



# DOCUMENT POLYCHROME

Diffusé le : Voir code barres ci-dessus

Réf. : ENGSGC070215-A

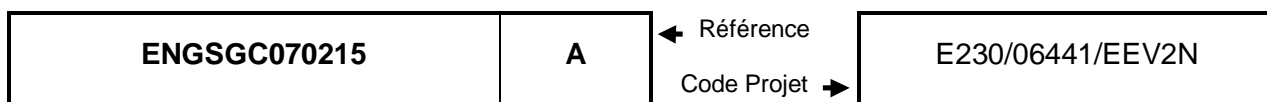
Entité émettrice: **Génie Civil - Installation - Structures**

Rédacteur : **D. CREMIEUX, M. TRONCOSO (Stagiaire ENISE)** Nbre de pages : 33

Domaine d'application : **REP P4 – P'4 – N4**

Nbre d'annexes : 2

Titre : **Estimation de l'étanchéité des Parois Externes**



Type de document : **Note d'étude**

Mots clés : Enceintes à Double Paroi – Etanchéité – Fissuration

## Résumé :

La troisième barrière des réacteurs de 1300 et 1450 MWe est constituée par une enceinte à double paroi, chacune devant respecter un taux de fuite maximal inscrit dans le DAC.

La présente note permet de mieux apprécier les évolutions de l'étanchéité des Parois Externes avec l'analyse de l'impact des conditions atmosphériques sur le taux de fuite. L'objectif principal est l'établissement de lois de variation de la fuite des Parois Externes en fonction de la pression dans leur Espace Entre Enceintes. Ces lois serviront notamment pour l'estimation des conséquences radiologiques d'un Accident Grave.

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
<b>TRONCOSO CREMIEUX</b> 12/10/2007		<b>GALLITRE</b> 17/10/2007		<b>LAZZARINI</b> 22/10/2007			

### 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 : Archivé au FDU : OUI Copyright EDF 2007

Confidentiel : L'initiateur établit une liste nominative des destinataires. Chacun d'eux reçoit un exemplaire numéroté et ne peut étendre la diffusion sans l'accord de l'initiateur.

Dif. Restreinte : L'initiateur établit une liste explicite des destinataires. Le chef de service d'un destinataire peut étendre la diffusion sous sa responsabilité et dans sa Direction (sur la base d'une liste explicite).

Accès E.D.F : Ne peut être transmis à l'extérieur d'EDF que par un chef de service.

Accès libre : Document public.

EDF SEPTEN		Note d'étude <b>ENGSGC070215</b>			Indice <b>A</b>	Page 2/33
<b>Estimation de l'étanchéité des Parois Externes</b>						
<b>FICHE DE GESTION</b>						
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"/>	
Après de : JL. VALFORT, I. PETRE-LAZAR (CIPN/GC) JP. PERRIN (7N/DP)				PA. NAZE (CNEN/IGC) B. MASSON, A. COURTOIS (7N/DS)		
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"/>	

## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

## SYNTHÈSE

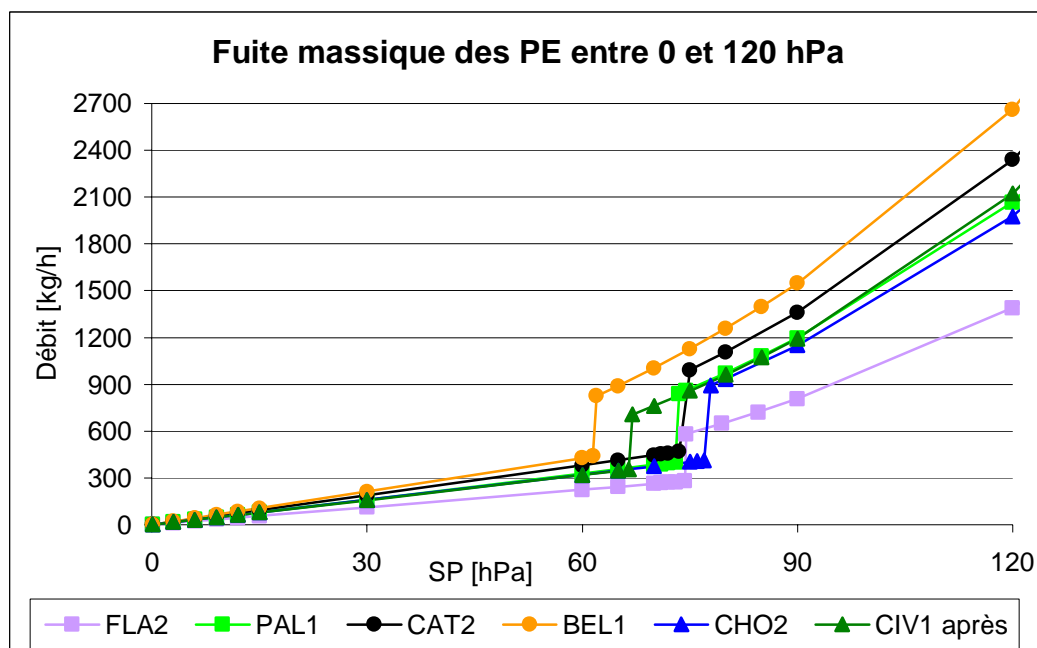
La fonction principale de l'enceinte de confinement est d'assurer une protection radiologique satisfaisante vis-à-vis de l'environnement et d'empêcher le relâchement de produits de fission dans l'atmosphère. Sur les Enceintes à Double Paroi, le confinement repose sur la conjonction d'une étanchéité statique (béton précontraint de la Paroi Interne et béton armé de la Paroi Externe) et dynamique (système de mise en dépression de l'Espace Entre Enceintes).

Si beaucoup d'études, d'essais et de travaux ont été réalisés pour mieux appréhender et améliorer l'étanchéité de la Paroi Interne, de récentes difficultés à maintenir la dépression dans les Espaces Entre Enceintes de Civaux ont montré le besoin de s'intéresser aux Parois Externes.

En effet, le Taux de Fuite de la Paroi Externe doit être inférieur au critère DAC associé car son dépassement conduirait à l'indisponibilité de l'enceinte et donc du réacteur. En connaissant mieux l'étanchéité des Parois Externes, il sera possible d'anticiper les défaillances potentielles et programmer les travaux adéquats lors d'arrêts de tranche planifiés avant que la détérioration du Taux de Fuite n'ait d'impact sur la disponibilité.

Le but de la première partie de la note est de **quantifier la corrélation entre saisons et Taux de Fuite**. En effet, sur certaines tranches, les mesures montrent qu'en été, lorsque la température est plus élevée et l'hygrométrie plus faible, les Taux de Fuite sont plus élevés qu'en hiver.

L'objectif de la seconde partie est de **proposer une loi de variation du débit de fuite des Parois Externes en fonction de l'écart de pression** entre l'Espace Entre Enceintes et l'atmosphère en cas d'accident. Ainsi, compte tenu des hypothèses de base, la réponse de chaque PE à cette sollicitation pourra être connue. Tous les résultats figurent en annexe ; le graphique ci-dessous concerne les Enceintes Types (hors CIV1 avant injections) :



Cette note constitue le livrable 7 du programme [ProgAG] (ENGSGC050409-A). Elle est, en outre, la synthèse du stage de 5<sup>e</sup> année de l'ENISE en Génie Civil de Mariana TRONCOSO.

## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

## SOMMAIRE

<b>1. Références et abréviations.....</b>	<b>5</b>
1.1 Références .....	5
1.2 Abréviations .....	5
<b>2. Introduction.....</b>	<b>6</b>
2.1 Contexte .....	6
2.2 Objectif de la note.....	7
<b>3. Analyse qualitative des données de TdF<sub>EDE</sub> .....</b>	<b>8</b>
3.1 Etude de variation saisonnière .....	8
3.2 Ecart général moyen.....	12
3.3 Analyse de l'influence de paramètres d'après les mesures de Civaux 1.....	13
3.3.1 Comparaison mensuelle .....	13
3.3.2 Comparaison quotidienne.....	14
<b>4. Données pour les lois Débit(SurPression) .....</b>	<b>15</b>
4.1 Données de base .....	15
4.2 Estimation de la fissuration de retrait .....	16
4.3 Evolution de la fissuration .....	17
<b>5. Lois Débit(SurPression) .....</b>	<b>19</b>
5.1 Méthode .....	19
5.2 Application aux Enceintes Types .....	19
5.2.1 Lois Débit(SurPression) pour chaque Enceinte Type.....	19
5.2.2 Analyse comparative des paramètres .....	21
5.3 Lois Débit(SurPression) pour les autres enceintes.....	22
<b>6. Conclusion .....</b>	<b>23</b>
6.1 Influence des conditions environnementales .....	23
6.2 Lois de variation Débit (SurPression).....	23
<b>Annexe : Détails des lois Débit (SurPression).....</b>	<b>25</b>

**Estimation de l'étanchéité des Parois Externes****1. Références et abréviations****1.1 Références**

- [Gra98] Note d'étude ENSGC9800003-A : Analyse réaliste du débit de fuite d'une enceinte à double paroi en accident grave (Osiris 99D02383)
- [EC2] Norme NF EN 1992-1-1 : Eurocode 2 - Calcul des structures en béton – partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments (Octobre 2005)
- [EDEN4] Note d'étude ECEF030596-A : Etude paramétrique en fonction du débit de la fonction filtration iode EDE – Palier N4 (Serapis C03D2018251)
- [Fuites] Note d'étude ENGSDS050251-A : Fuites au travers des parois d'enceinte – Synthèse des études et connaissances actuelles (2005) (Serapis N05D0033971)
- [ProgAG] Note d'étude ENSGC050409-A : Proposition de programme de travail d'estimation des fuites des enceintes à double paroi en Accident Grave (Serapis N06D0038473)
- [SyntAG] Note d'étude ENSGC060008-A : Synthèse des estimations de taux de fuite des Enceintes à Double Paroi en Accident Grave à fin 2005 (Serapis N06D0042450)
- [RecAG] Note d'étude ENSGC060155-A : Recueil des données d'entrée pour l'estimation des fuites des Enceintes à Double Paroi en Accident Grave (Serapis N06D0044377)
- [CIPN] Note d'étude EMEGC070165-A : Estimation de l'évolution de l'étanchéité de la paroi externe des BR à double paroi (Serapis M07I0095270)
- [DEtu] Dossier d'étude ENSGC070230-A relatif à la note Estimation de l'étanchéité des Parois Externes (ENSGGC070215) (en cours de finalisation)

**1.2 Abréviations**

AG	Accident Grave
DAC	Décret d'Autorisation de Création (d'une centrale nucléaire)
$\Delta P$	DéPression entre l'EEE et l'extérieur
EDE	Système de mise en dépression de l'Espace Entre Enceintes
EDP	Enceintes à Double Paroi
EEE	Espace Entre Enceintes
ENISE	Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint Etienne
EPP	Système assurant l'étanchéité des pénétrations de l'enceinte
ET	Enceinte Type
PE	Paroi Externe
Q	Débit (par défaut, massique)
SP	SurPression entre l'EEE et l'extérieur
TdF	Taux de Fuite

**Estimation de l'étanchéité des Parois Externes****2. Introduction****2.1 Contexte**

La fonction principale de l'enceinte de confinement est d'assurer une protection radiologique satisfaisante vis-à-vis de l'environnement et d'empêcher le relâchement de produits de fission dans l'atmosphère. Sur les Enceintes à Double Paroi, le confinement repose sur la conjonction d'une étanchéité statique (béton précontraint de la Paroi Interne et béton armé de la Paroi Externe) et dynamique (système de mise en dépression de l'Espace Entre Enceintes).

L'étanchéité des enceintes est un enjeu majeur pour la disponibilité et la durée de vie des centrales. Il existe un taux de fuite maximal à ne pas dépasser sans quoi, le redémarrage du réacteur n'est pas possible. Cet aspect est particulier pour les EDP car ce rôle d'étanchéité aux gaz est inhabituel pour le béton. Il serait donc utile de mettre en œuvre un suivi spécifique de ces ouvrages et de traiter les zones fuyardes par injection de fissures, application de bouche-pores et/ou de revêtements de complément d'étanchéité.

Si beaucoup d'études, d'essais et de travaux ont été réalisés pour mieux appréhender et améliorer l'étanchéité de la Paroi Interne, de récentes difficultés à maintenir la dépression dans les EEE de Civaux ont montré le besoin de s'intéresser aux Parois Externes.

En fonctionnement normal, le système EDE assure la dépression dans l'EEE avec sa file de contournement. Il comporte également deux files à filtration iode, qui peuvent, chacune réaliser une dépression et une filtration suffisante en accident de dimensionnement. Sur le palier N4, le système enclenche automatiquement une file iode en complément de la file contournement si la dépression mesurée est inférieure à 22 hPa (valeur correspondant à une fuite de l'ordre du critère DAC<sup>1</sup> portant sur l'étanchéité de la Paroi Externe) bien qu'une dépression de 6 hPa suffise à respecter les exigences de sûreté.

Avec le système EDE fonctionnant correctement, l'EEE est toujours en dépression, le flux gazeux est donc entrant par la Paroi Externe (par son réseau poreux, ses fissures et/ou ses traversées) et sortant par EDE dont les filtres assurent des rejets nuls ou négligeables.

Mais il n'est pas exclu que le système EDE ne fonctionne pas correctement : qu'il ne puisse plus, à terme, assurer la dépression dans l'EEE, notamment en Accident Grave. Dans ce cas, au bout d'un certain temps, l'EEE pourrait se retrouver en surpression, ce qui aurait pour conséquence un flux gazeux sortant par la Paroi Externe : il pourrait y avoir des rejets non filtrés dans l'atmosphère.

---

<sup>1</sup> Le Décret d'Autorisation de Construction des EDP impose, pour la Paroi Externe, un taux de fuite de 1% par jour de la masse de gaz contenue dans le volume limité par le parement interne de la Paroi Externe mesuré sous 3 hPa de dépression par rapport à l'atmosphère.

**Estimation de l'étanchéité des Parois Externes****2.2 Objectif de la note**

L'objectif du stage (et de la note) est de mieux appréhender l'étanchéité des Parois Externes.

Le but de la première partie est de **quantifier la corrélation entre saisons et Taux de Fuite**. En effet, sur certaines tranches, les mesures montrent qu'en été, lorsque la température est plus élevée et l'hygrométrie plus faible, les Taux de Fuite sont plus élevés qu'en hiver. Pour cela, on classera les valeurs disponibles pour chaque enceinte par saison.

Dans la seconde partie de la note, **une loi de variation du Débit de fuite des Parois Externes est proposée en fonction de l'écart de pression** entre l'EEE et l'atmosphère en cas d'accident. Ainsi, compte tenu des hypothèses de base, il sera possible de connaître la réponse de chaque Paroi Externe à cette sollicitation.

Cette analyse sera d'abord conduite pour les 6 Enceintes Types qui ont été choisies dans [RecAG] pour les performances de leur Paroi Interne (une des plus étanches - dite non sensible - et une des moins - dite sensible - par palier ; en l'occurrence Paluel 1, Flamanville 2, Cattenom 2, Belleville 1, Chooz B 2, Civaux 1).

Le même exercice sera réalisé pour toutes les tranches (éventuellement groupées) en annexe.

On notera que l'analyse du Taux de Fuite de la Paroi Externe est de première importance pour EDF : il doit être inférieur au critère maximum admissible défini dans le DAC car son dépassement conduirait à l'indisponibilité de l'enceinte et donc du réacteur. De plus, la remise en conformité (respect du critère d'étanchéité) nécessaire au redémarrage pourrait imposer des travaux longs et coûteux.

En connaissant mieux l'étanchéité des Parois Externes, il sera possible d'**anticiper les défaillances potentielles et programmer les travaux adéquats** lors d'arrêts de tranche planifiés avant que la détérioration du Taux de Fuite n'ait d'impact sur la disponibilité. A ce sujet, c'est la note [CIPN] qui constitue la référence pour les modalités pratiques de suivi des Taux de Fuite des Parois Externes.

Cette note est la synthèse du stage de 5<sup>ème</sup> année de l'ENISE en Génie Civil de Mariana TRONCOSO.

Elle constitue, en outre, le livrable 7 du programme [ProgAG].

## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

### 3. Analyse qualitative des données de TdF<sub>EDE</sub>

Cette analyse a pour but d'identifier l'influence éventuelle des conditions environnementales sur les variations de débit de fuite relevées par le système EDE, c'est-à-dire voir si les températures plus élevées et les pourcentages d'hygrométrie plus faibles de l'été expliquent l'élévation des débits de fuite des PE observée en cette saison. Pour cela, on classe les valeurs de dépression dans l'EEE et/ou de débit EDE disponibles pour chaque enceinte par saison. Les valeurs utilisées ici proviennent de différents types de mesures : suivi en exploitation, mesures mensuelles (EP EDE) ou décennales (EP EPP).

On considérera comme mois d'été, les mois de juin, juillet, août et septembre, et pour l'hiver, les mois de décembre, janvier, février et mars. Les autres mois (avril, mai, octobre, novembre) ont des conditions de température et d'hygrométrie intermédiaires, plus aléatoires et par conséquent on ne les prendra pas en compte dans la première partie de l'étude comparative.

#### 3.1 Etude de variation saisonnière

On analysera seulement les sites pour lesquels on dispose de plusieurs mesures de dépression sur au moins 2 saisons consécutives afin de s'affranchir d'une éventuelle évolution d'une année sur l'autre. Dans les cas où on ne dispose que des mesures de dépression dans l'EEE, on extrapole les valeurs de débit de fuite, en utilisant la courbe de fonctionnement des ventilateurs EDE en faisant l'hypothèse d'un seul ventilateur fonctionnant en condition d'APRP.

Cette courbe peut être déduite de mesures effectuées sur d'autres tranches du même palier (cas du Palier P'4) ou connue (cas du Palier N4 dont la courbe est représentée sur la figure 3.1.b issue de [EDEN4]).

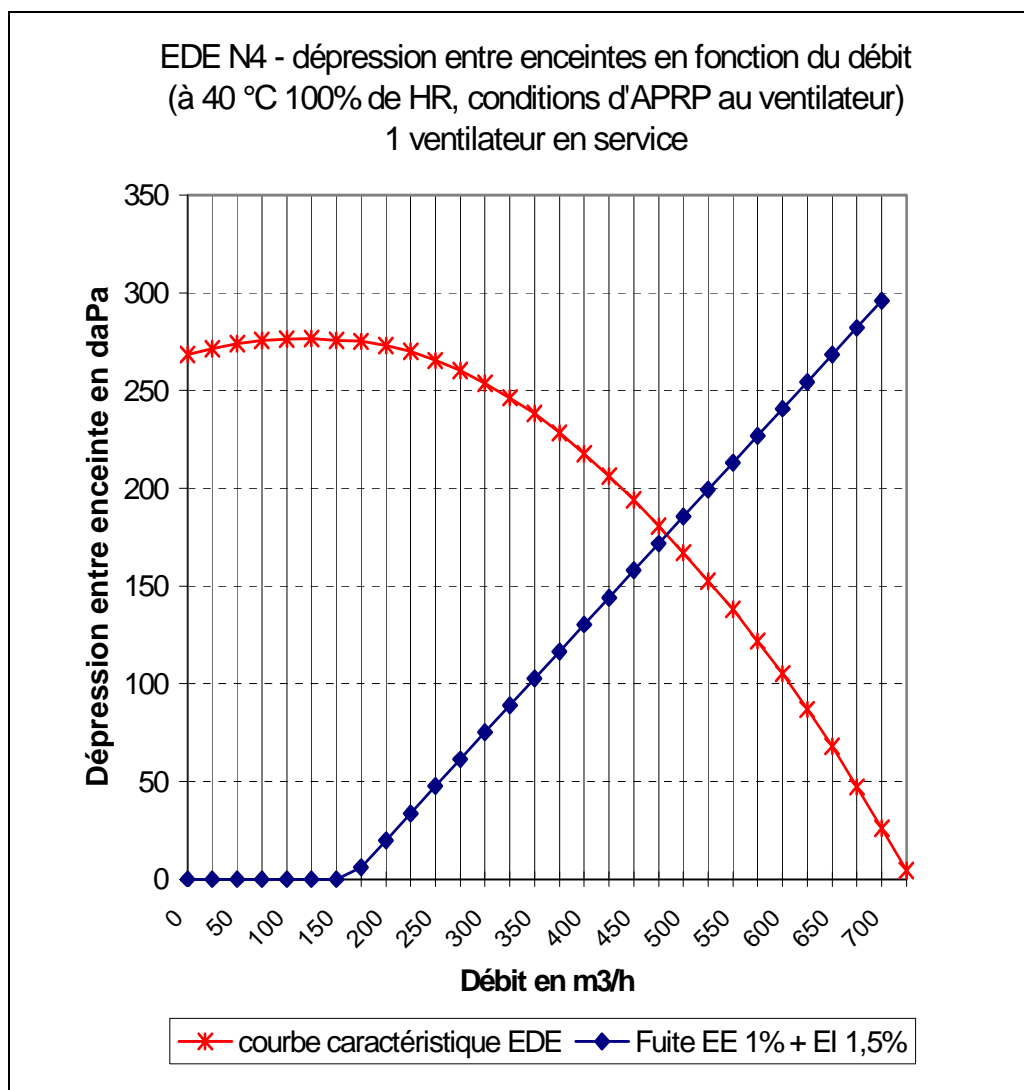
Les enceintes concernées sont les suivantes :

Site	Dépression	Débit
CIV	mesurée	extrapolé (courbe du ventilateur Palier N4) jusqu'à fin 2005 mesuré à partir de 2006
PAL	mesurée	mesuré
GOL	mesurée	mesuré
CHO	mesurée	extrapolé (courbe du ventilateur Palier N4)
CAT	mesurée	extrapolé (courbe de tendance GOL modifiée)
FLA	mesurée	mesuré
BEL	mesurée	mesuré
PEN	mesurée	mesuré

**Tableau 3.1.a : Enceintes concernées par l'étude de variation saisonnière**



## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes



**Figure 3.1.b : Courbe de fonctionnement EDE N4**

Pour les enceintes dont le débit EDE est mesuré, les valeurs de débit ne présentent pas une correspondance bijective avec la dépression, elles peuvent être influencées par des conditions non stabilisées et non prises en compte dans la mesure comme la pression atmosphérique, la température, la vitesse du vent, etc.

C'est le cas de :

- ✓ PAL1 et PAL2 : elles présentent une variation importante du débit même à dépression constante sans qu'il ait été possible de trouver une loi liant débit et dépression. La cause de ces perturbations est vraisemblablement d'origine météorologique (vent, pluie, hygrométrie) mais par manque de précisions, il a été décidé de ne pas tenir compte des valeurs de ce site dans le calcul qui suit.
- ✓ GOL1 et GOL2 : la formule de leur courbe de tendance (considérée comme courbe d'extrapolation du palier P'4) a été utilisée pour extrapoler les valeurs de débit de fuite de CAT, mais elle a été calée pour estimer une courbe enveloppe plutôt qu'une courbe moyenne de valeurs mesurées, en cherchant une allure qui coïncide le mieux avec celle de fonctionnement réel d'un ventilateur EDE (cf. Figure 3.1.b).

### Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

On prend donc en compte les Taux de Fuite tracés sur les figures 3.1.c et 3.1.d.

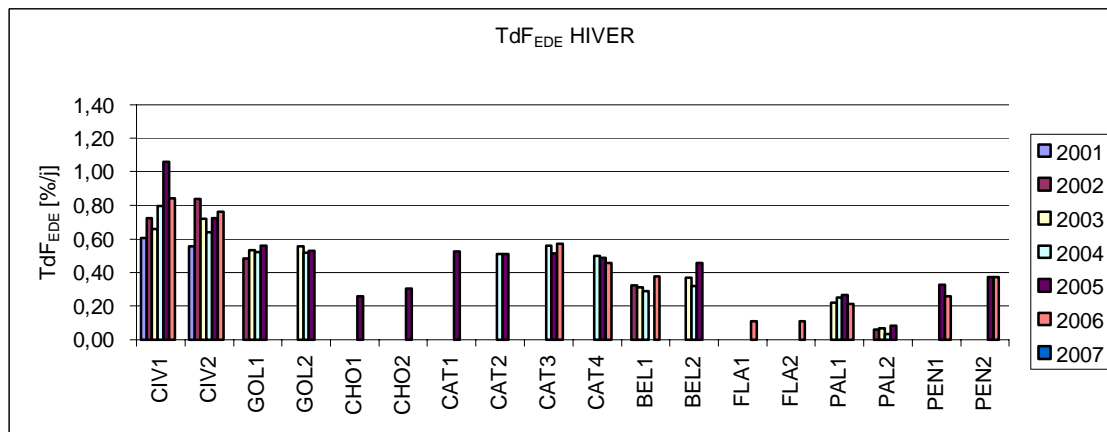


Figure 3.1.c : TdF<sub>HIVER</sub> des PE considérés pour l'étude de variation saisonnière

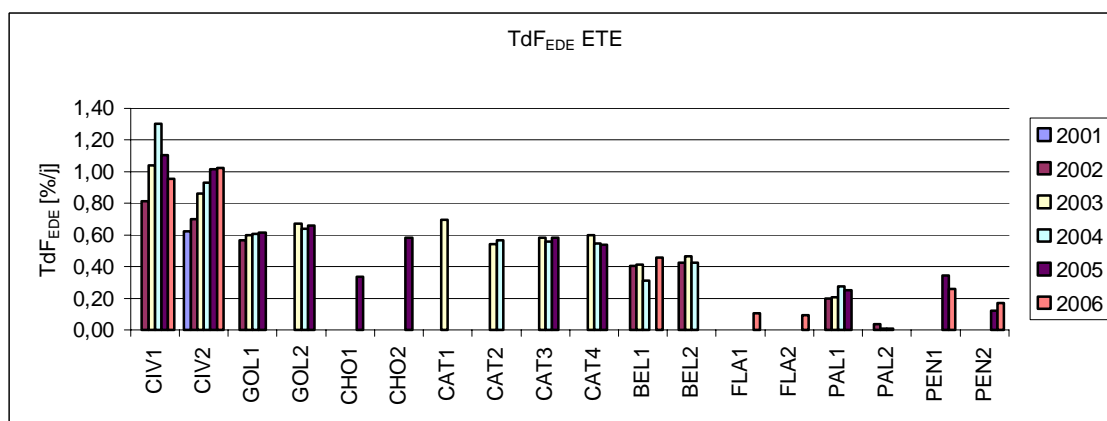
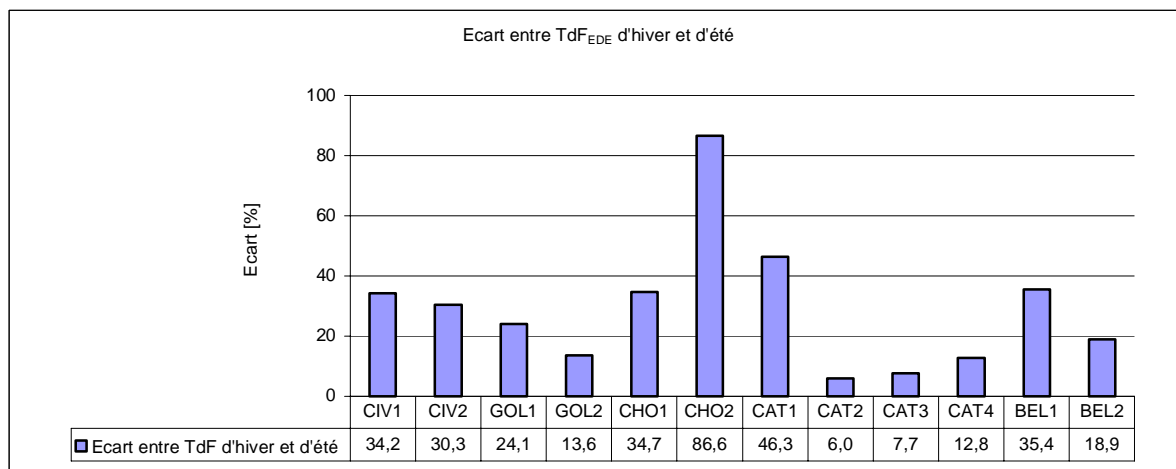


Figure 3.1.d : TdF<sub>ETE</sub> des PE considérés pour l'étude de variation saisonnière

Sur ces graphiques, on peut noter le comportement particulier des PE de Civaux où le TdF a montré une augmentation sensible dans le temps. Pour les autres PE, les variations sont faibles et moins systématiques.

Les comparaisons des TdF des mois d'hiver et d'été (de la même année ou de l'année consécutive, selon la disponibilité) permettent d'aboutir aux valeurs moyennes d'écart entre TdF d'hiver et de l'été représentées sur la figure 3.1.e.

$$Ecart_m = \frac{TdF_{été} - TdF_{hiver}}{TdF_{hiver}}$$

**Estimation de l'étanchéité des Parois Externes****Figure 3.1.e : Etude saisonnière : écart entre TdF d'hiver et d'été**

La valeur d'écart la plus élevée, qui correspond à CHO2, est peu représentative parce que les débits sont relativement faibles et qu'il y a peu de mesures, celles-ci pouvant être influencées par des paramètres non maîtrisés.

De la comparaison des TdF<sub>EDE</sub> on conclut :

- ✓ A CIV1, on trouve un écart moyen entre les valeurs de TdF<sub>EDE</sub> d'hiver et d'été de 34% (30% à CIV2), les valeurs de TdF<sub>EDE</sub> d'été étant supérieures. On confirme donc que **le TdF<sub>EDE</sub> est affecté par les conditions élevées de température et les faibles conditions d'hygrométrie de l'été.**
- ✓ Pour les enceintes de Flamanville et Paluel (non représentées sur la Figure 3.1.e), le comportement saisonnier semble inverse : la plupart des TdF<sub>EDE</sub> de l'été étant inférieurs à ceux de l'hiver (avec un écart moyen de 25% sur des valeurs de débit faibles). Les variations météorologiques saisonnières étant peut-être moins marquées en bord de mer que dans les terres, les données de ces sites sont exclues de l'analyse qui suit.
- ✓ Les enceintes de Penly, aussi en bord de mer, ne montrent pas de comportement saisonnier clair : d'une année sur l'autre, le TdF maximum est en été ou en hiver. On ne les considère donc pas dans l'étude saisonnière.
- ✓ Les enceintes de Saint Alban restent hors analyse aussi, puisqu'il s'agit d'enceintes P4 (faible débit de fuite) pour lesquelles on ne dispose que d'une valeur unique (VD1).
- ✓ Pour les autres enceintes (CIV2, GOL1 et 2, CHO1 et 2, CAT1, 2, 3, et 4 et BEL1 et 2), la variation de TdF<sub>EDE</sub> est de même signe que celle de CIV1, avec des valeurs d'été supérieures à celles d'hiver. Toutes ces valeurs sont donc utilisées au § 3.2 pour le calcul d'écart général moyen.

**Estimation de l'étanchéité des Parois Externes****3.2 Ecart général moyen**

Même si la valeur d'écart général moyen qui suit n'est pas justifiée par des lois physiques, elle donne une idée de la variation des taux de fuite des enceintes P'4 (hors Penly) et N4 en fonction de la saison :

**L'écart général moyen calculé est de 29 % entre l'hiver et l'été. Un second écart, entre les saisons intermédiaires (automne et printemps) et l'été, est également proposé à 15%.**

Ces écarts sont à appliquer aux enceintes P'4 (hors Penly) et N4. Ainsi, en fonction de la date de la dernière mesure, on peut en déduire leur TdF par saison. Pour connaître le TdF à une saison donnée à partir d'une autre, il faudra corriger les valeurs mesurées comme suit :

$$\mathbf{TdF_{ETE} = 1,15 * TdF_{AUTOMNE} = 1,15 * TdF_{PRINTEMPS} = 1,29 * TdF_{HIVER}}$$

**Formule 3.2 : Corrélation entre les TdF<sub>SAISONS</sub>**

Pour les enceintes P4 et Penly, on considérera un TdF constant toute l'année.

Ces analyses aboutissent aux résultats listés dans les colonnes TdF<sub>ETE</sub> ci-dessous :

PE	Visite	Date de mesure	TdF <sub>VC,VDi</sub>	TdF <sub>ETE</sub>	PE	Visite	Date de mesure	TdF <sub>VC,VDi</sub>	TdF <sub>ETE</sub>
FLA1		Réf. [CIPN]		0,118	FLA2	VD1	juin-98	0,125	0,125
PAL1	VD2	juillet-06	0,214	0,214	PAL2	VD2	juillet-05	0,189	0,189
PAL3	VD2	mai-07	0,410	0,410	PAL4	VD1	septembre-98	0,163	0,163
SA1	VD1	octobre-97	0,110	0,110	SA2	VD1	mai-98	0,118	0,118
<b>BEL1</b>	<b>VD1</b>	<b>avril-00</b>	<b>0,348</b>	<b>0,392</b>	BEL2	VD1	juillet-99	0,478	0,478
<b>CAT1</b>	<b>VD1</b>	<b>janvier-98</b>	<b>0,300</b>	<b>0,388</b>	CAT 2	VD1	juillet-98	0,311	0,311
<b>CAT3</b>	<b>VD1</b>	<b>mai-01</b>	<b>0,328</b>	<b>0,370</b>	<b>CAT4</b>	<b>VD1</b>	<b>mai-03</b>	<b>0,420</b>	<b>0,473</b>
<b>GOL1</b>	<b>VD1</b>	<b>mai-01</b>	<b>0,435</b>	<b>0,490</b>	GOL2	VD1	août-04	0,696	0,696
<b>NOG1</b>	<b>VD1</b>	<b>octobre-98</b>	<b>0,174</b>	<b>0,196</b>	<b>NOG2</b>	<b>VD1</b>	<b>mars-99</b>	<b>0,326</b>	<b>0,421</b>
PEN1	VD1	juin-02	0,287	0,287	PEN2	VD1	avril-04	0,270	0,270
<b>CHO1</b>	<b>VC1</b>	<b>décembre-99</b>	<b>0,127</b>	<b>0,164</b>	CHO2	VC1	juillet-00	0,253	0,253
CIV1	VC1	juin-01	0,527	0,527	<b>CIV2</b>	<b>VC1</b>	<b>janvier-02</b>	<b>0,506</b>	<b>0,654</b>

En gras: PE dont le TdF est augmenté ;  
les autres ayant eu leur VD en été, leur TdF n'est pas augmenté

**Tableau 3.2 : Récapitulatif des TdF<sub>VC,VDi</sub> et TdF<sub>ETE</sub>**

Pour l'analyse au chapitre 5 où on établira une loi donnant le débit de fuite en fonction de la surpression dans l'EEE, on partira donc de ces valeurs TdF<sub>ETE</sub> après les avoir traduites en débit massique.

## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

### 3.3 Analyse de l'influence de paramètres d'après les mesures de Civaux 1

Grâce aux nombreuses données recueillies dans le cadre de la Task Force relative aux difficultés de maintien de la dépression dans l'EEE de Civaux 1, il est possible d'analyser la réponse de cette Paroi Externe, en terme de débit de fuite (rapport Débit / Dépression :  $Q/\Delta P$ ) par rapport à la pluviométrie, à la température extérieure et à l'hygrométrie. Pour cela, des graphiques  $Q/\Delta P$  / Temps, Pluviométrie / Temps et Hygrométrie / Temps sont tracés et analysés qualitativement.

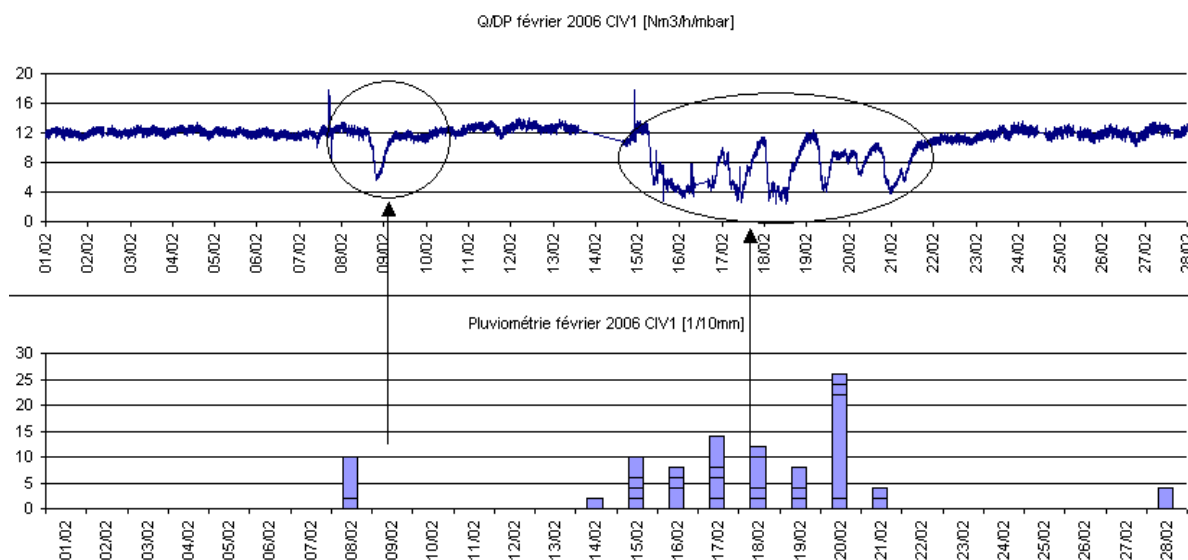
Cette analyse se limite au premier semestre 2006 car le suivi détaillé des conditions dans l'EEE a débuté en janvier 2006 et les injections de fissures en juillet.

#### 3.3.1 Comparaison mensuelle

La comparaison entre la mesure du rapport  $Q/\Delta P$  et la pluviométrie cumulée journalière, montre qu'il y a un impact instantané de cette dernière sur le débit de fuite de la PE :

Le rapport  $Q/\Delta P$  baisse chaque fois qu'il commence à pleuvoir et cette diminution se maintient plusieurs heures après la fin de la pluie. D'un autre côté, indépendamment de la quantité d'eau et de la durée de la pluie, la diminution de  $Q/\Delta P$  atteint fréquemment 70% de sa valeur normale (cf. Figure 3.3.1).

Ce comportement s'explique par le bouchage des fissures et des pores du béton par l'eau liquide qui est ensuite aspirée par la dépression dans l'EEE : le temps de sa migration dans l'épaisseur de la paroi, son efficacité varie mais ne s'annule qu'après une douzaine d'heures.



**Figure 3.3.1 Influence de la pluie dans les fuites de la Paroi Externe**

Dans les cas analysés après réparations, la valeur de  $Q/\Delta P$  baisse presque jusqu'à 0.

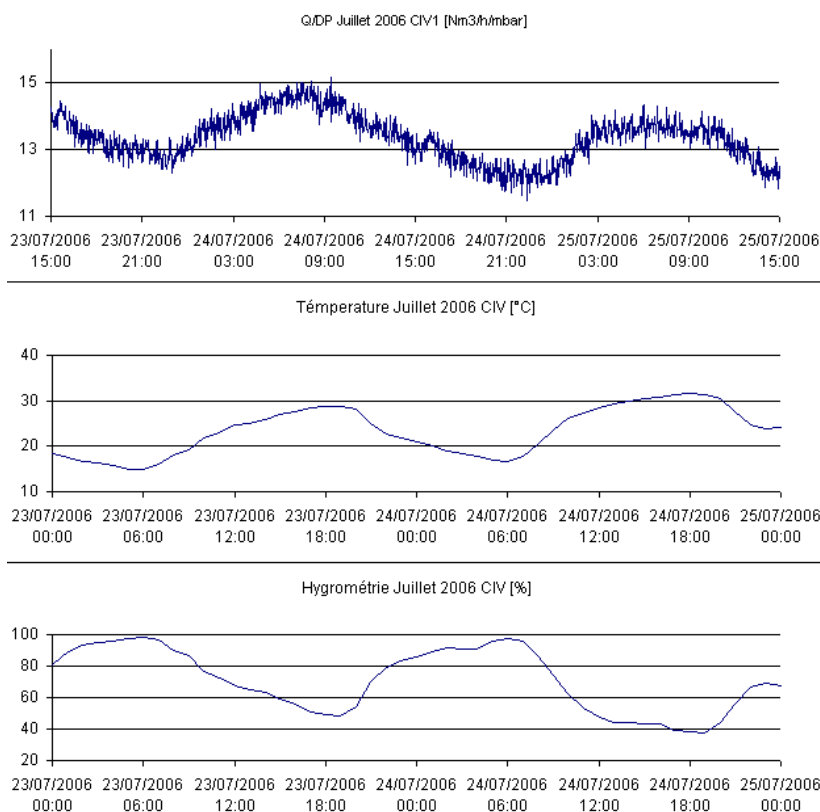
## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

## 3.3.2 Comparaison quotidienne

La méthode suivie ici est de prendre des groupes de deux jours consécutifs (hors travaux) avec un débit de fuite normal (non affecté par la pluie), et comparer la variation de Débit / Dépression ( $Q/\Delta P$ ) à la variation de la température et de l'hygrométrie. Cet exercice est de moindre importance dans la mesure où les variations du ratio  $Q/\Delta P$  sont d'amplitude limitée ( $\pm 10\%$ ).

D'un côté on remarque que la variation de température est symétrique de celle de l'hygrométrie (pics de température avec creux d'hygrométrie et vice versa). D'un autre côté on voit que la réponse est différente en fonction de la saison de l'année, principalement parce que dans les mois d'été l'amplitude thermique jour/nuit est doublée par rapport à celle de l'hiver.

En revanche, les relations entre la température et le rapport  $Q/\Delta P$  ne sont pas très explicites : en été, il y a un décalage d'environ 9 h entre le pic de température et celui de  $Q/\Delta P$  (cf. Figure 3.3.2) ; en hiver, les fluctuations sont moindres. Ce décalage peut vraisemblablement être expliqué par le gradient de température entre les 2 côtés de la paroi (l'EEE étant à une température constante d'environ 25°C).



**Figure 3.3.2 Influence de la température et l'hygrométrie dans les fuites de la PE de CIV1 avant réparations ( $Q/\Delta P$  décalé de - 15 heures, soit + 9 heures)**

Cette analyse ne peut être confirmée par l'évolution de  $Q/\Delta P$  après l'injection des fissures car les valeurs et donc leur évolution sont faibles.

## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

### 4. Données pour les lois Débit (SurPression)

#### 4.1 Données de base

En complément de la référence [Gra98], précédente étude relative au même sujet, sur laquelle se base en partie la présente analyse, les hypothèses suivantes sont proposées dans la référence [RecAG] :

- ✓ Les fuites sont exclusivement gazeuses, car on considère que l'eau se condense majoritairement dans l'EEE (température rarement supérieure à 50°C) : elle ne passe ni par les fissures, ni par le réseau poreux de la PE. Le gaz sera donc assimilé à de l'air (masse molaire de 29 g/mol). Cette hypothèse est légèrement conservatrice : s'il y avait de la vapeur, d'une part, elle pourrait se condenser dans les fissures, créant des bouchons d'eau qui limiteraient les fuites et d'autre part, la vapeur étant moins lourde que l'air, les débits massiques seraient inférieurs (les débits volumiques, équivalents).
- ✓ Température dans l'EEE égale à 20°C (ce qui est conservatif : on a plutôt 25°C en fonctionnement normal et on pourrait atteindre 50°C en AG)
- ✓ Température atmosphérique égale à 20°C
- ✓ Coefficient de tortuosité des fissures égal à 0,7
- ✓ Utilisation des formules de Darcy (écoulement laminaire en milieux poreux) et de Poiseuille (écoulement laminaire en milieux fissurés) pour calculer les débits de fuite diffuse et de fuite par les fissures respectivement, le débit de fuite total étant la somme des deux :

$$Q_m = \frac{K \cdot s \cdot M}{\mu \cdot e \cdot R \cdot (T_{EEE} + T_{atm})} \cdot (P_{amont}^2 - P_{aval}^2) \quad Q_m = \frac{n \cdot \zeta \cdot L \cdot M}{24 \cdot \mu \cdot e \cdot R} \cdot \frac{(P_{amont}^2 - P_{aval}^2)}{T_{moy}} \cdot w^3$$

**Formules 4.1 : Formule de Darcy**

et

**Formule de Poiseuille**

où les paramètres utilisés sont les suivants :

$Q_m$	débit de fuite massique [kg/h]
$K$	perméabilité géométrique équivalente [m <sup>2</sup> ]
$s$	surface traversée par le débit [m <sup>2</sup> ]
$P_{aval}$	pression dans l'EEE [Pa]
$P_{amont}$	pression extérieur [Pa]
$\mu$	coefficient de viscosité dynamique [Pa.s]
$e$	épaisseur de la paroi [m]
$M$	masse molaire de l'air (29 g/mol)
$R$	constante de gaz parfaits (8,314 J/mol/°K)
$T_{EEE}$	Température dans l'EEE
$T_{atm}$	Température atmosphérique
$T_{moy}$	Moyenne de température dans l'EEE et atmosphérique
$n$	nombre de fissures
$\zeta$	tortuosité des fissures
$L$	longueur de fissures [m]
$w$	ouverture des fissures [m]

**Estimation de l'étanchéité des Parois Externes**

Les valeurs de fuite retenues sont celles qui correspondent aux dernières mesures réalisées dans des conditions équivalentes, à savoir pendant les visites décennales : VC1, VD1 ou VD2 (en retenant la mesure la plus récente pour chaque enceinte). Seule la valeur de Civaux 1 a été augmentée de 60%, afin d'obtenir des valeurs cohérentes avec les dernières mesures réalisées sur cette tranche avant injections.

Aucune amplification n'a été appliquée au titre d'une éventuelle variation saisonnière (§ 3) car les dernières VD des Enceintes Types P'4 et N4 étaient toutes en été.

La perméabilité mesurée sur éprouvettes en béton séchées à poids constant se trouve parmi les données disponibles relatives aux Enceintes Types. Elle permet d'estimer la part de la fuite mesurée qui passe par le réseau poreux et d'en déduire celle qui passe par les fissures.

Enceinte	Fuite totale retenue [Nm <sup>3</sup> /h] sous 3 hPa	Perméabilité [m <sup>2</sup> ]
PAL1	12	2 E-16
FLA2	8	3 E-16
CAT2	14	2 E-16
BEL1	16	5 E-17
CHO2	12	3 E-16
CIV1 avant injections	40	5 E-17
CIV1 après injections	10	

**Tableau 4.1 : Données d'entrée retenues pour les ET : Fuite totale et Perméabilité**

Nota : les perméabilités listées dans le tableau 4.1 donnent des débits de fuite diffuse de l'ordre de 0,06 à 0,40 Nm<sup>3</sup>/h sous 3 hPa de dépression, soit de l'ordre d'1% de la fuite totale, ce ratio diminuant encore lorsque des fissures s'ouvrent.

Cette fuite diffuse sera intégrée dans les estimations qui suivent, mais l'attention sera centrée sur les fuites par les fissures.

## 4.2 Estimation de la fissuration de retrait

Les relevés de fissures de Civaux 1 font état d'environ 2 km de fissures. D'après la perméabilité et la fuite mesurée avant réparations (de l'ordre de 300 Nm<sup>3</sup>/h sous 22 hPa), la formule de Poiseuille permet d'estimer une ouverture moyenne des fissures à 150 µm.

Si on ne considérait pas toutes les fissures débitantes, la longueur des fissures serait inférieure et leur ouverture supérieure pour retrouver les débits mesurés. Cela n'aurait aucun impact sur les débits estimés tant que l'ouverture des fissures reste constante, mais, au-delà, l'augmentation d'ouverture estimée par la formule de l'EC2 (cf. § 4.3) étant indépendante de l'ouverture initiale, les débits seraient inférieurs. Le choix de 2 km de fissures pour Civaux 1 avant injections est donc raisonnablement conservatif.

De plus, environ 1400 m de fissures ont été injectés à Civaux 1 en 2006. En considérant qu'il reste donc 600 m de fissures ouvertes à 150 µm (les autres étant fermées par l'injection), on estime ainsi la fuite actuelle à environ 120 Nm<sup>3</sup>/h sous 30 hPa pour une valeur réelle de 130.



**Estimation de l'étanchéité des Parois Externes**

Nota : Cette hypothèse ne remet nullement en cause la qualité des injections, mais les mesures de débit après réparations montrent que la fuite a été réduite massivement, mais elle reste largement supérieure à la seule fuite diffuse.

D'après les données relatives aux autres Enceintes Types disponibles, l'ouverture efficace des fissures ne pouvant pas être caractérisée, on décide de prendre la même valeur d'ouverture de fissures de 150 µm et de caler les longueurs sur le débit de fuite mesuré. On obtient ainsi les valeurs listées dans le tableau 4.2 :

Enceinte	Longueur fissurée [m]
PAL1	600
FLA2	400
CAT2	700
BEL1	800
CHO2	600
CIV1 avant injections	2 000
CIV1 après injections	600 à 150 µm et 1400 à 0 µm

**Tableau 4.2 : Longueurs de fissures des ET**

La différence entre Civaux (avant injections) et le reste du Parc s'explique par la piètre qualité du béton B11 et notamment son retrait important. A l'inverse, la Paroi Externe P4 se distingue par une géométrie plus longiligne (pas de surépaisseur à la jonction fût-dôme, donc pas de retrait différentiel et ainsi, moins de fissuration) et donc moins fuyarde. Enfin, les autres disparités proviennent d'écarts moindres dans les qualités de béton et les dispositions constructives.

### 4.3 Evolution de la fissuration

Pour le calcul de l'ouverture des fissures, la méthode consiste à partir d'une ouverture initiale due au retrait (150 µm pour toutes les enceintes avant injections, 0 pour les fissures injectées) et de lui ajouter l'ouverture qui se produira lors de l'arrivée du béton à sa résistance à la traction sous l'effet de la pression. A ce moment-là, il n'accompagnera plus à la déformation de l'acier, les fissures s'ouvriront.

Le calcul d'ouverture de fissures sera basé sur les formules de l'Eurocode 2 (cf. [EC2]) afin d'être cohérent avec la réglementation actuelle :

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

$w_k$  ouverture de fissures

$s_{r,max}$  espacement maximal des fissures

$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$  déformation unitaire différentielle acier-béton

**Formule 4.3 : Formule EC2 d'estimation de la fissuration (suite page suivante)**

## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - \frac{k_t \cdot f_{ct,eff} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s}}{E_s}$$

Si  $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \leq 0$  on considère  $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 0$

Si  $0 < (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) < 0.60 \cdot \frac{\sigma_s}{E}$  on considère  $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 0.60 \cdot \frac{\sigma_s}{E}$

Si  $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \geq 0.60 \cdot \frac{\sigma_s}{E}$  on considère  $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - \frac{k_t \cdot f_{ct,eff} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s}}{E_s}$

$\sigma_s$  contrainte de traction de l'acier

$k_t$  facteur dépendant de la durée de la charge

$f_{ct,eff}$  contrainte de traction admissible dans la section effective du béton

$E_s$  module d'Young de l'acier

$E_{cm}$  module d'Young moyen du béton

$\alpha_e$  rapport  $E_s/E_{cm}$

$\rho_{p,eff}$  taux de ferrailage effectif, en considérant la section fissurée du béton

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi}{\rho_{p,eff}} \quad \text{pour une séparation des armatures **inférieure** à } 5 \cdot (c + \phi/2)$$

$$s_{r,max} = 1.3 \cdot (h - x) \quad \text{pour une séparation des armatures **supérieure** à } 5 \cdot (c + \phi/2)$$

$k_1, k_2, k_3, k_4$  coefficients d'application recommandés par l'EC2

$c$  enrobage

$\phi$  diamètre des barres

$h$  épaisseur de la paroi

$x$  position de l'axe neutre à la fissuration

**Formule 4.3 : Formule EC2 d'estimation de la fissuration (suite et fin)**

Comme on le verra au § 5, les débits générés par les fissures de retrait (dont l'ouverture peut augmenter avec la pression dans l'EEE) sont tels qu'aucune nouvelle fissure ne devrait s'ouvrir car la fuite empêcherait la mise en pression de l'EEE.

**Estimation de l'étanchéité des Parois Externes****5. Lois Débit (SurPression)****5.1 Méthode**

Avec les hypothèses listées au § 4, les formules de Darcy et Poiseuille [Formules 4.3] ainsi que celles de l'EC2 [Formule 4.3], on dispose de tous les éléments nécessaires à l'établissement de la réponse des PE vis-à-vis de l'éventuelle augmentation de la pression dans l'EEE.

La Loi Débit (SurPression) qu'on obtiendra pour chaque enceinte aura deux parties (cf. Figure 5.2.a) :

1. Tant que le béton n'arrive pas à sa résistance en traction, la formule 4.3 donne des valeurs négatives pour l'ouverture des fissures, valeurs qui, en réalité correspondent à zéro, puisque le béton et l'acier se déforment de façon identique. L'ouverture des fissures reste constante, c'est celle due au retrait.

La courbe dans le plan Débit – SurPression donne une ligne presque droite puisque l'ouverture des fissures est constante (les formules de Darcy et Poiseuille considèrent la pression à la puissance 2, mais comme l'écart entre les pressions est faible, la courbure n'est pas visible).

Cette partie de la courbe est également valable pour estimer la fuite entrant dans un EEE en dépression (en fonctionnement normal).

2. La formule de l'EC2 commence à donner des valeurs d'ouverture de fissure positives quand la résistance du béton en traction est atteinte. L'EC2 impose que la valeur de déformation unitaire différentielle ( $\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}$ ) soit supérieure à 60% de celle qui correspond à l'acier seul ( $\sigma_s/E_s$ ). Pour certaines valeurs de pression cette condition n'est pas respectée, il faut alors considérer  $\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm} = 0,60 * \sigma_s/E_s$ .

Ensuite, l'ouverture des fissures augmente avec la pression, le débit de fuite aussi. La courbe dans le plan Débit – SurPression prend alors une certaine courbure, puisque l'équation de Poiseuille (applicable puisque l'écoulement calculé reste laminaire) considère l'ouverture  $w$  à la puissance 3 et la pression à la puissance 2.

Les lois Débit (SurPression) seront calculées jusqu'à 200 hPa de surpression dans l'EEE car, au-delà, les débits de la Paroi Externe sont trop largement supérieurs aux fuites maximales estimées de la Paroi Interne (au pire, ponctuellement, on a trouvé 6000 kg/h, mais une partie serait condensée). De fait, certains graphiques se limitent à 120 hPa pour plus de lisibilité des zones les plus intéressantes (au niveau des faibles pressions et de l'ouverture des fissures).

**5.2 Application aux Enceintes Types****5.2.1 Lois Débit (SurPression) pour chaque Enceinte Type**

La méthode exposée précédemment est appliquée aux Enceintes Types avec, pour chacune, ses caractéristiques propres (géométrie, béton, perméabilité...). Les résultats sont fournis avec détails en annexe et synthétisés sur les graphiques suivants.

## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

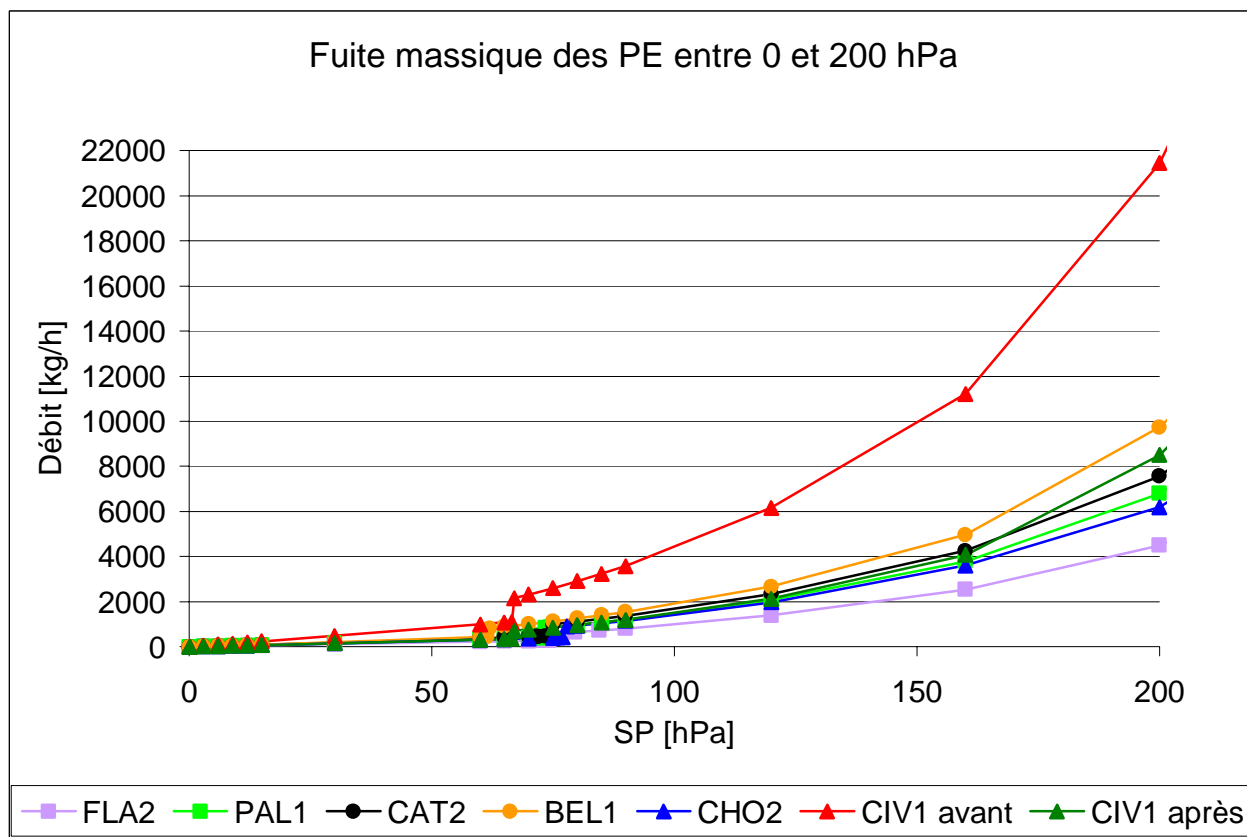


Figure 5.2.a : Loi de variation Débit (SurPression) des PE des ET [0 à 200 hPa]

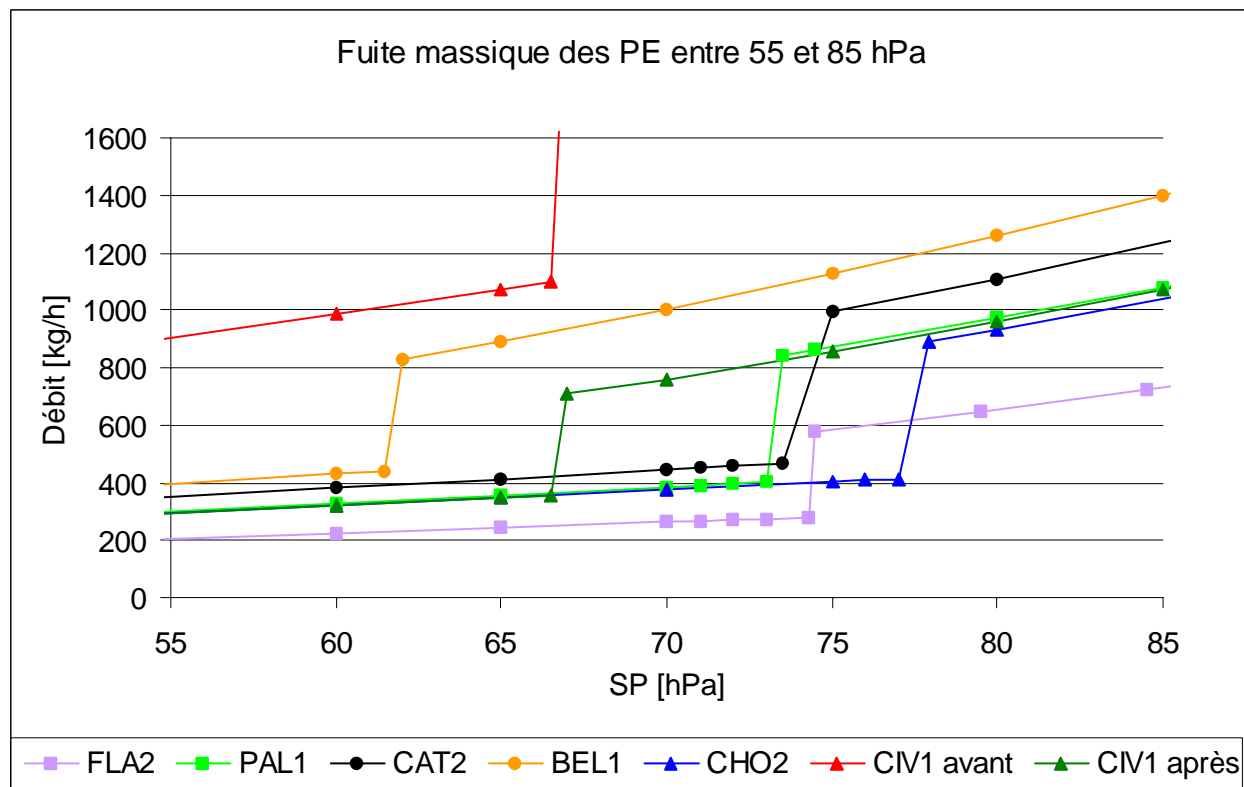


Figure 5.2.b : Loi de variation Débit (SurPression) des PE des ET [55 à 85 hPa]

## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

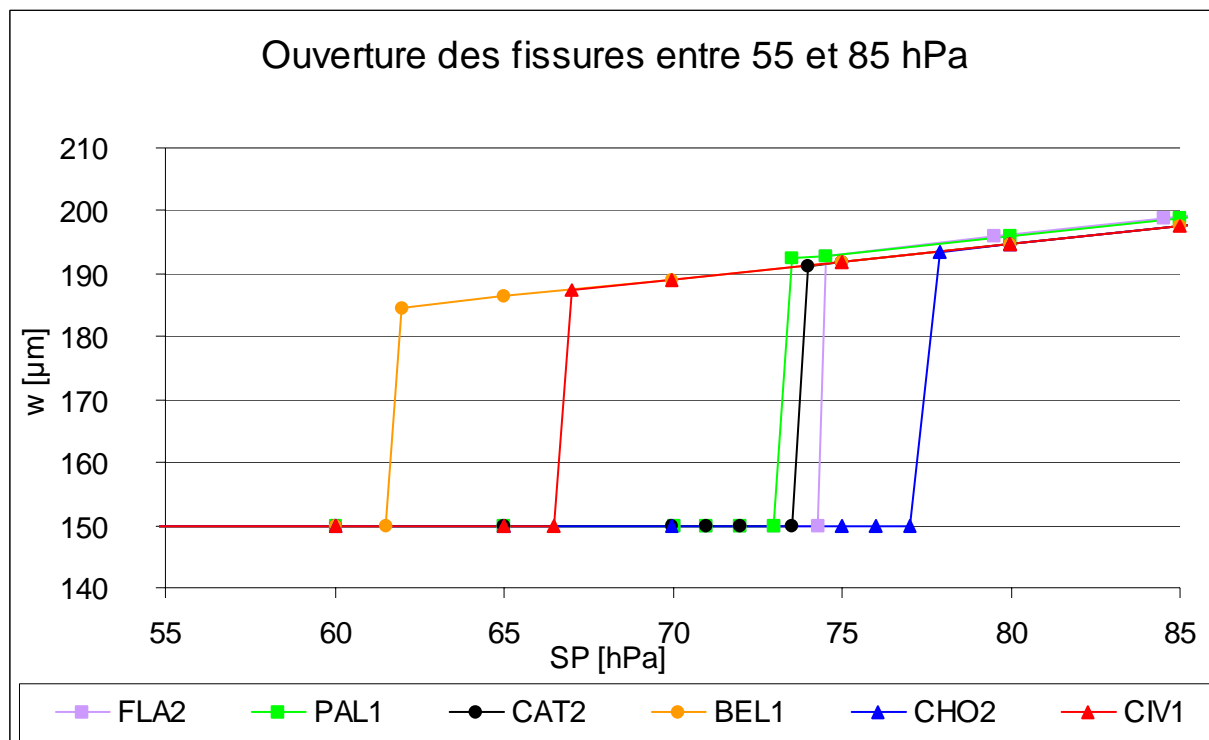


Figure 5.2.c : Ouverture des fissures des PE des ET [55 à 85 hPa]

### 5.2.2 Analyse comparative des paramètres

Suite à ce calcul, on peut comparer les lois Débit (SurPression) des ET selon les paramètres cités ci-dessous :

- ✓ Déformation unitaire du béton à la fissuration  $\epsilon_{cm}$  : deux paramètres influencent cette valeur et donc le débit par fissures. D'une part, le Module d'Young du béton  $E_{cm}$  qui, s'il est élevé, implique une augmentation du débit (par diminution de  $\alpha_e = E_s / E_{cm}$ ,  $E_s$  étant identique pour toutes les enceintes). D'autre part, on a la résistance du béton à la traction, qui si elle est élevée amène à une diminution du débit.  
En combinant ces deux valeurs dans la formule de l'EC2 [Formule 4.3], on observe que plus la valeur de  $\epsilon_{cm}$  est élevée, plus l'ouverture des fissures et donc leur débit diminuent. Une valeur  $\epsilon_{cm}$  supérieure induit aussi l'ouverture des fissures à une surpression supérieure.  
La résistance du béton à la traction influence également la pression à partir de laquelle les fissures vont s'ouvrir : plus le béton est résistant, plus la pression d'ouverture des fissures va être élevée.
- ✓ Longueur de fissuration : ce paramètre affecte de façon proportionnelle les valeurs issues de la formule de Poiseuille, et notamment la variation soudaine de débit quand le béton arrive à sa résistance à la traction. Plus la longueur de fissuration est élevée, plus la fuite est importante et plus l'effet de l'ouverture des fissures est marqué.

**Estimation de l'étanchéité des Parois Externes****5.3 Lois Débit (SurPression) pour les autres enceintes**

Pour étendre ces calculs à toutes les enceintes du Parc, la prise en compte des mesures et des caractéristiques particulières disponibles a conduit aux regroupements détaillés ci-dessous. Les enceintes dont les valeurs du Module d'Young et de  $TdF_{VC,VDi}$  sont homogènes sont représentées par l'une d'elles et les autres sont étudiées séparément.

Palier	Site	Tranche	Module retenu [MPa]	Fuite totale retenue [Nm <sup>3</sup> /h] sous 3 hPa	Perméabilité [m <sup>2</sup> ]	Longueur fissurée [m]	Parois Externes sélectionnées
P4	Flamanville	FLA1 <b>FLA2</b>	22500	8	3 E-16	400	<b>FLA2</b>
	Paluel	<b>PAL1</b> PAL2 PAL3 PAL4	41913	12	2E-16	600	<b>PAL1</b>
	Saint-Alban	SA1 SA2	33100	6	1 E-16	300	SA
P'4	Belleville	<b>BEL1</b> BEL2	31700	16	5 E-17	800	<b>BEL1</b>
	Cattenom	CAT1 <b>CAT2</b> CAT3	35600	14	2 E-16	700	<b>CAT2</b>
		CAT4	37430	22	2 E-16	1100	CAT4
	Golfech	GOL1	45556	22	1 E-16	1100	GOL1
		GOL2	44280	30	1 E-16	1500	GOL2
	Nogent-sur-Seine	NOG1	45900	10	6 E-17	500	NOG1
		NOG2	43600	18	6 E-17	900	NOG2
	Penly	PEN1	30872	12	1 E-16	600	PEN
PEN2							
N4	Chooz	CHO1 <b>CHO2</b>	36200	12	3 E-16	600	<b>CHO2</b>
	Civaux	<b>CIV1</b> CIV2	27300	40	5 E-17	2000	<b>CIV1</b>

**Tableau 5.3 : Parois Externes représentatives du Parc 1300-N4**

Sont donc présentées, en annexe, les courbes SA, CAT4, GOL1, GOL2, NOG1, NOG2 et PEN. Elles présentent bien, toutes, l'allure des courbes précédentes.

**Estimation de l'étanchéité des Parois Externes****6. Conclusion**

La fonction principale de l'enceinte de confinement est d'assurer une protection radiologique satisfaisante vis-à-vis de l'environnement et d'empêcher le relâchement de produits de fission dans l'atmosphère. Sur les Enceintes à Double Paroi, le confinement repose sur la conjonction d'une étanchéité statique (béton précontraint de la Paroi Interne et béton armé de la Paroi Externe) et dynamique (système de mise en dépression de l'Espace Entre Enceintes).

Si beaucoup d'études, d'essais et de travaux ont été réalisés pour mieux appréhender et améliorer l'étanchéité de la Paroi Interne, de récentes difficultés à maintenir la dépression dans les Espaces Entre Enceintes de Civaux ont montré le besoin de s'intéresser aux Parois Externes.

Cette note est la synthèse du stage de 5<sup>ème</sup> année de l'ENISE en Génie Civil de Mariana TRONCOSO. Elle constitue, en outre, le livrable 7 du programme [ProgAG].

**6.1 Influence des conditions environnementales**

Le résultat le plus important de l'étude de variation saisonnière est la confirmation de la corrélation entre saison et débit de fuite des Parois Externes, le débit étant supérieur en été à celui en hiver. Cet écart ne s'applique pas à toutes les enceintes notamment en raison de la géométrie (P4) et de la proximité à la mer (Paluel, Flamanville et Penly).

L'écart général moyen calculé est de 29 % entre l'été et l'hiver. Un second écart, entre les saisons intermédiaires (automne et printemps) et l'été, est également proposé à 15%.

L'analyse du rapport Débit / Dépression ( $Q/\Delta P$ ) de Civaux 1 avant travaux en fonction de la température, de l'hygrométrie et de la pluviométrie du site conclut à l'établissement d'un rapport étroit entre la météorologie et la réponse de la Paroi Externe :

- L'eau de pluie bouche les pores et les fissures les plus fines, elle induit de fortes diminutions du Taux de Fuite (effet très marqué avant réparations : diminution de 70% - pas de mesure depuis l'application du produit bouche-pores) ;
- Pendant l'été, les valeurs élevées de  $Q/\Delta P$  sont influencées par les températures élevées, avec un retard de 9 heures entre les pics de température et ceux de  $Q/\Delta P$  vraisemblablement dû à l'inertie thermique du béton.

**6.2 Lois de variation Débit (SurPression)**

Des lois de variation du Débit de fuite des Parois Externes en fonction de la surpression dans les Espaces Entre Enceintes en cas d'accident ont été proposées. Elles expriment un comportement réaliste des Parois Externes d'après leurs caractéristiques (géométriques, mécaniques), rendu légèrement conservatif par le choix des conditions météorologiques estivales (le débit étant 15 à 30% supérieur aux autres saisons).

**La tendance moyenne est une fuite de l'ordre de 180 kg/h à 30 hPa de surpression, 360 kg/h à 60 hPa (valable également pour estimer la fuite entrant dans un EEE en dépression) ; puis, vers 70 hPa, les fissures s'ouvriraient sensiblement. La fuite atteindrait alors 1300 kg/h à 90 hPa et 2200 kg/h à 120 hPa.**

## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

Cette tendance moyenne correspond globalement au comportement de la Paroi Externe de **Cattenom 2** qui peut donc être considérée comme la plus représentative du Parc (cf. Figures 6.2.a et 6.2.b).

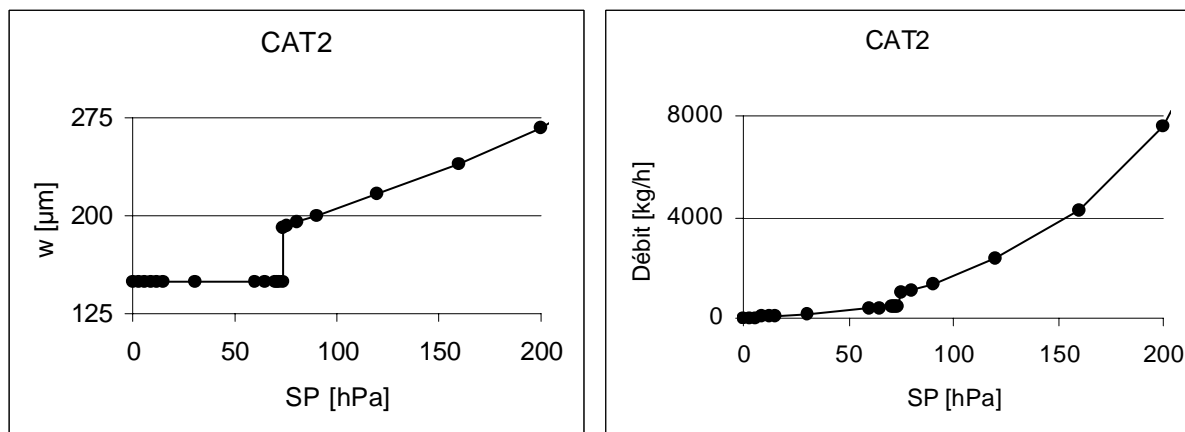


Figure 6.2.a : Lois Ouverture de fissure  $w(SP)$  et Débit  $Q(SP)$  de CAT2 [0 à 200 hPa]

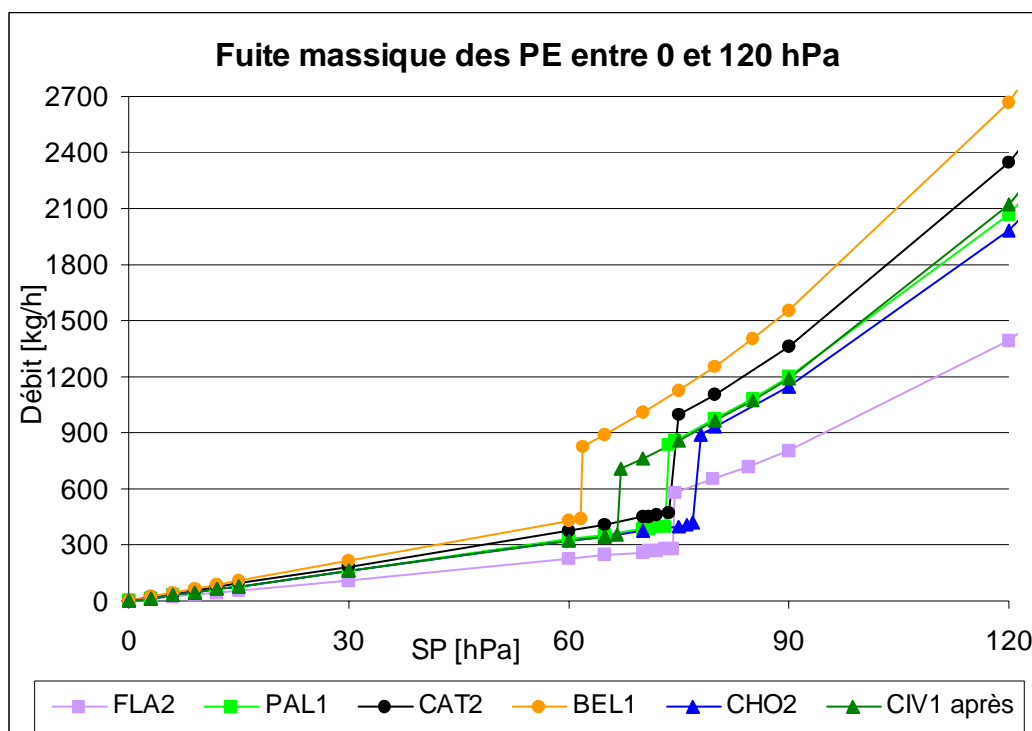


Figure 6.2.b : Loi de variation Débit (SP) des PE des ET (hors CIV1 avant) [0 à 120 hPa]

Pour plus de détails, se référer aux figures 5.2.a et 5.2.b en page 20 ; ou à l'annexe.



## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

## Annexe : Détails des lois Débit (SurPression)

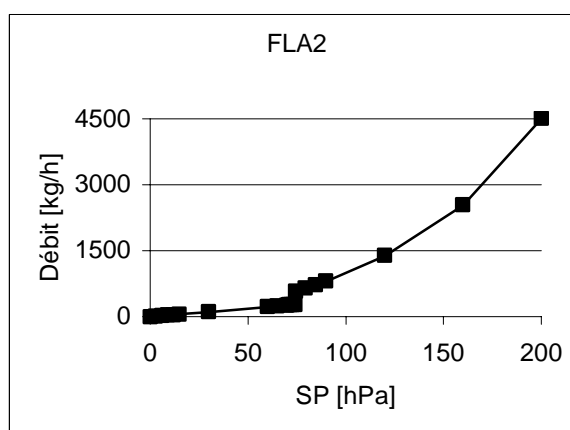
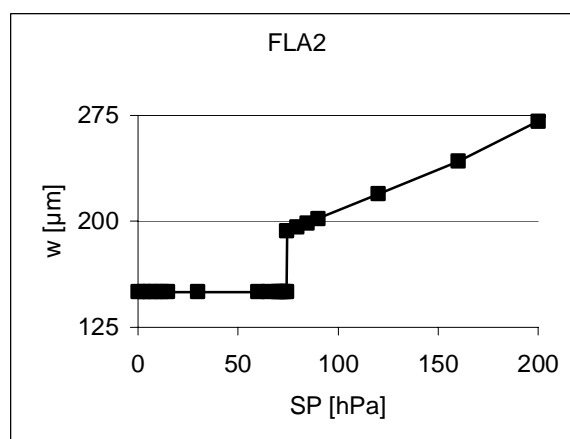
Les lois liant le Débit à la SurPression Q(SP) sont présentées sous formes de tableaux et de graphiques l'ordre suivant :

- Enceintes Types P4 (Flamanville 2 et Paluel 1),
- Enceintes Types P'4 (Belleville 1 et Cattenom 2),
- Enceintes Types N4 (Civaux 1 et Chooz 2),

Viennent ensuite les autres enceintes étudiées, listées au § 5.3, dans l'ordre P4, P'4 et N4.

Nota : les débits sont donnés ici en Taux de Fuite en air ramené aux conditions du DAC<sup>2</sup> et en débit massique [kg/h]. Pour convertir ce-dernier en débit volumique, d'après la loi des gaz parfaits, il suffit de le multiplier par RT/MP, soit environ 0,78. On obtient alors un débit volumique normé ([Nm<sup>3</sup>/h]).

<b>Flamanville 2</b>			
SP [hPa]	w [µm]	Q <sub>Total</sub> [kg/h]	TdF <sub>DAC</sub> [%/j]
3,0	150	10,9	0,150
6,0	150	21,8	0,150
9,0	150	32,7	0,151
12,0	150	43,7	0,151
15,0	150	54,7	0,151
30,0	150	110,3	0,152
60,0	150	223,7	0,154
65,0	150	243,0	0,155
70,0	150	262,3	0,155
71,0	150	266,2	0,155
72,0	150	270,0	0,155
73,0	150	273,9	0,155
74,3	150	279,0	0,155
<b>74,5</b>	<b>193</b>	<b>580,7</b>	<b>0,323</b>
79,5	196	648,8	0,338
84,5	199	721,5	0,354
90,0	202	807,2	0,371
120,0	219	1390,8	0,480
160,0	242	2539,9	0,657
200,0	271	4499,0	0,932



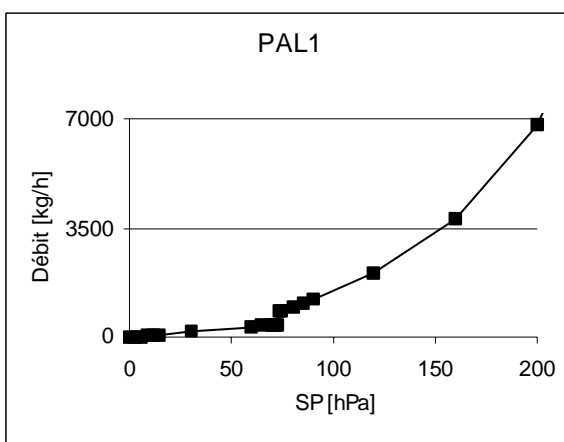
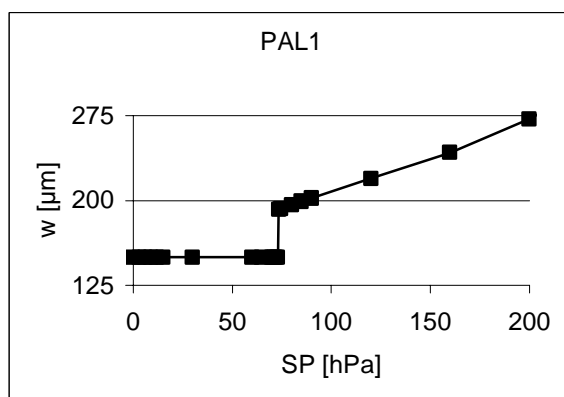
<sup>2</sup> Le  $TdF_{DAC}$  des PE est défini comme le débit de fuite de la PE ramené à 3hPa de dépression (en adoptant un comportement symétrique surpression – dépression), rapporté au volume total délimité par le parement interne de l'enceinte externe. Les valeurs sont alors exprimées en %/jour (%/j).

$$TdF_{DAC} = \frac{Q_v}{SP \cdot C_{DAC}}$$

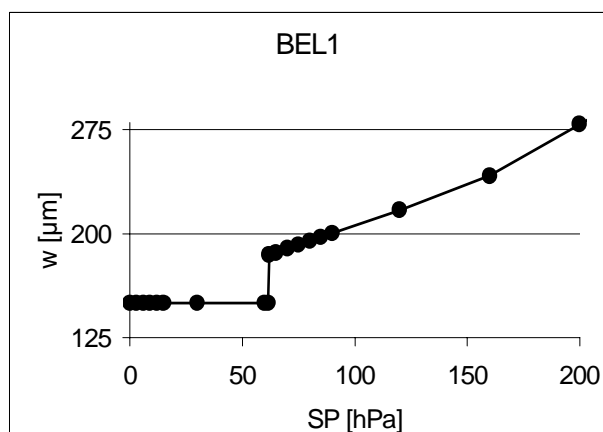
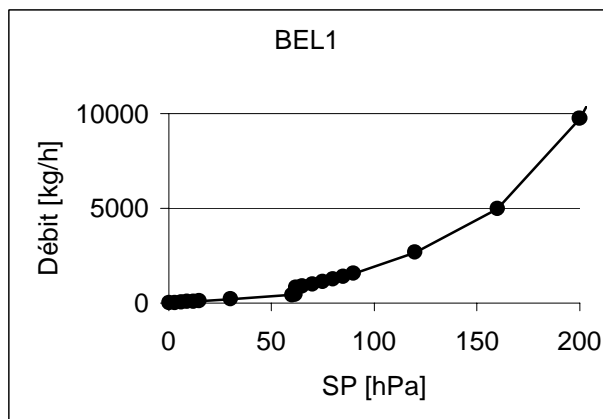
$$C_{DAC} = \frac{V_{enc} \cdot 1 \text{ jour} \cdot 1h}{3hPa \cdot 24h \cdot 3600s \cdot 100}$$

**Estimation de l'étanchéité des Parois Externes****Paluel 1**

SP [hPa]	w [ $\mu\text{m}$ ]	Q <sub>Total</sub> [kg/h]	TdF <sub>DAC</sub> [%/j]
3,0	150	15,9	0,219
6,0	150	31,8	0,220
9,0	150	47,8	0,220
12,0	150	63,9	0,220
15,0	150	80,0	0,221
30,0	150	161,1	0,222
60,0	150	326,9	0,226
65,0	150	354,9	0,226
70,0	150	383,2	0,227
71,0	150	388,8	0,227
72,0	150	394,5	0,227
73,0	150	400,2	0,227
<b>73,5</b>	<b>192</b>	<b>840,6</b>	<b>0,474</b>
74,5	193	860,1	0,478
80,0	196	972,0	0,503
85,0	199	1081,0	0,527
90,0	202	1197,5	0,551
120,0	219	2068,1	0,714
160,0	242	3785,4	0,980
200,0	272	6793,3	1,407

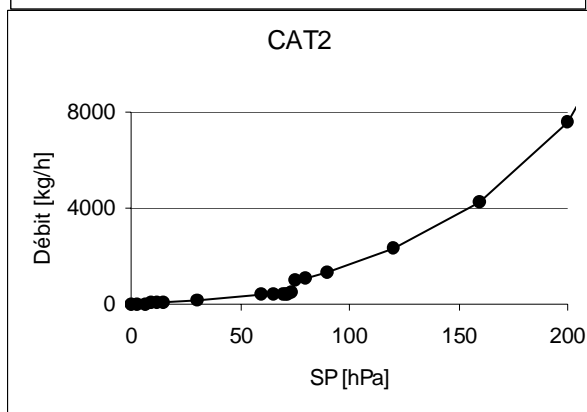
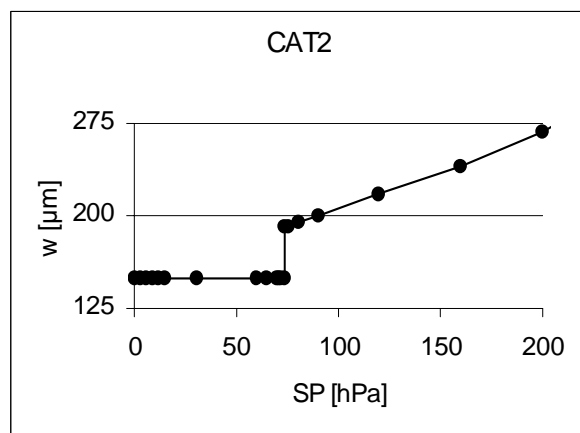
**Belleville 1**

SP [hPa]	w [ $\mu\text{m}$ ]	Q <sub>Total</sub> [kg/h]	TdF <sub>DAC</sub> [%/j]
3,0	150	20,8	0,350
6,0	150	41,7	0,350
9,0	150	62,6	0,351
12,0	150	83,6	0,351
15,0	150	104,7	0,352
30,0	150	210,9	0,354
60,0	150	428,0	0,360
61,5	150	439,1	0,360
<b>62,0</b>	<b>185</b>	<b>824,8</b>	<b>0,671</b>
65,0	186	889,7	0,690
70,0	189	1004,3	0,723
75,0	192	1127,0	0,758
80,0	195	1258,4	0,793
85,0	198	1398,6	0,830
90,0	200	1548,3	0,867
120,0	217	2664,0	1,119
160,0	241	1970,4	1,566

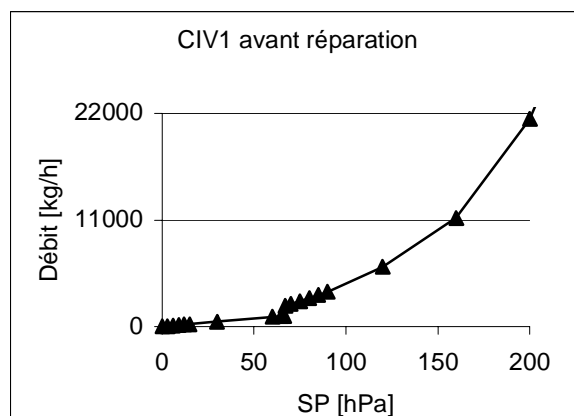
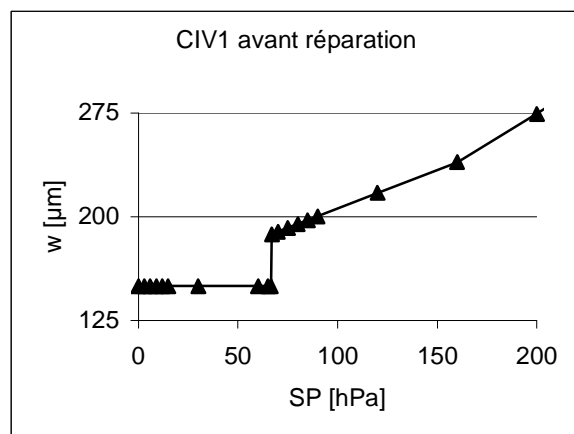


## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

200,0	279	9731,6	2,453
<b>Cattenom 2</b>			
SP [hPa]	w [ $\mu\text{m}$ ]	Q <sub>Total</sub> [kg/h]	TdF <sub>DAC</sub> [%/j]
3,0	150	18,5	0,310
6,0	150	37,0	0,311
9,0	150	55,5	0,311
12,0	150	74,2	0,312
15,0	150	92,8	0,312
30,0	150	187,0	0,314
60,0	150	379,5	0,319
65,0	150	412,1	0,320
70,0	150	444,9	0,320
71,0	150	451,4	0,321
72,0	150	458,0	0,321
73,5	150	467,9	0,321
<b>75,0</b>	<b>192</b>	<b>992,4</b>	<b>0,667</b>
80,0	195	1107,7	0,698
90,0	200	1362,2	0,763
120,0	217	2341,2	0,984
160,0	239	4261,4	1,343
200,0	268	7565,2	1,907



<b>Civaux 1 avant réparations</b>			
SP [hPa]	w [ $\mu\text{m}$ ]	Q <sub>Total</sub> [kg/h]	TdF <sub>DAC</sub> [%/j]
3,0	150	48,0	0,909
6,0	150	96,1	0,910
9,0	150	144,4	0,912
12,0	150	192,8	0,913
15,0	150	241,4	0,914
30,0	150	486,4	0,921
60,0	150	987,2	0,935
65,0	150	1072,1	0,937
66,5	150	1097,6	0,938
<b>67,0</b>	<b>187</b>	<b>2157,7</b>	<b>1,830</b>
70,0	189	2318,7	1,882
75,0	192	2602,3	1,972
80,0	195	2905,8	2,064
85,0	198	3230,0	2,159
90,0	200	3575,8	2,258
120,0	217	6154,9	2,914
160,0	239	11219,9	3,985
200,0	274	21452,2	6,095

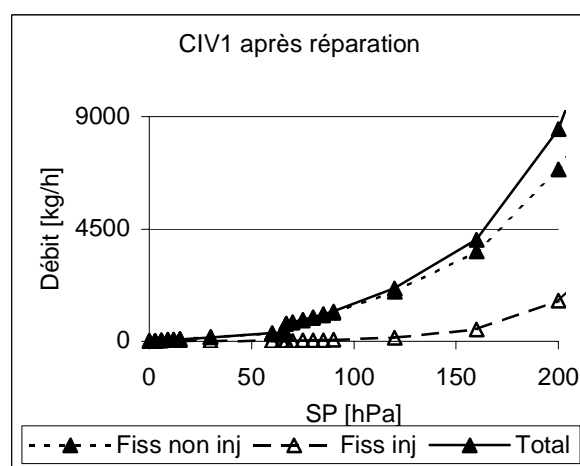
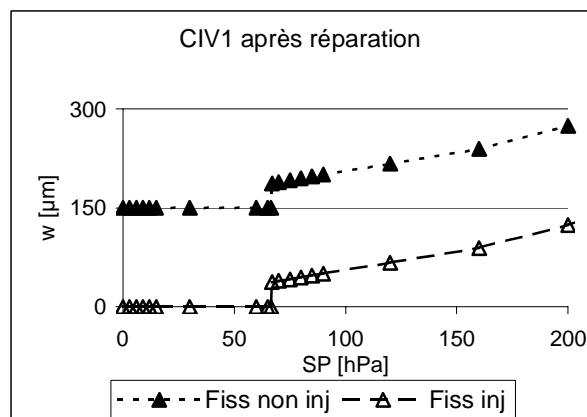


**Estimation de l'étanchéité des Parois Externes**

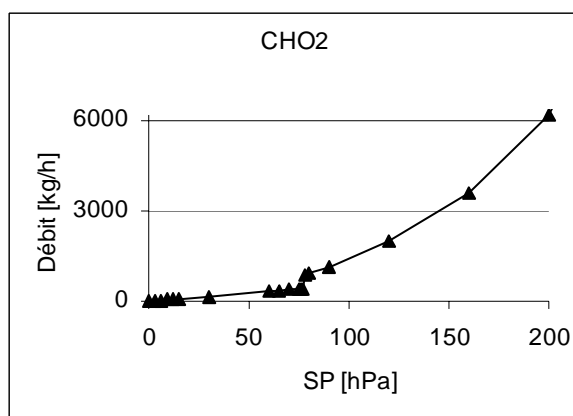
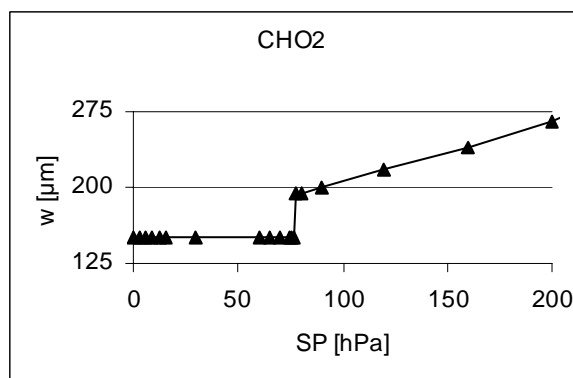
## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

**Civaux 1 après réparations**

SP [hPa]	$W_{\text{non inj}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$W_{\text{inj}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Q_{\text{Total}}$ [kg/h]	$\text{TdF}_{\text{DAC}}$ [%/j]
3,0	150	0	15,4	0,255
6,0	150	0	30,9	0,255
9,0	150	0	46,4	0,256
12,0	150	0	62,0	0,256
15,0	150	0	77,6	0,257
30,0	150	0	156,4	0,258
60,0	150	0	317,5	0,262
65,0	150	0	344,7	0,263
66,5	150	0	353,0	0,263
<b>67,0</b>	<b>187</b>	<b>37</b>	<b>706,7</b>	<b>0,523</b>
70,0	189	39	761,0	0,539
75,0	192	42	857,3	0,567
80,0	195	45	961,2	0,596
85,0	198	48	1073,2	0,626
90,0	200	50	1193,5	0,657
120,0	217	67	2122,0	0,877
147,0	239	89	4073,0	1,262
200,0	274	124	8495,5	2,105

**Chooz 2**

SP [hPa]	$w$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Q_{\text{Total}}$ [kg/h]	$\text{TdF}_{\text{DAC}}$ [%/j]
3,0	150	15,5	0,256
6,0	150	31,1	0,257
9,0	150	46,7	0,257
12,0	150	62,3	0,257
15,0	150	78,0	0,258
30,0	150	157,2	0,260
60,0	150	319,1	0,264
65,0	150	346,5	0,264
70,0	150	374,0	0,265
75,0	150	401,7	0,265
76,0	150	407,3	0,266
77,0	150	412,8	0,266
<b>77,9</b>	<b>194</b>	<b>893,1</b>	<b>0,568</b>
80,0	195	934,8	0,579
90,0	200	1150,0	0,633
120,0	217	1978,0	0,817
160,0	239	3603,1	1,116
200,0	265	6182,9	1,532



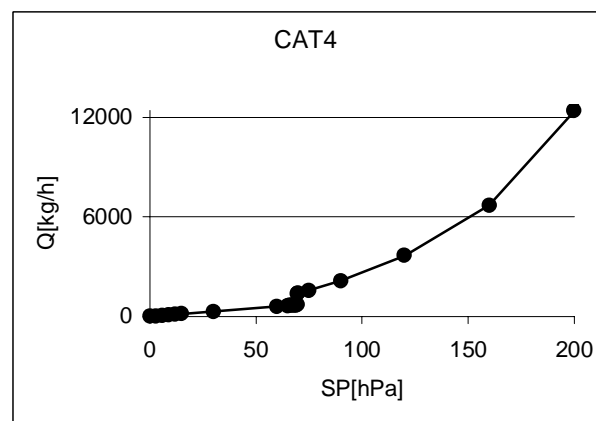
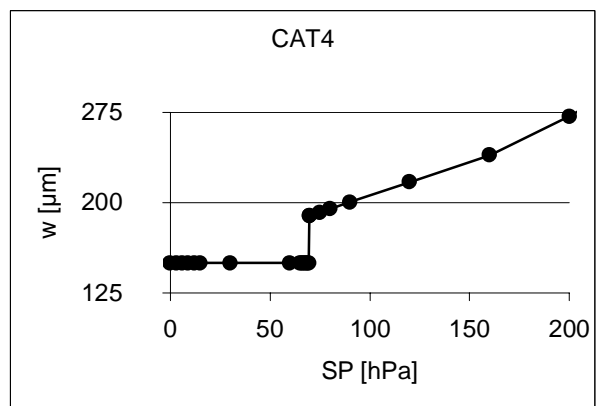
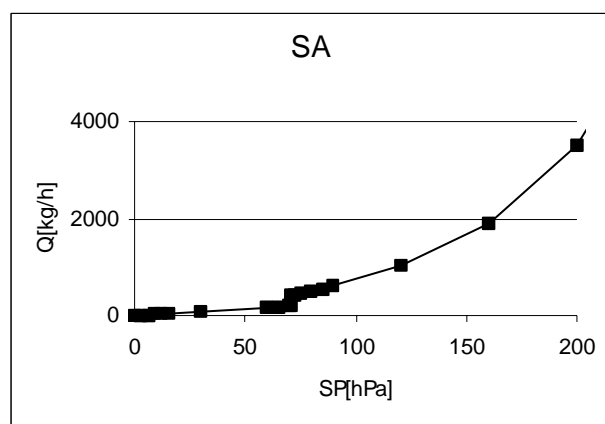
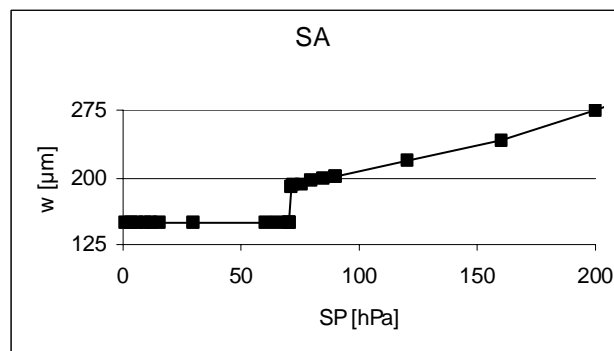
## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

Saint Alban 1 et 2

SP [hPa]	w [ $\mu\text{m}$ ]	Q <sub>Total</sub> [kg/h]	TdF <sub>DAC</sub> [%/j]
3,0	150	7,9	0,110
6,0	150	15,9	0,110
9,0	150	23,9	0,110
12,0	150	31,9	0,110
15,0	150	40,0	0,110
30,0	150	80,5	0,111
60,0	150	163,4	0,113
65,0	150	177,5	0,113
70,0	150	191,6	0,113
70,5	150	193,0	0,113
70,6	150	193,3	0,113
<b>70,8</b>	<b>191</b>	<b>394,7</b>	<b>0,231</b>
72,0	192	406,0	0,234
75,0	193	435,0	0,240
80,0	196	486,0	0,252
85,0	199	540,5	0,263
90,0	202	598,7	0,276
120,0	219	1034,1	0,357
160,0	242	1892,7	0,490
200,0	274	3490,9	0,723

Cattenom 4

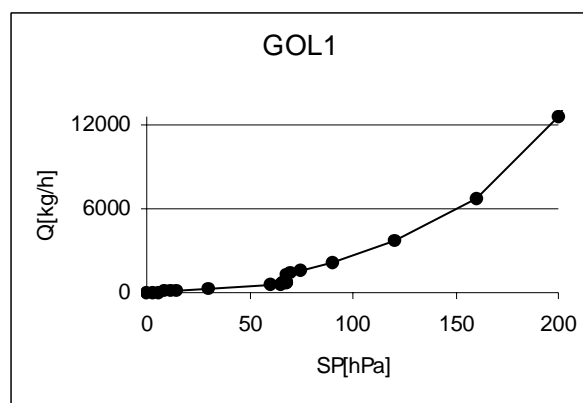
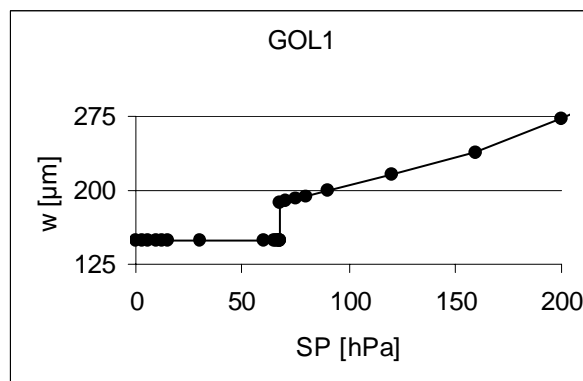
SP [hPa]	w [ $\mu\text{m}$ ]	Q <sub>Total</sub> [kg/h]	TdF <sub>DAC</sub> [%/j]
3,0	150	28,8	0,484
6,0	150	57,7	0,485
9,0	150	86,7	0,486
12,0	150	115,8	0,487
15,0	150	145,0	0,487
30,0	150	292,1	0,491
60,0	150	592,7	0,498
65,0	150	643,7	0,499
66,0	150	653,9	0,499
67,0	150	664,1	0,500
68,0	150	674,3	0,500
69,5	150	689,7	0,500
<b>69,7</b>	<b>189</b>	<b>1375,9</b>	<b>0,995</b>
70,0	189	1385,7	0,998
75,0	192	1554,9	1,045
90,0	200	2135,2	1,196
120,0	217	3671,6	1,543
160,0	239	6686,4	2,107
200,0	271	12386,0	3,122



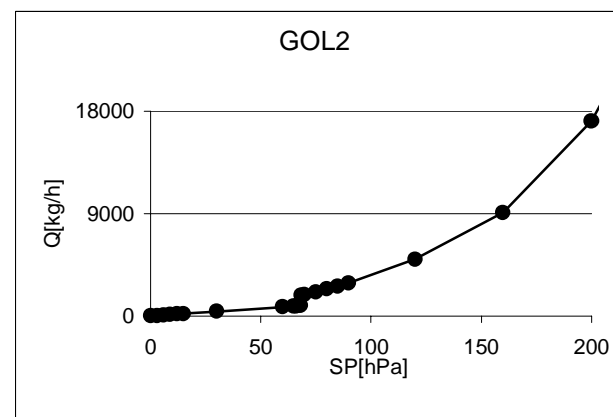
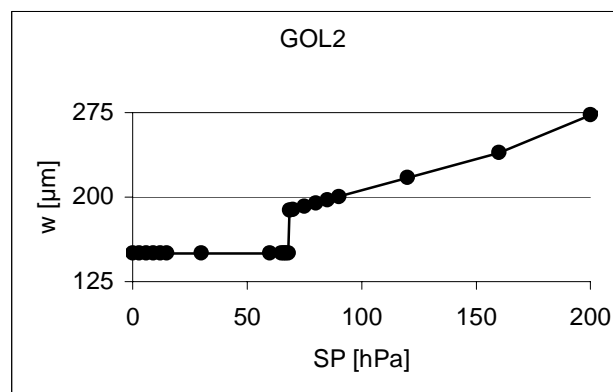
## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

**Golfech 1**

SP [hPa]	w [ $\mu\text{m}$ ]	Q <sub>Total</sub> [kg/h]	TdF <sub>DAC</sub> [%/j]
3,0	150	28,7	0,482
6,0	150	57,4	0,483
9,0	150	86,3	0,483
12,0	150	115,2	0,484
15,0	150	144,2	0,485
30,0	150	290,5	0,488
60,0	150	589,6	0,495
65,0	150	640,2	0,497
66,0	150	650,4	0,497
67,5	150	665,6	0,497
67,7	150	667,7	0,497
<b>67,8</b>	<b>188</b>	<b>1311,3</b>	<b>0,975</b>
70,0	189	1382,0	0,995
75,0	192	1550,9	1,043
90,0	195	2130,4	1,193
120,0	200	3665,1	1,540
160,0	217	6677,5	2,104
200,0	273	12621,4	3,182

**Golfech 2**

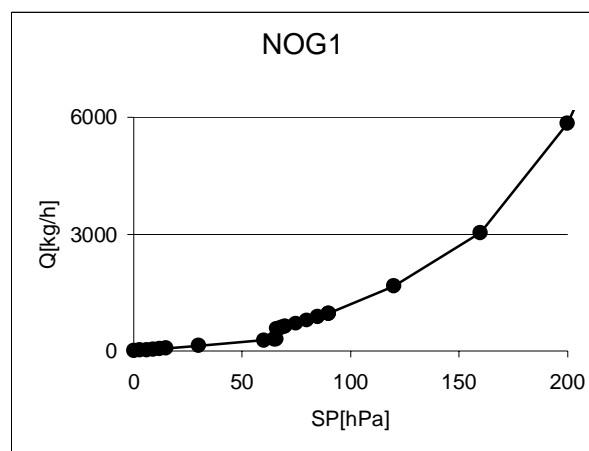
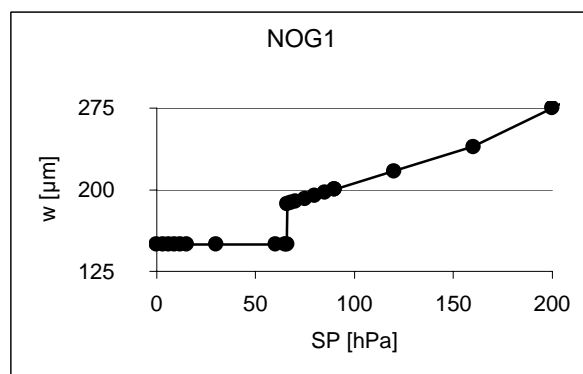
P [hPa]	w [m]	Q <sub>Total</sub> [kg/h]	TdF <sub>DAC</sub> [%/j]
3,0	150	39,0	0,656
6,0	150	78,2	0,657
9,0	150	117,5	0,658
12,0	150	156,9	0,659
15,0	150	196,4	0,660
30,0	150	395,6	0,665
60,0	150	802,8	0,675
65,0	150	871,8	0,676
67,0	150	899,5	0,677
68,0	150	913,3	0,677
<b>68,5</b>	<b>188</b>	<b>1817,2</b>	<b>1,337</b>
70,0	189	1883,2	1,356
75,0	192	2113,4	1,421
80,0	195	2359,7	1,487
85,0	198	2622,7	1,556
90,0	200	2903,3	1,626
120,0	217	4995,4	2,099
160,0	239	9102,5	2,868
200,0	273	17162,0	4,326



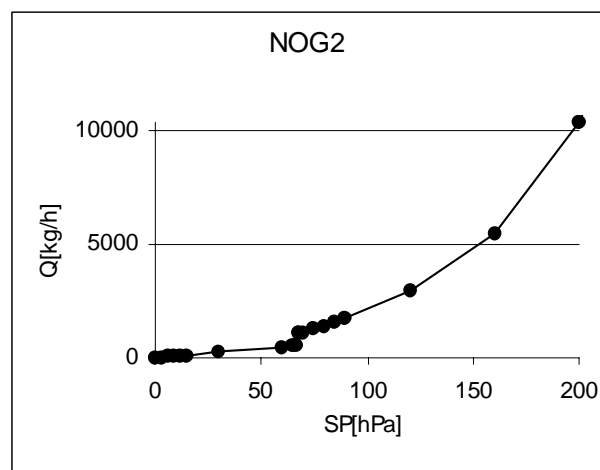
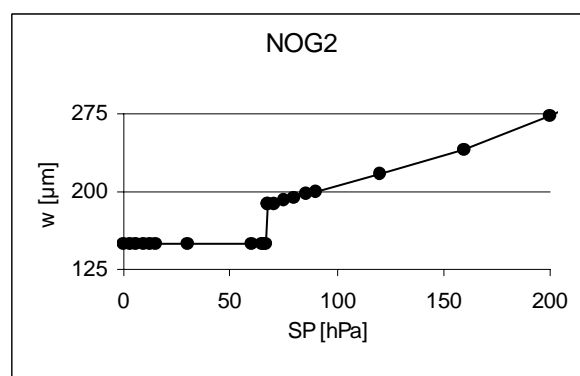
## Estimation de l'étanchéité des Parois Externes

**Nogent 1**

SP [hPa]	w [ $\mu\text{m}$ ]	Q <sub>Total</sub> [kg/h]	TdF <sub>DAC</sub> [%/j]
3,0	150	13,1	0,219
6,0	150	26,1	0,220
9,0	150	39,3	0,220
12,0	150	52,5	0,220
15,0	150	65,7	0,221
30,0	150	132,3	0,222
60,0	150	268,4	0,226
65,0	150	291,5	0,226
66,0	187	571,0	0,436
68,0	188	599,5	0,444
70,0	189	628,7	0,453
75,0	192	705,5	0,474
80,0	195	787,7	0,496
85,0	198	875,5	0,519
90,0	200	969,0	0,543
120,0	217	1666,9	0,700
160,0	239	3036,5	0,957
200,0	275	5852,5	1,475

**Nogent 2**

SP [hPa]	w [m]	Q <sub>Total</sub> [kg/h]	TdF <sub>DAC</sub> [%/j]
3,0	150	23,4	0,394
6,0	150	46,9	0,394
9,0	150	70,5	0,395
12,0	150	94,1	0,395
15,0	150	117,8	0,396
30,0	150	237,4	0,399
60,0	150	481,7	0,405
65,0	150	523,1	0,406
66,0	150	531,4	0,406
67,0	150	539,7	0,406
<b>67,5</b>	<b>188</b>	<b>1064,4</b>	<b>0,795</b>
68,0	188	1077,3	0,799
70,0	189	1129,9	0,814
75,0	192	1268,0	0,852
80,0	195	1415,8	0,892
85,0	198	1573,6	0,933
90,0	200	1742,0	0,976
120,0	217	2997,3	1,259
160,0	239	5461,5	1,721
200,0	274	10354,2	2,610





**Estimation de l'étanchéité des Parois Externes****Penly 1 et 2**

SP [hPa]	w [ $\mu\text{m}$ ]	Q <sub>Total</sub> [kg/h]	TdF <sub>DAC</sub> [%/j]
3,0	150	15,7	0,264
6,0	150	31,5	0,264
9,0	150	47,3	0,265
12,0	150	63,1	0,265
15,0	150	79,0	0,266
30,0	150	159,2	0,268
60,0	150	323,0	0,271
65,0	150	350,8	0,272
70,0	150	378,7	0,273
70,5	150	381,5	0,273
70,8	150	383,1	0,273
71,7	150	388,2	0,273
<b>72,0</b>	<b>190</b>	<b>791,7</b>	<b>0,554</b>
75,0	192	847,8	0,570
80,0	195	946,4	0,596
85,0	198	1051,8	0,624
90,0	200	1164,2	0,652
120,0	217	2002,1	0,841
160,0	239	3646,3	1,149
200,0	269	6597,0	1,663

