAG1]). Malheureusement, les mesures de débits, peu performantes sur les quadrants avec revêtement, n'ont pas permis d'évaluer leur efficacité. Comme sous irradiation, la seule certitude est la non-libération de débris.

Même si les essais évoqués ci-dessus ont également été réalisés en température, les durées d'exposition ne coïncident pas toujours avec celles subies par les revêtements en AG. En effet, toutes les zones subissent la même température, mais les débits de doses sont très variables. Il est alors impossible de prendre en compte de façon détaillée l'effet de la température sur les revêtements

Dans l'attente d'étude ou essai complémentaire, on fera donc l'hypothèse suivante :

L'effet de la température est négligé devant celui de l'irradiation pendant les 48 premières heures d'exposition à une température supérieure à 100°C ; au-delà, on postule que l'efficacité du revêtement est nulle.

4.4.4 Estimation de l'efficacité des revêtements en AG

D'après les éléments listés précédemment, dans un souci conjoint de simplification des données à utiliser en crise et de réalisme, nous proposons d'appliquer l'efficacité estimée pour la zone revêtue autour de l'accès matériel à l'ensemble des revêtements et ce, pour 4 créneaux temporels après le relâchement massif de produits de fission ou tant que la température est supérieure à 100°C

Les efficacités retenues pour les revêtements en fonction de l'avancement de l'accident sont les suivantes :

Temps	Efficacité
De 0 à 12 h	100 %
De 12 à 24 h	75 %
De 24 à 48 h	50 %
Au-delà	0 %

Les estimations des fuites transitoires fournies au § 4.5 sont donc données pour ces 4 créneaux temporels.

4.5 Fuite transitoire

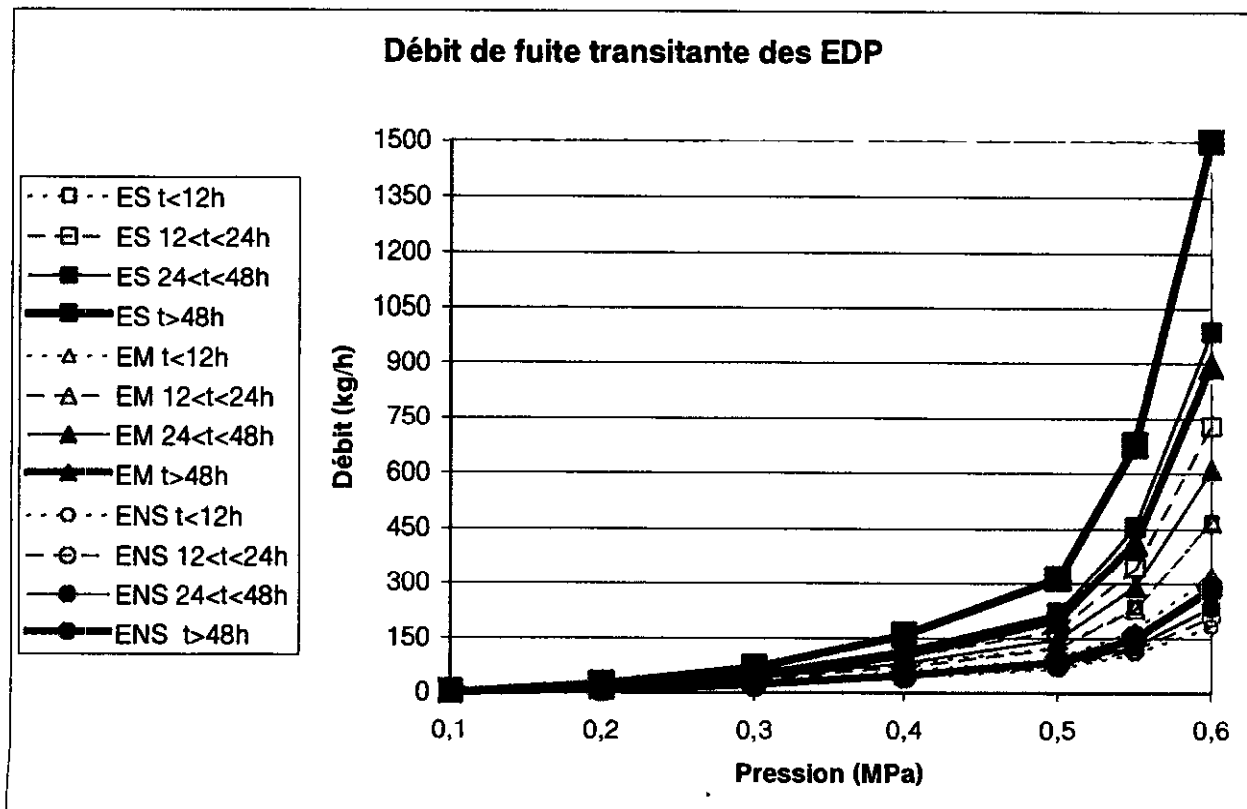
D'après la note [EDPAG] et les éléments qui précèdent, on estime les débits de fuite massiques listés dans le tableau 4.5 et tracés sur le graphique 4.5. Un graphique par type d'enceinte figure en Annexe 3. Les débits de fuite volumiques sont présentés en Annexe 4.

Les ruptures de pente sur les courbes de taux de fuite vers 0,5 MPa sont dues à l'entrée dans le domaine hors dimensionnement : le béton passe en traction, les fissures s'ouvrent.

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise

Pression (MPa abs)	t (h)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6
Débit de fuite des <u>Enceintes Sensibles</u> (kg/h)	[0;12[	0	15	40	80	125	235	470
	[12;24[	0	17	50	100	170	350	730
	[24;48[	0	19	55	120	220	460	1000
	≥ 48	0	22	70	160	315	680	1500
Débit de fuite des <u>Enceintes Moyennes</u> (kg/h)	[0;12[	0	11	30	60	100	170	330
	[12;24[	0	12	35	70	120	230	470
	[24;48[	0	13	40	80	150	290	610
	≥ 48	0	15	45	100	200	410	900
Débit de fuite des <u>Enceintes Non Sensibles</u> (kg/h)	[0;12[	0	7,3	20	40	70	110	200
	[12;24[	0	7,4	21	41	75	120	210
	[24;48[	0	7,5	21	43	80	130	240
	≥ 48	0	7,7	22	46	90	150	290

Tableau 4.5 : Débit de fuite transiente des EDP



Graphique 4.5 : Débit de fuite transiente des EDP (Sensibles / Moyennes / Non Sensibles)

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise**4.6 Fuite non transitive**

Contrairement aux fuites transitantes, le REX ne permet pas de classer les enceintes en fonction de leurs fuites non transitantes. L'analyse qui suit est donc globale à toutes les EDP.

L'estimation des fuites par les traversées est traitée par l'étude [TravP4] d'après des essais périodiques sur le parc des enceintes P4 (par manque d'éléments sur les autres paliers, ces données sont jugées représentatives de toutes les EDP).

De façon conservative, comme pour les analyses Accident Grave, on considère que l'organe intérieur enceinte est ouvert. Les fuites moyennes estimées dans [TravP4] en situation d'AG sont de 2,8 Nm³/h en air, dont plus de 99% seraient collectées. On considérera cependant une **fuite non collectée de 5%**.

D'après la loi des gaz parfaits, ceci est équivalent à une fuite non transitive de 3 kg/h en condition accidentelle (avec une masse molaire de 24 g/mol et une température de 140°C). L'écoulement des fuites par les traversées étant turbulent, on déduit les valeurs aux autres pressions par la formule de Nikuradze où la pression intervient en $(P_{\text{amont}}^2 - P_{\text{aval}}^2)^{1/2}$.

Ces valeurs sont tracées sur le graphique 4.6 et reportées dans les tableaux 4.6 et 4.7.

Pression (MPa abs)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6
Débit par les traversées (kg/h)	1,0	1,7	2,3	3,0	3,3	3,6
Débit de fuite collectée (kg/h)	1,0	1,6	2,2	2,8	3,1	3,4
Débit de fuite non collectée (kg/h)	0,05	0,09	0,12	0,15	0,16	0,18

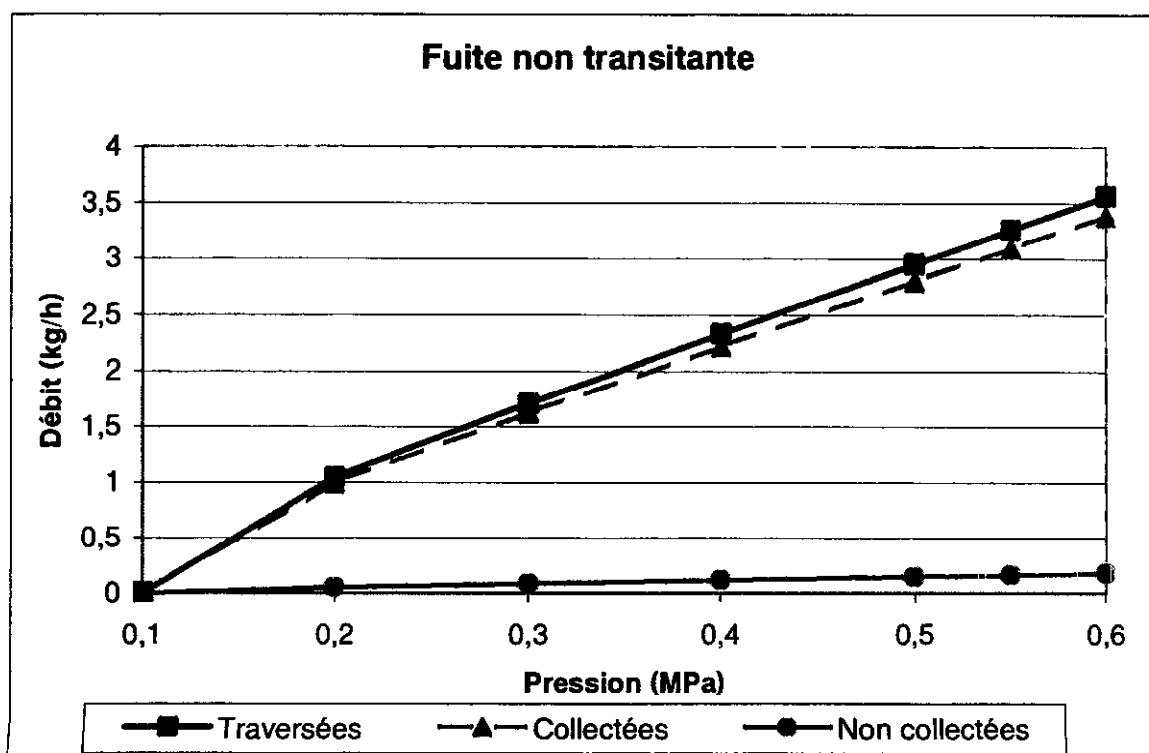


Tableau et Graphique 4.6 : Débit de fuite non transitive en fonction de la pression

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise**4.7 Synthèse sur les Parois Internes**

Des éléments qui précèdent, on déduit les débits massiques et taux de fuite des Parois Internes rassemblés dans le tableau suivant et tracés sur les graphiques 4.7.a, b et c.

Les débits de fuite volumiques sont donnés en Annexe 4.

Pression (MPa abs)	t (h)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6
Débit par les traversées (kg/h)		1,0	1,7	2,3	3,0	3,3	3,6
Débit de fuite <i>non collectée</i> (kg/h)		0,05	0,09	0,12	0,15	0,16	0,18
Fuite des <u>Enceintes Sensibles</u>							
Débit de fuite totale (kg/h)	[0;12[	16	45	80	125	240	470
Taux de fuite (% masse / jour)		0,4	0,7	0,9	1,2	2,0	3,6
Ratio fuite non collectée / totale (%)		0,32	0,20	0,15	0,12	0,07	0,04
Débit de fuite totale (kg/h)	[12;24[	18	50	100	175	350	730
Taux de fuite (% masse / jour)		0,4	0,8	1,1	1,6	2,9	5,6
Ratio fuite non collectée / totale (%)		0,29	0,17	0,12	0,08	0,05	0,02
Débit de fuite totale (kg/h)	[24;48[	20	55	120	220	460	1000
Taux de fuite (% masse / jour)		0,5	0,9	1,4	2,0	3,8	7,5
Ratio fuite non collectée / totale (%)		0,26	0,15	0,10	0,07	0,04	0,02
Débit de fuite totale (kg/h)	≥ 48	23	70	160	315	680	1500
Taux de fuite (% masse / jour)		0,5	1,1	1,8	2,9	5,6	11,5
Ratio fuite non collectée / totale (%)		0,22	0,12	0,07	0,05	0,02	0,01
Fuite des <u>Enceintes Moyennes</u>							
Débit de fuite totale (kg/h)	[0;12[	12	30	60	100	170	330
Taux de fuite (% masse / jour)		0,3	0,5	0,7	0,9	1,5	2,5
Ratio fuite non collectée / totale (%)		0,42	0,26	0,19	0,15	0,09	0,05
Débit de fuite totale (kg/h)	[12;24[	13	35	70	125	230	470
Taux de fuite (% masse / jour)		0,3	0,6	0,8	1,1	2,0	3,6
Ratio fuite non collectée / totale (%)		0,39	0,24	0,16	0,12	0,07	0,04
Débit de fuite totale (kg/h)	[24;48[	14	40	80	150	300	610
Taux de fuite (% masse / jour)		0,3	0,6	0,9	1,4	2,5	4,7
Ratio fuite non collectée / totale (%)		0,37	0,22	0,14	0,10	0,06	0,03
Débit de fuite totale (kg/h)	≥ 48	16	45	105	200	420	900
Taux de fuite (% masse / jour)		0,4	0,7	1,2	1,9	3,5	6,9
Ratio fuite non collectée / totale (%)		0,32	0,18	0,11	0,07	0,04	0,02

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise

Fuite des <u>Enceintes Non Sensibles</u>							
Pression (MPa abs)	T (h)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6
Débit de fuite totale (kg/h)		8,3	22	41	70	110	190
Taux de fuite (% masse / jour)	[0;12[	0,2	0,3	0,5	0,6	0,9	1,4
Ratio fuite non collectée / totale (%)		0,62	0,39	0,28	0,21	0,15	0,10
Débit de fuite totale (kg/h)		8,5	22	43	75	120	210
Taux de fuite (% masse / jour)	[12;24[	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	1,6
Ratio fuite non collectée / totale (%)		0,62	0,38	0,27	0,20	0,13	0,08
Débit de fuite totale (kg/h)		8,6	23	45	80	130	240
Taux de fuite (% masse / jour)	[24;48[	0,2	0,4	0,5	0,7	1,1	1,8
Ratio fuite non collectée / totale (%)		0,61	0,38	0,26	0,19	0,12	0,07
Débit de fuite totale (kg/h)		8,7	24	49	90	150	290
Taux de fuite (% masse / jour)	≥ 48	0,2	0,4	0,6	0,8	1,3	2,2
Ratio fuite non collectée / totale (%)		0,60	0,36	0,24	0,17	0,11	0,06

Tableau 4.7 : Synthèse des fuites des EDP

Nota : Le fait que le taux de fuite dépasse, dans certains cas, à 0,5 MPa, la valeur de 1,5%/jour (critère d'étanchéité défini dans le Décret d'Autorisation de Création) ne remet pas en cause le respect de la réglementation. En effet, les hypothèses retenues pour la présente estimation sont relativement pessimistes (notamment sur l'efficacité des revêtements) et simplificatrices (24 enceintes ramenées à 3 cas étudiés).

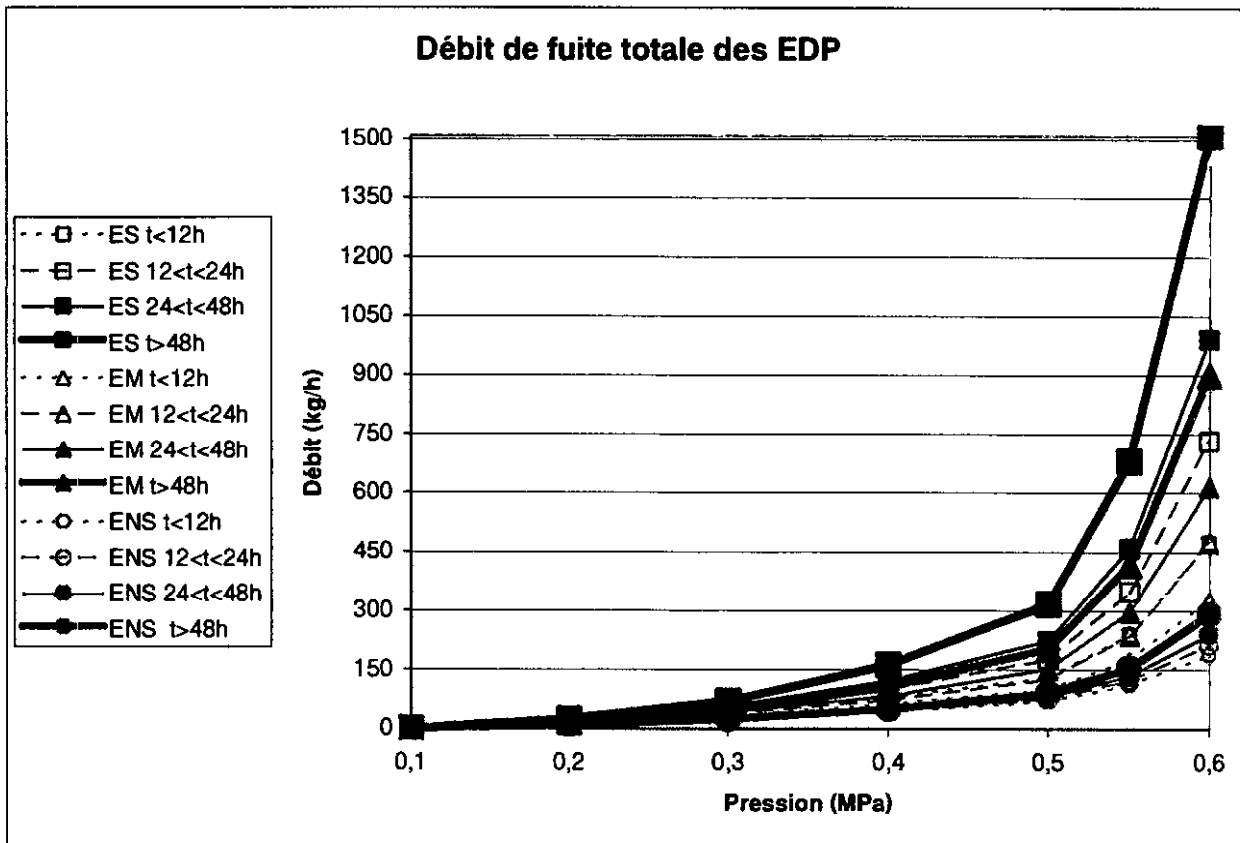
Les éléments à retenir de cette synthèse sur les Parois Internes sont les suivants :

- ✓ **le taux de fuite dépend de la nature de l'enceinte et il évolue avec la pression, la température dans le BR et la dose intégrée par les revêtements** (impactant leur efficacité). Il paraît nécessaire de prendre en compte ces paramètres afin de garder un bon niveau de réalisme. Entre 0,2 et 0,6 MPa absolu, le taux de fuite varie
 - de 0,4 à 12%/jour pour les Enceintes Sensibles,
 - de 0,3 à 7%/jour pour les Moyennes et
 - de 0,2 à 2,2%/jour pour les Non Sensibles ;
- ✓ **les fuites non collectées représentent de 0,01 à 0,6% de la fuite totale** (minimum dans le cas d'une Enceinte Sensible à pression élevée et maximum dans le cas d'une Enceinte Non Sensible à faible pression) ;

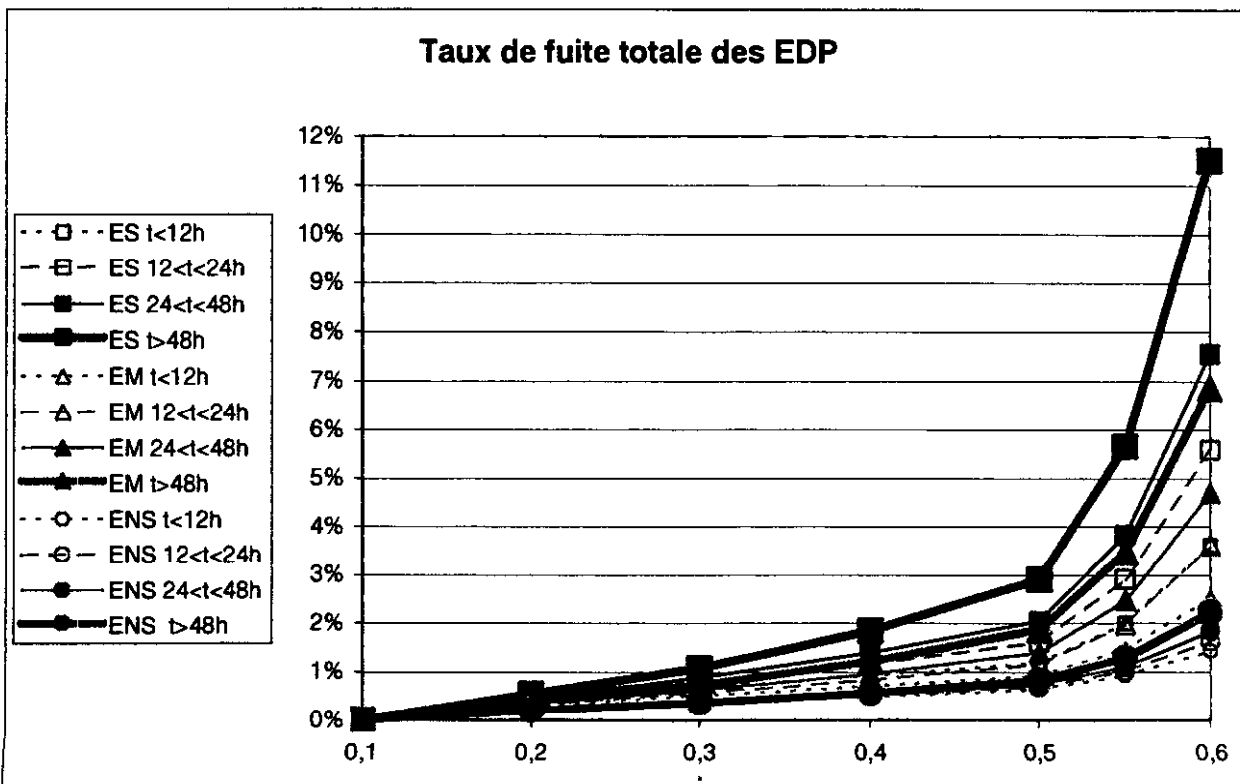
ce ratio diminue avec la pression : l'ouverture des fissures à l'origine des fuites transistantes peut croître avec la pression, induisant une augmentation de celles-ci avec la puissance 5 ou 6 de la pression contre la puissance 1 pour les fuites par les traversées ;

il diminue également avec l'avancement de l'accident. les fuites transistantes augmentent sous l'effet de la dégradation postulée des revêtements alors que les fuites non collectées en sont indépendantes.

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise

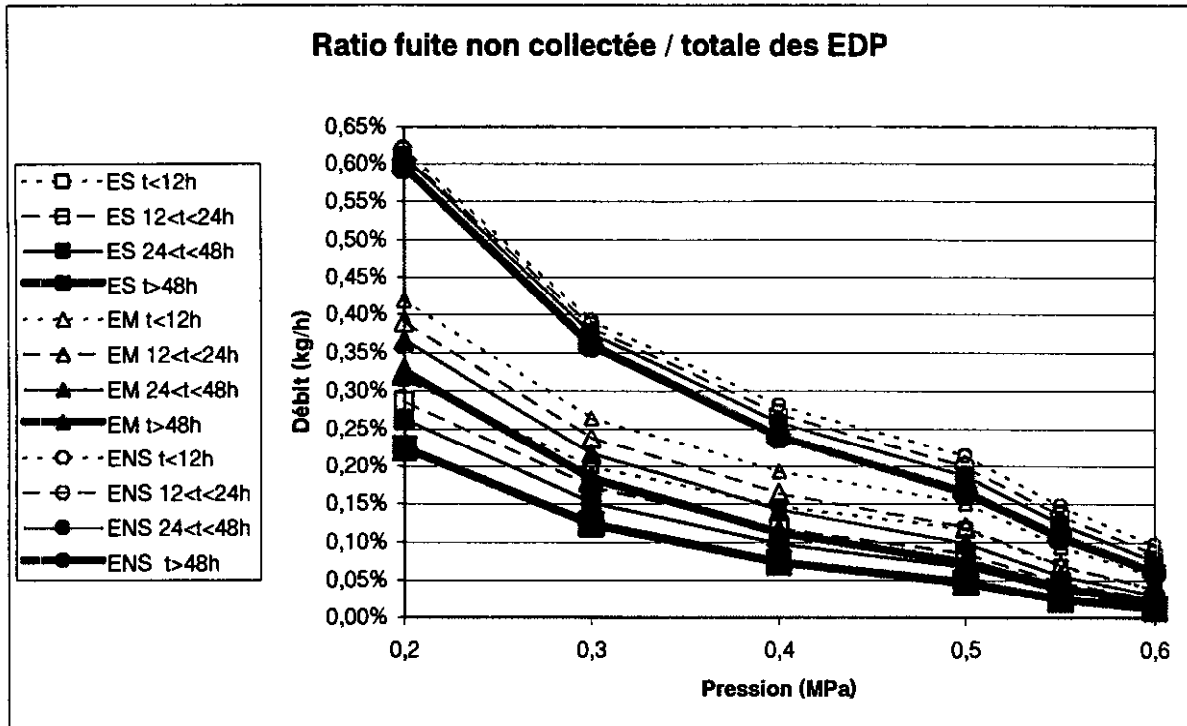


Graphique 4.7.a : Débit de fuite totale des EDP



Graphique 4.7.b : Taux de fuite totale des EDP

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise



Graphique 4.7.c : Ratio de fuite non collectée / fuite totale des EDP

4.8 Fuite de la Paroi Externe

Comme pour les Enceintes à Simple Paroi, l'analyse qui précède se limite à l'enceinte elle-même (nature collectée ou non collectée des fuites). Toutefois, la quasi-unanimité des fuites est collectée dans l'Espace Entre Enceintes. Dans la plupart des cas, le système EDE est en fonctionnement pendant toute la durée de l'accident. Sauf cas particulier, l'EEE est donc maintenu en dépression : seules les fuites non collectées ne sont pas traitées avant rejet.

Mais en cas d'indisponibilité de ce système (par exemple suite à la perte totale des sources électriques) ou en cas de fuite de la Paroi Interne supérieure à ses capacités, il n'est pas exclu que la pression dans l'EEE dépasse la pression atmosphérique occasionnant des rejets dans l'environnement non filtrés.

Dans ce cas, on considérera que la Paroi Externe fuit à la moitié de la valeur du critère DAC, soit 0,5% du volume de gaz présent à l'intérieur de la Paroi Externe sous 3 hPa de dépression (et, dans le cas présent, de surpression), soit environ 30 kg/h (le mélange étant considéré composé exclusivement d'air à température proche de l'ambiante).

Le REX montre cette hypothèse est légèrement conservatrice, mais réaliste (moyenne sur les dernières mesures en EE de l'ordre de 0,3% avec une seule valeur supérieure à 0,55%).

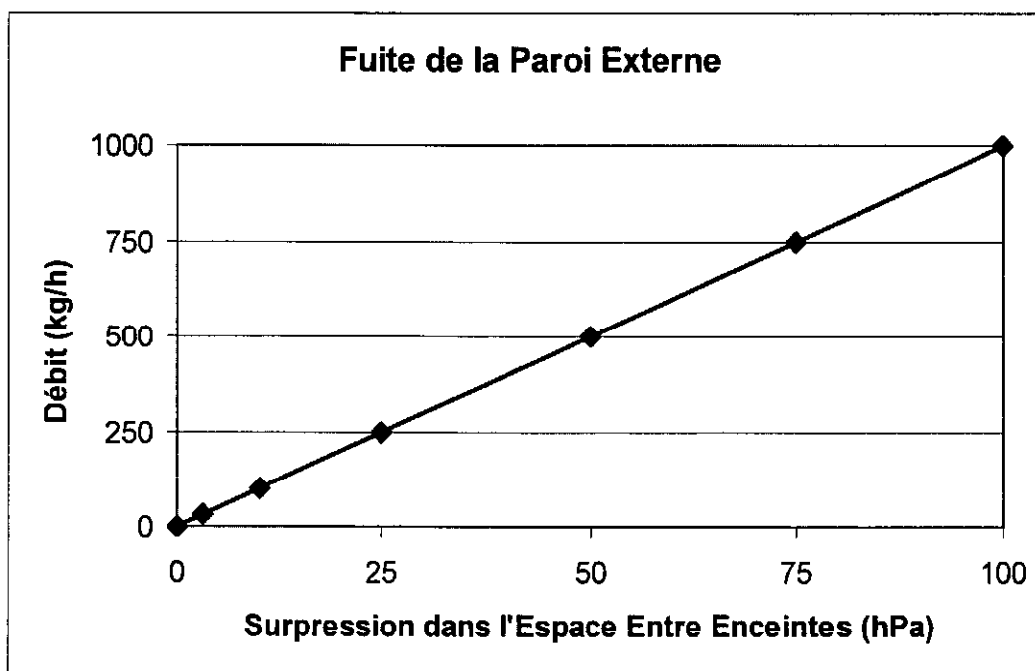
Il indique, de plus, qu'une grande partie des fuites de la Paroi Externe est concentrée au niveau de la jonction Fût-Dôme, et ne peut donc pas être collectée. Cette proportion étant difficile à estimer de façon précise, nous considérerons que lorsque l'Espace Entre Enceintes est en surpression, **la totalité des fuites de la Paroi Externe est directe.**

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise

Enfin, comme pour les fuites au travers du béton de la Paroi Interne, le régime est laminaire, on déduit donc les débits à d'autres pressions par extrapolation sur la différence des carrés des pressions, faisant l'hypothèse de l'absence d'évolution de la fissuration de la Paroi Externe :

Surpression dans l'EEE (hPa)	0	3	10	25	50	75	100
Débit de fuite total de la Paroi Externe (kg/h)	0	30	100	250	500	750	1000
Débit de fuite total de la Paroi Externe (*10 ⁻⁴ m ³ /s)	0	70	220	550	1100	1650	2200

Tableau 4.8 : Débit de fuite de la Paroi Externe



Graphique 4.8 : Débit de fuite de la Paroi Externe

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise**5. Conclusion**

La présente note synthétise les résultats d'études récentes en les simplifiant dans le but de leur utilisation en situation de crise. A noter que les valeurs retenues sont des **moyennes**

L'analyse est limitée à l'enceinte. Si les fuites non collectées sont clairement identifiées, une part non négligeable des produits de fission *collectés* par les systèmes de ventilation-filtration des bâtiments adjacents ne sont *pas piégés*. Ils peuvent donc contribuer aux conséquences radiologiques de l'accident considéré, mais ils ne sont pas comptabilisés dans la présente étude

Le maintien d'une efficacité variable des revêtements appliqués sur les Enceintes à Double Paroi en fonction de l'avancement de l'accident, notamment de l'irradiation qu'ils pourraient intégrer et de la température dans le BR paraît nécessaire

Pour les Enceintes à Simple Paroi, on retiendra que **les fuites non collectées représentent 15% d'une fuite totale relativement faible dont le taux est indépendant de la pression. 0,05%/j** de 0,2 à 0,6 MPa abs

Pour les Enceintes à Double Paroi, on retiendra que .

- ✓ **le taux de fuite dépend de la nature de l'enceinte et il évolue avec la pression, la température dans le BR et la dose intégrée par les revêtements** (impactant leur efficacité). Il paraît nécessaire de prendre en compte ces paramètres afin de garder un bon niveau de réalisme. Entre 0,2 et 0,6 MPa absolu, le taux de fuite varie
 - de 0,4 à 12%/jour pour les Enceintes Sensibles,
 - de 0,3 à 7%/jour pour les Moyennes et
 - de 0,2 à 2,2%/jour pour les Non Sensibles ;

- ✓ **les fuites non collectées représentent de 0,01 à 0,6% de la fuite totale** (minimum dans le cas d'une Enceinte Sensible à pression élevée et maximum dans le cas d'une Enceinte Non Sensible à faible pression) ,
ce ratio diminue avec la pression : l'ouverture des fissures à l'origine des fuites transitoires peut croître avec la pression, induisant une augmentation de celles-ci avec la puissance 5 ou 6 de la pression contre la puissance 1 pour les fuites par les traversées ,
il diminue également avec l'avancement de l'accident les fuites transitoires augmentent sous l'effet de la dégradation postulée des revêtements alors que les fuites non collectées en sont indépendantes

- ✓ **les fuites des Parois Externes sont directes, leur taux, indépendant de la pression est de 0,5% du volume délimité par leur parement interne sous 3 hPa de dépression.**

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise**Annexe 1 : Débit de fuite volumique moyen des ESP**

Pour reprendre la même présentation des fuites que dans la méthode REJETS, les résultats présentés au § 3 sont repris ici en débits volumiques sous la forme $Q(P) = Q(0,5\text{MPa}) * f(P)$.

La fonction $f(P)$ est donnée pour la fuite totale dont le débit à 0,5 MPa vaut $Q_{\text{tot}}(0,5\text{MPa}) = 3,7 \text{ kg/h}$, ce qui équivaut, à 140°C pour un mélange air+vapeur de 24 g/mol, à $Q_{\text{tot}}(0,5\text{MPa}) = 14,8 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

Dans le cas des ESP, les fuites non collectées représentant toujours 15% de la fuite totale, la fonction $f(P)$ est identique. Pour mémoire $Q_{\text{non coll}}(0,5\text{MPa}) = 0,6 \text{ kg/h}$, soit $2,3 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ et $Q_{\text{coll}}(0,5\text{MPa}) = 3,1 \text{ kg/h}$, soit $12,6 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

Pression dans le BR (MPa)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$f(P)$	0	0,35	0,58	0,79	1	1,21

Tableau A1 . Débit de fuite volumique moyen des ESP en fonction de la pression

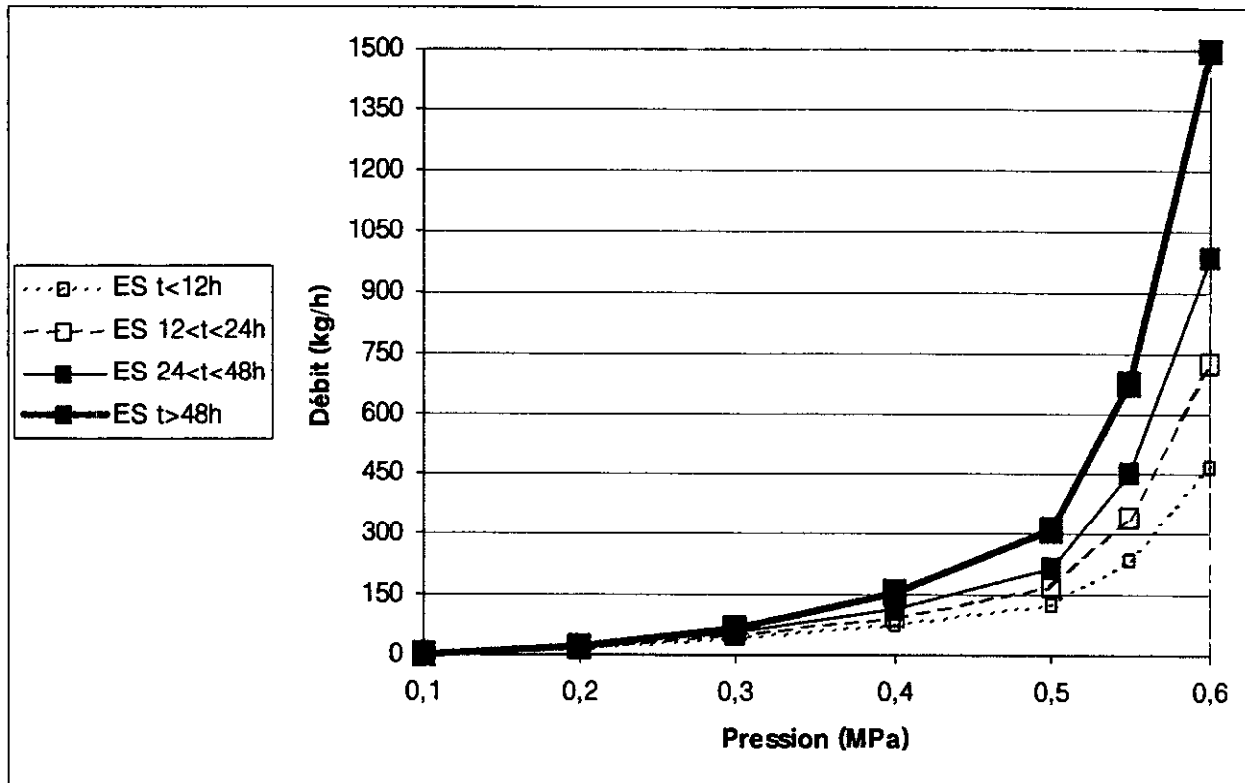
Annexe 2 : Proposition de classement des EDP

11 Enceintes Non Sensibles			8 Enceintes Moyennes	5 Enceintes Sensibles		
P4	P'4	N4	P'4	P4	P'4	N4
Paluel 1	Nogent 1	Chooz 1	Cattenom 1	Flamanville 1	Belleville 1	Civaux 1
Paluel 2	Nogent 2	Chooz 2	Cattenom 2	Flamanville 2	Belleville 2	
Paluel 3		Civaux 2	Cattenom 3			
Paluel 4			Cattenom 4			
Saint Alban 1			Golfech 1			
Saint Alban 2			Golfech 2			
			Penly 1			
			Penly 2			

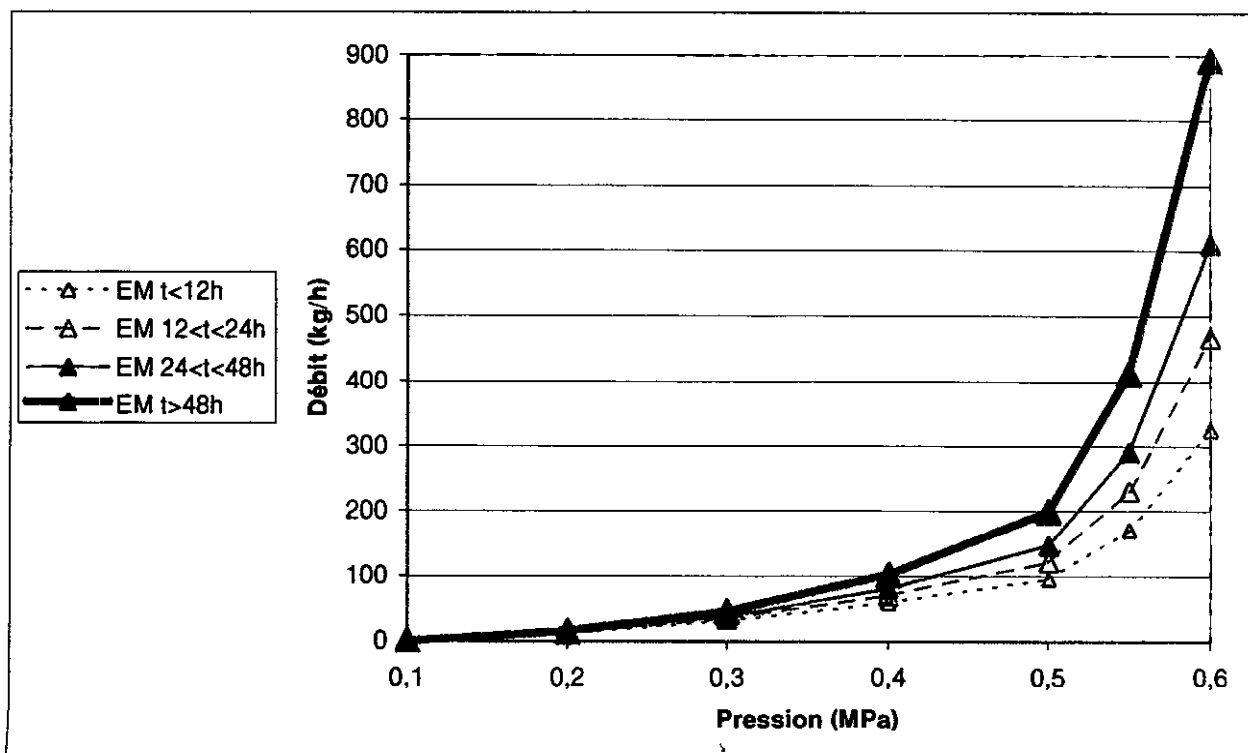
Tableau A2 : Proposition de classement des EDP

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise

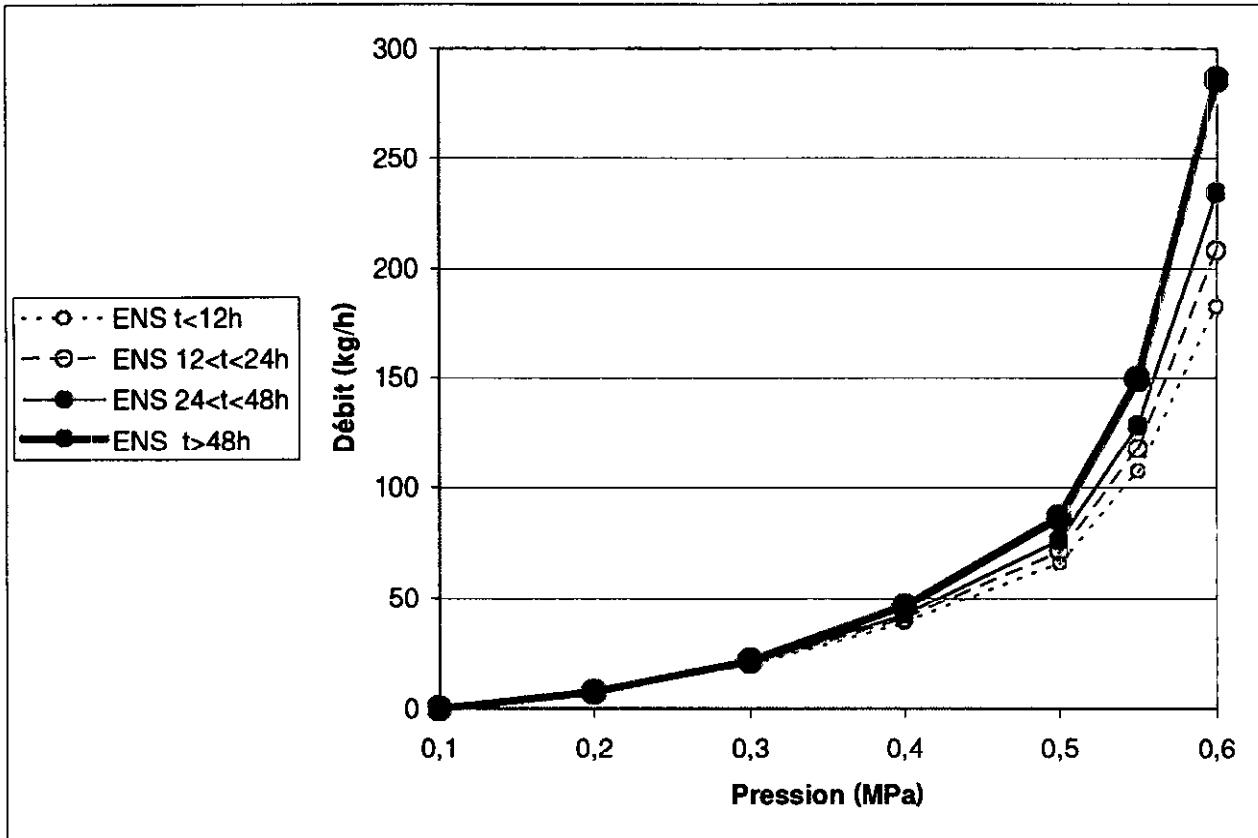
Annexe 3 : Graphiques des fuites transitantes pour chaque type d'EDP



Graphique A3.1 : Débit de fuite transistante des Enceintes Sensibles



Graphique A3.2 : Débit de fuite transistante des Enceintes Moyennes

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise**Graphique A3.3 : Débit de fuite transiente des Enceintes Non Sensibles**

Proposition de taux de fuite des enceintes de confinement pour les outils de crise

Annexe 4 : Débit de fuite volumique moyen des EDP

Pour reprendre la même présentation des fuites que dans la méthode REJETS, les résultats présentés au § 4 sont repris ici en débits volumiques sous la forme $Q(P) = Q(0,5\text{MPa}) * f(P)$.

Les fonctions $f(P)$ sont données pour la fuite totale de chaque famille et pour chaque créneau temporel. Les débits de référence à 0,5 MPa $Q(0,5\text{MPa})$ sont rappelés au milieu de chaque ligne, ils sont exprimés ici en $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ équivalents aux débits massiques donnés au § 4 à 140°C pour un mélange air+vapeur de 24 g/mol.

Une fonction $f(P)$ est également donnée pour les fuites par les traversées et les fuites non collectées.

		t (h)	Débit à 0,5 MPa (*10 ⁻⁴ m ³ /s)		f (P)			
Pression (MPa abs)			0,2	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6
Débit par les traversées		12	0,35	0,58	0,79	1	1,10	1,21
Débit de fuite non collectée		0,6	0,35	0,58	0,79	1	1,10	1,21
Fuite totale des Enceintes Sensibles	[0;12[	500	0,13	0,34	0,63	1	1,9	3,7
	[12;24[	700	0,10	0,29	0,57	1	2,0	4,2
	[24,48[	900	0,09	0,25	0,54	1	2,1	4,5
	≥ 48	1300	0,07	0,22	0,51	1	2,2	4,8
Fuite totale des Enceintes Moyennes	[0;12[	400	0,13	0,33	0,62	1	1,8	3,4
	[12;24[	500	0,11	0,29	0,58	1	1,9	3,8
	[24;48[	600	0,10	0,26	0,55	1	2,0	4,1
	≥ 48	800	0,08	0,23	0,52	1	2,1	4,5
Fuite totale des Enceintes Non Sensibles	[0;12[	280	0,12	0,31	0,60	1	1,6	2,7
	[12;24[	300	0,11	0,30	0,58	1	1,6	2,9
	[24;48[	320	0,11	0,29	0,57	1	1,7	3,0
	≥ 48	360	0,10	0,27	0,55	1	1,7	3,2

Tableau A4 : Débit de fuite volumique moyen des Parois Internes en fonction de la pression