

LA CUVE
DU REACTEUR

1	INTRODUCTION - PRESENTATION DU DOSSIER	1
1.1	OBJET DE LA NOTE	1
1.2	POSITION D'EDF POUR LES TRANCHES CPO	2
2	DESCRIPTION DES MATERIELS	3
3	RETOUR D'EXPERIENCE INTERNATIONAL	6
3.1	CONDITIONS DE FABRICATION	6
3.2	ESSAIS ET EPREUVES D'ETANCHEITE	7
4	BILAN DES CONTROLES NON DESTRUCTIFS	9
4.1	PERFORMANCES DES METHODES DE CONTROLE	9
4.2	CONTROLES EFFECTUES SUR BUGEY 3	12
4.3	CONTROLES EFFECTUES SUR BUGEY 4	13
4.4	CONTROLES EFFECTUES SUR FESSENHEIM 1	14
4.5	SYNTHESE DES CONTROLES DES 3 COUVERCLES CPO (FES1, BUG3,BUG4)	15
5	BILAN DE L'ANALYSE DES DOSSIERS DE FABRICATION	16
5.1	INTRODUCTION	16
5.2	SYNTHESE	16
6	CONNAISSANCE ET ANALYSE DU PHENOMENE	18
6.1	IDENTIFICATION DU MODE DE DEGRADATION	18
6.1.1	REPLIQUE SUR LA SOUDURE DE LA T54 DE BUGEY 3	18
6.1.2	PRELEVEMENTS SUR L'ADAPTATEUR 65 DE BUGEY 4	18
6.1.3	EXPERTISE DE L'ADAPTATEUR 54 DE BUGEY 3	18
6.2	ETUDES THEORIQUES-CALCULS	20
6.2.1	PRINCIPAUX CHARGEMENTS SUR L'ADAPTATEUR	20
6.2.2	ANALYSE DU FRETAGE	23
6.2.3	ANALYSE DES DEFORMATIONS (OVALISATION, FLEXION)	24
6.2.4	IMPACT DU CHAMBRAGE SUR LE CHAMP DES CONTRAINTES	24
6.2.5	ANALYSE DE NOCIVITE DE DEFAUTS	25
6.2.5.1	INTRODUCTION	25
6.2.5.2	DEFAUTS LONGITUDINAUX	25
6.2.5.3	DEFAUTS CIRCONFERENCELS	26
6.3	ETUDES EXPERIMENTALES-MAQUETTES	29
6.3.1	OBJECTIFS	29
6.3.2	DEFINITION DU PROGRAMME	29
6.3.2.1	CHOIX DES CONFIGURATIONS	29
6.3.2.2	PROCEDURE D'ESSAIS	30
6.3.3	PREMIERS RESULTATS- POINT D'AVANCEMENT DU PROGRAMME	30
6.3.3.1	MAQUETTE INOX	30
6.3.3.2	MAQUETTES INCONEL	31
6.4	SYNTHESE DES CONNAISSANCES ACQUISES INFLUENCE DES CONTRAINTES RESIDUELLES	32
7	CONSEQUENCES SUR LA SURETE DE L'EXPLOITATION	35
7.1	SCENARIO A ETUDIER	35
7.2	ANALYSE DE LA CORROSION POTENTIELLE DU COUVERCLE PAR LE PRIMAIRE	35
7.3	CONSEQUENCES D'UNE HYPOTHETIQUE RUPTURE CIRCONFERENCELLE	36
7.4	SYNTHESE	38
8	DISPOSITIONS PARTICULIERES A COURT ET MOYEN TERMES POUR LE PALIER CPO	39
8.1	DETECTION DE FUITE EN FONCTIONNEMENT	39
8.1.1	GENERALITES	39
8.1.2	DESCRIPTION DU DISPOSITIF (synoptique 8.1)	39
8.1.3	PERFORMANCES ATTENDUES	40
8.2	DISPOSITIFS ANTI-EJECTION	41
8.2.1	GENERALITES	41

8.2.2	DESCRIPTION DU DISPOSITIF	
	(cf plans 8.2.2.1 et 8.2.2.2)	41
8.2.3	PERFORMANCES ATTENDUES	42
8.3	CONTROLES GENERIQUES EN ARRET POUR RECHARGEMENT	42
8.4	REPARATION PROVISoire D'UNE TRAVERSEE	44
9	SYNTHESE POUR LE PALIER CPO	45

1 INTRODUCTION - PRESENTATION DU DOSSIER

1.1 OBJET DE LA NOTE

L'inétanchéité de la traversée T54 du couvercle de la cuve de BUGEY 3 a été détectée le 23/09/91 lors de l'épreuve hydraulique décennale réglementaire du Circuit Primaire Principal (CPP).

Electricité de France a décidé de réaliser des contrôles sur les tranches CP0 en arrêt pour rechargement (BUGEY 4 et FESSENHEIM 1); ceux-ci ont montré la présence de fissurations longitudinales sur certains adaptateurs.

Le but de la présente note est de faire une synthèse des actions entreprises ou prévues pour comprendre et expliquer ce phénomène.

Ces actions concernent en priorité les tranches du palier CP0, et en particulier les tranches de FESSENHEIM 1 et 2.

1.2 POSITION D'EDF POUR LES TRANCHES CP0

L'ensemble des éléments disponibles à ce jour :

- contrôles non destructifs et expertises,
- calculs mécaniques,
- mesures de contraintes résiduelles,

montre que le phénomène, à l'origine des dégradations constatées sur les adaptateurs du palier CP0, est un phénomène générique de corrosion sous contrainte de l'alliage 600 en milieu primaire.

Bien que les dégradations constatées à ce jour ne comportent pas de risque pour la sûreté, la possibilité d'une fuite d'un adaptateur ne peut être exclue, ce qui serait de nature à hypothéquer significativement la disponibilité.

Ce risque industriel a conduit EDF à la décision de

**REPLACER TOUS LES COUVERCLES CP0 DANS UN DELAI
DE 2 ANS POUR LE PREMIER ET 3 ANS POUR LE DERNIER.**

Dans cette période transitoire, les dispositions complémentaires suivantes sont mises en oeuvre :

- installation de dispositifs anti-éjection sur les couvercles des six tranches CP0; en ce qui concerne FESSENHEIM, le programme d'installation est le suivant :

- Tranche 1 : lors d'un arrêt intermédiaire à l'automne 92,
- Tranche 2 : avant redémarrage (arrêt en cours).

- installation de systèmes de détection de fuite sur les couvercles des six tranches CP0; en ce qui concerne FESSENHEIM, le programme d'installation est le suivant :

- Tranche 1 : réalisé au précédent arrêt pour rechargement,
- Tranche 2 : avant redémarrage (arrêt en cours).

- contrôle complet à l'aide du robot des couvercles des tranches CP0 ; en ce qui concerne FESSENHEIM, le programme est le suivant:

- Tranche 1 : au prochain arrêt pour rechargement, un contrôle partiel ayant été réalisé au précédent arrêt,
- Tranche 2 : avant redémarrage (arrêt en cours), sauf en cas d'indisponibilité du robot de contrôle (dans ce cas, un programme de repli serait mis en oeuvre portant sur les zones les plus potentiellement affectées).

- pas de réparation de traversée sauf si elle est fuitarde ou avec une fissure traversante au dessus de la soudure.

2 DESCRIPTION DES MATERIELS

Les adaptateurs ont pour fonction de permettre le passage, à travers le couvercle de la cuve :

- . des tiges de commande des grappes,
- . des colonnes de thermocouples.

Pour ces deux applications, ils sont surmontés respectivement des mécanismes de commande des grappes et des assemblages d'étanchéité des colonnes de thermocouples. Ces pièces sont fixées à l'aide d'un filetage et d'un joint d'étanchéité soudé du type Canopy.

Le corps de l'adaptateur est réalisé en alliage Inconel 600 (NC 15 Fe) et sa tête en acier inoxydable austénitique (Z2 CN 18.10). Ces deux parties sont solidarisiées par une soudure bimétallique.

La liaison soudée entre l'adaptateur et le couvercle est réalisée par l'intérieur avec métal d'apport Inconel 182 sur beurrage de même nuance côté acier ferritique.

Les diamètres intérieur et extérieur du corps d'adaptateur sont respectivement de 70 et 101,6 mm.

La figure 2.1. représente un adaptateur équipé d'un mécanisme pour grappe normale.

Le tableau 2.1. indique la température de service des adaptateurs pour les différents paliers.

2.1 Affectation des adaptateurs (tableau 2.2.)

Le couvercle comprend :

48 adaptateurs pour mécanismes à grappes normales
(Figure 2.2.)

5 adaptateurs pour mécanismes à grappes partielles
(positions : 1, 18, 19, 20 et 21) (Figure 2.2.)

4 adaptateurs pour colonnes de thermocouples (positions : 47, 49, 51 et 53) (Figure 2.3.)

8 adaptateurs de réserve obturés (positions : 14, 15, 16, 17, 46, 48, 50 et 52) (Figure 2.3.).

Lors de la dépose du couvercle :

- . Les tiges de commande des grappes normales restent dans les guides de grappes des internes supérieurs,
- . les tiges de commande des grappes partielles restent dans les mécanismes (système vis-écrou non débrayable),
- . les colonnes de thermocouples restent dans les internes supérieurs dont elles sont solidaires.

Il faut noter que les grappes partielles ne sont pas utilisées et que leurs tiges de commande constituent une gêne pour le contrôle robotisé des adaptateurs. Leurs mécanismes seront donc progressivement démontés et leurs adaptateurs équipés d'obturateurs.

2.2 Soudure bimétallique adaptateur-tête

Elle est réalisée en deux phases :

- . passe de fond par le procédé TIG manuel avec anneau fusible en alliage NiCrFe comme produit d'apport,
- . remplissage à l'électrode Inconel enrobée.

2.3 Frettage

L'adaptateur est emmanché à l'azote liquide dans la calotte du couvercle de manière à obtenir une interférence comprise entre 0,08 et 0,09 mm au diamètre.

Le rôle du frettage est d'obtenir une bonne précision d'implantation de la partie supérieure des adaptateurs sur le couvercle en limitant les déformations de soudage. Le frettage n'a pas de fonction de résistance.

En service, l'évolution du frettage dépend de deux paramètres :

- . La pression qui diminue le frettage du fait que la calotte se déforme plus que l'adaptateur (ce dernier est surdimensionné vis à vis de la résistance à la pression).
- . La température qui augmente le frettage, en raison du coefficient de dilatation de l'inconel 600 qui est plus élevé que celui de l'acier ferritique du couvercle.

2.4 Soudure de liaison adaptateur-calotte (Figure 2.4.)

Cette soudure de résistance, non détensionnée, est à pénétration partielle. La profondeur de pénétration dans la calotte est de 20 mm et la soudure d'angle a une épaisseur de cordon 7mm.

En préalable à l'opération de soudage, un beurrage du chanfrein dans le couvercle est réalisé. Il subit le traitement thermique de détensionnement final du couvercle avant la mise en place des adaptateurs.

2.5 Filetage

Tous les adaptateurs comportent à leur base, un filetage extérieur de diamètre 95,25 mm au pas de 3,2 mm.

2.6 Dégagement à la base interne des adaptateurs

Pour Fessenheim 1 et 2 et Bugey 2 la base interne des adaptateurs comporte un simple chanfrein.

Lors de la fabrication de ces premiers couvercles on a constaté que, dans certains cas, le soudage entraînait une déformation du pied d'adaptateur incompatible avec le passage du gabarit de contrôle de la géométrie interne. Il a donc été décidé, pour les couvercles suivants, d'usiner un dégagement à la base des adaptateurs périphériques.

Pour Bugey 3, 4 et 5 les adaptateurs 1 à 17 sont identiques aux précédents. Les adaptateurs 18 à 65 comportent un chambrage ϕ 74 mm dont la hauteur dépend du rayon du cercle d'implantation.

Le tableau 2.3. indique les caractéristiques du dégagement en fonction de la position des adaptateurs.

2.7 Manchettes thermiques (Figure 2.1.)

La manchette thermique a deux fonctions principales :

- . protéger l'adaptateur contre les descentes d'eau froide, provoquées par les remontées de tige de commande dans le mécanisme,

- . guider la tige de commande depuis la base de l'adaptateur jusqu'à l'entrée dans le mécanisme lors de la mise en place du couvercle.

Chaque adaptateur pour mécanisme à grappe normale comporte une manchette thermique comprenant :

- . une bride supérieure limitant la course axiale de la manchette,

- . un corps tubulaire,

- . un cône inférieur vissé et arrêté par soudure, servant au recentrage de la tige de commande.

Le centrage de la manchette dans l'adaptateur est assuré :

- . sur Fessenheim par deux niveaux de trois plots disposés à 120° ,
- . sur Bugey par deux niveaux d'épaulements.

Chaque adaptateur pour mécanisme à grappes partielles comporte une manchette thermique dépourvue de cône à sa partie inférieure.

TABLEAU 2.1.

TEMPERATURES DE FONCTIONNEMENT A PLEINE PUISSANCE

	FSH	BGY	CPY	PQY DPY	
				AVANT ABAISS ^T	APRES ABAISS ^T
Débit par * boucle m ³ /h	20100	21075	22000	21970	22890
Température entrée cuve	284,2	286	286,7	292,8	289
Température sortie cuve	321,6	323,2	322,5	328,7	324
Température sous dôme	313,4	315	289,1	313,7	309,4

* Le débit considéré est le débit garanti sauf pour le cas du 1300 après abaissement de température pour lequel c'est le débit le plus probable.

3 RETOUR D'EXPERIENCE INTERNATIONAL

3.1 CONDITIONS DE FABRICATION

La comparaison concerne les réacteurs de conception WESTINGHOUSE. Elle porte sur les couvercles réalisés par FRAMATOME (FRA), COMBUSTION ENGINEERING (C.E.), BABCOCK WILCOX (B.W.) et MITSUBISHI (MHI). Elle a été établie à partir des renseignements recueillis lors des missions aux Etats Unis (du 22 au 25.10.91) et au Japon (31.10 et 01.11.91).

3.1.1 Matériau

L'usage de l'Inconel 600 (NC 15 Fe) est généralisé. FRAMATOME est le seul à approvisionner des barres selon la spécification ASME SB 166. Les autres constructeurs approvisionnent des tubes selon la spécification ASME SB 167. Par ailleurs, il est vraisemblable que des différences existent entre les aciéristes sur les points suivants :

- opérations thermo-mécaniques de forgeage
- traitement thermique final
- caractéristiques mécaniques obtenues

3.1.2 Dégagement en pied d'adaptateur

La pratique de l'usinage d'un dégagement à l'intérieur de la partie basse de l'adaptateur est spécifique à FRAMATOME, les autres constructeurs ne l'utilisent pas (voir paragraphe 3.1.4.).

3.1.3 Frettage

La valeur de l'interférence du diamètre et la géométrie de l'alésage, varient selon les constructeurs (non spécifié par W) :

- FRA : 0,08 - 0 + 0,01 mm (toute la hauteur)
- CE : 0 à 0,13 mm (toute la hauteur)
- B.W.: 0,013 à 0,038 mm (toute la hauteur pour les réacteurs W, de révolution pour les réacteurs B.W.)
- MHI : 0,03 à 0,05 mm (de révolution)

3.1.4 Soudure adaptateur-calotte

- Géométrie

Les dimensions minimales à respecter pour les soudures à pénétration partielle sont imposées par les codes (d'abord l'ASME puis ensuite le RCC.M qui reprend pratiquement les mêmes valeurs). A une époque donnée, il ne semble pas qu'il y ait des différences importantes de forme de chanfrein d'un constructeur à l'autre. Des évolutions sont cependant intervenues avec le perfectionnement des moyens d'usinage.

- Séquence de soudage

Il est certain que des différences existent dans les pratiques des constructeurs. MHI s'efforce de limiter les déformations de soudage en procédant à un bridage énergique. C.E. et B.W. nous ont dit, sans être très affirmatifs (ils n'ont pas construit de cuve depuis longtemps) qu'ils utilisaient une séquence de soudage limitant les déformations. Il semble bien, en tout cas, que personne ne contrôle la géométrie (ovalisation ou flexion) après soudage. La pratique du passage du calibre est généralisée.

3.2 ESSAIS ET EPREUVES D'ETANCHEITE

3.2.1 Pratique ASME Section XI (Etats-Unis)

Il s'agit plus d'une épreuve d'étanchéité que d'une épreuve de résistance.

Taux d'épreuve :

L'usage est de faire la réépreuve coeur chargé, ce qui est d'ailleurs explicitement évoqué en IWB 5222 b). Il en résulte des exigences de limitation de la pression d'épreuve à des valeurs moins élevées qu'en France, et fonction de la température, comme suit :

100° F ou moins	(38° C)	: 1,10 P0,
200° F	(93° C)	: 1,08 P0,
300° F	(149° C)	: 1,06 P0,
400° F	(204° C)	: 1,04 P0,
500° F ou plus	(260° C)	: 1,02 P0,

Où P0 est la pression nominale de service à 100 % de puissance soit 155 bar. La pression d'épreuve ne peut donc dépasser $155 \times 1,10 = 170,5$ bar.

Périodicité :

Le paragraphe IWB 2400 (ASME XI) laisse le choix entre deux périodicités : le programme A avec réépreuve à 3 ans, 10 ans, 23 ans, 40 ans et le programme B avec espacement régulier tous les dix ans.

3.2.2 Pratique française (Arrêté du 26-02-74)

Il s'agit d'une épreuve à la fois de résistance et d'étanchéité.

Taux d'épreuve :

L'épreuve est réalisée coeur déchargé. La pression d'épreuve est égale à 1,20 fois la pression de calcul, soit : $171,3 \text{ bar} \times 1,20 = 205,5$ bar relatifs.

TABLEAU 2.2.
IMPLANTATION DES ADAPTATEURS

N° DU CERCLE	CPO - CP1 - CP2				1300			
	Nbre	n° adapt.	R (1)	α (2)	Nbre	n° adapt.	R (1)	α (2)
0	1	1	0	0	1	1	0	0
1	4	2 à 5	304,1	8°38'	4	2 à 5	430,1	11°04'
2	4	6 à 9	430,1	12°15'	4	6 à 9	608,2	15°45'
3	4	10 à 13	608,2	17°28'	4	10 à 13	680,0	17°40'
4	4	14 à 17	680	19°36'	4	14 à 17	860,1	22°35'
5	4	18 à 21	860	25°06'	4	18 à 21	912,3	24°02'
6	4	22 à 25	912,3	26°45'	8	22 à 29	961,7	25°26'
7	8	26 à 33	961,7	28°19'	8	30 à 37	1096,5	29°19'
8	8	34 à 41	1096,5	32°45'	4	38 à 41	1216,4	32°54'
9	4	42 à 45	1216,4	36°53'	8	42 à 49	1253,9	34°03'
10	8	46 à 53	1253,9	38°13'	4	50 à 53	1290,2	35°11'
11	4	54 à 57	1290,2	39°32'	8	54 à 61	1360,0	37°24'
14	-		-	-	4	75 à 78	1520,5	42°46'
12	8	58 à 65	1360	42°08'	8	62 à 69	1550,6	43°50'
13	-		-	-	4	70 à 73 (3)	1637,7	47°0'

(1) : Rayon d'implantation de l'adaptateur (mm)

(2) : Angle entre l'axe de l'adaptateur et la normale au plan tangent à la calotte.

(3) : Sur Paluel 1 et 3 le cercle n° 13 comporte un adaptateur supplémentaire n° 74.

TABLEAU 2.3.

DEGAGEMENT A LA BASE DES ADAPTATEURS

PALIER	TYPE	CERCLES N°	HAUTEUR E (mm) (1)	DIAMETRE D (mm) (1)
<u>CPO</u>	Cylindre	0 à 4	0	
BUGEY 3		5 à 7	30	74
BUGEY 4		8 et 9	70	74
BUGEY 5		10 à 12	85	74
<u>CP1</u>	Cylindre	0 à 4	0	
TRICASTIN 1		5 à 7	25	74
		8 et 9	70	74
		10 et 11	85	74
		12	90	74
<u>CP1 - CP2</u>	Conique	0 à 4	0	
AUTRES QUE TRICASTIN 1		5 et 6	118	82,5
		7 et 8	124	83
		9 et 10	134	84
	11 et 12	142	85	
<u>1300</u>	Conique	0 à 5	0	
		6 et 7	124	83
		8 à 11	134	84
		12 à 14	142	85

(1) Voir Figure 2.4.

Périodicité :

La périodicité des réépreuves est de 10 ans. De plus, une première réépreuve doit être réalisée au plus tard trente mois après la mise en service.

3.2.3 Pratique hors France et Etats-Unis

La pratique française n'est pas utilisée à l'étranger. La pratique ASME XI est largement utilisée sauf en Allemagne où, à l'exception d'Obrigheim, les adaptateurs sont de conception différente (adaptateur en acier ferritique revêtu intérieurement d'acier inoxydable, assemblé par vissage et soudure d'étanchéité).

4 BILAN DES CONTROLES NON DESTRUCTIFS

4.1 PERFORMANCES DES METHODES DE CONTROLE

Le principe des contrôles effectués est décrit ci-dessous.

4.1.1 CONTROLE DE LA SURFACE INTERNE DE L'ADAPTATEUR PAR SONDE TOURNANTE A COURANTS DE FOUCAULT

L'objet de ce contrôle est de détecter les fissures débouchantes en paroi interne de l'adaptateur.

La zone couverte par cet examen s'étend de 30 à 300 mm d'altitude comptés à partir de l'extrémité basse de l'adaptateur. Elle concerne la partie libre inférieure, la zone au droit de la soudure et du frettage jusqu'à la face supérieure du couvercle.

Les conditions de réglage et le seuil de notation retenus permettent de garantir la détection de fissures longitudinales et circonférentielles débouchantes en paroi interne de 2 mm de profondeur.

Les performances devraient être de 0,5 mm de profondeur. Cette valeur ne sera démontrée qu'après expertise d'adaptateurs prélevés ou essais sur maquettes comportant des fissures.

4.1.2 CONTROLE DU FOND DE CHAMBRAGE DE L'ADAPTATEUR PAR SONDE SPECIALE COURANTS DE FOUCAULT

L'objet de ce contrôle est de déceler les fissures circonférentielles amorcées dans l'angle rentrant du chambrage interne.

Ce contrôle est exécuté seulement si des fissures longitudinales au droit du lamage sont détectées par la sonde tournante.

Les conditions de réglage et le seuil de notation retenus permettent de garantir la détection des fissures circonférentielles de 1 mm de profondeur ne se développant pas sur toute la circonférence.

Les performances devraient être de l'ordre de 0,5 mm de profondeur. Ces performances s'appuient sur l'expérience du contrôle des gorges des pistons des moteurs diesels des REP avec une sonde similaire.

4.1.3 CONTROLE DE L'ADAPTATEUR PAR ULTRASONS

4.1.3.1 Recherche de fissures circonférentielles amorcées en paroi externe

Cette recherche est effectuée avec un traducteur à ondes transversales inclinées à 45°, orienté dans le sens descendant.

La zone couverte par cet examen s'étend de 35 à 235 mm d'altitude comptés à partir de l'extrémité basse de l'adaptateur.

Les conditions de réglage délimitant la zone contrôlée jusqu'à mi-épaisseur de la paroi du tube et le seuil de notation garantissent la détection de fissure pénétrant dans l'épaisseur de l'adaptateur d'au moins 2 mm.

Ces performances sont assurées dans la zone du point triple (jonction métal fondu Inconel/paroi de l'adaptateur/acier du couvercle) et dans la partie libre de l'adaptateur.

4.1.3.2 Investigations complémentaires sur les fissures longitudinales amorcées en paroi interne

Cette recherche est effectuée seulement si des fissures longitudinales sont détectées par courants de Foucault et si leur altitude correspond à celle de la zone fondue de la soudure.

L'objet dans ce cas est de vérifier si la fissure partant de la peau interne débouche en peau externe.

Cette recherche est effectuée avec un traducteur à ondes transversales à 45° orienté dans le sens horaire ou anti-horaire.

4.1.4 CONTROLE TELEVISUEL DE L'INTERIEUR DE L'ADAPTATEUR

4.1.4.1 Inspection générale

Cet examen précède les autres techniques (CF, US) et est utilisé comme contrôle systématique en paroi interne de tous les adaptateurs libres de manchettes, sur une hauteur d'environ 450 mm (maxi 600 mm) depuis la partie inférieure. Le parcours type de la tête de visée est une rotation complète suivie d'une translation au pas de 15 mm.

Caractéristiques techniques

- Accès sous couvercle, déplacement par char DRALLE
- Caméra "bioptrique" dotée d'une visée axiale de positionnement et d'une visée radiale d'inspection (par miroir tournant)
- Capteur : CCD couleur 1/2" (579 x 583 pixels)
Le champ couvert en inspection est de 20 mm (sens longitudinal de l'adaptateur) x 15 mm (sens circonférentiel de l'adaptateur).
- Résolution : Détection d'une rayure étalon de 0,1 mm

4.1.4.2 Expertise

Le matériel a été développé pour aider à l'analyse d'indications de surface relevées lors des examens par courants de Foucault ou ultrasons en tout point de l'adaptateur.

Caractéristiques techniques

- Accès sur couvercle, déplacement par porteur en rotation translation
- Tête de visée radiale "MORBAC 90" (développement EDF/SPT/GDL/SCM) équipée d'un prisme à double renversement (non inversion droite-gauche)
- Capteur : CCD couleur 1/2" (579 x 583 pixels)
- Champ couvert : 16 mm x 13 mm
- Résolution : 0,05 mm

NB : Pour les adaptateurs comportant un chambrage, une tête spéciale "MORBAC 150" à visée rétrograde a été développée, qui permet l'observation de l'angle rentrant du lamage et des surfaces connexes.

4.1.5 MESURE DES DEFORMATIONS DE L'ADAPTATEUR

4.1.5.1 Prise d'empreintes

Des empreintes avec une pâte élastomère sont réalisées par injection à l'intérieur de l'adaptateur.

La profilométrie de ces empreintes est réalisée à l'aide d'une double nappe laser effectuant les mesures sans contact tous les 5° dans un plan horizontal. Ces mesures sont répétées sur des sections distantes de 1 ou 5 mm suivant la finesse de mesure désirée. Les mesures sont traitées par le logiciel VIDOC fournissant les résultats sous les formes suivantes :

- le profil axial du diamètre moyen de l'ovalisation calculée comme la différence entre le diamètre maximal et le diamètre minimal de chaque section,
- des coupes radiales où un effet d'échelle permet une appréciation visuelle des variations polaires de rayon.

La précision de la méthode est de l'ordre de 0,01 mm.

Toutefois cette méthode ne permet pas de mesurer la flexion de l'extrémité inférieure libre de l'adaptateur.

4.1.5.2 Relevés par ultrasons

La mesure est effectuée en palpeur droit. La restitution diffère selon les intervenants.

Pour INTERCONTROLE, les sorties graphiques de profilométrie sont réalisées :

- soit en section droite à une altitude donnée
- soit selon une génératrice à une position angulaire

La mesure d'ovalisation sur le rayon est donnée par fourchette, car le logiciel ne permet pas de dissocier l'incidence du désaxage de l'outil sur la mesure d'ovalisation.

Pour FRAMATOME, la mesure de l'ovalisation est réalisée sur l'enregistrement de profilométrie radiale corrigée de l'effet de l'excentrement. Elle correspond à la différence maximale de diamètre mesurée sur deux axes orthogonaux passant par le centre de rotation de la sonde. La précision de mesure est inférieure à + ou - 0.1 mm.

4.1.6 CONTROLE DE LA SURFACE INTERNE DU TUBE D'EVENT PAR SONDE TOURNANTE A COURANTS DE FOUCAULT

L'objectif de ce contrôle est de rechercher des fissures amorcées côté primaire.

Zones inspectées :

- Le tube a été examiné sur une longueur de + 5 mm à + 250 mm à partir de la face interne du couvercle
- La pénétration des courants de Foucault permet d'inspecter la peau interne du tube sur une épaisseur d'environ deux millimètres

Sensibilité du contrôle :

Les conditions de réglage et le seuil de notation retenus permettent de garantir la détection de fissures longitudinales et circonférentielles initiées en paroi interne de 0,3 mm de profondeur.

4.2 CONTROLES EFFECTUES SUR BUGEY 3

1) Traversée de l'évent

Le contrôle par courants de Foucault de la peau interne a été effectué et n'a montré la présence d'aucun défaut.

2) Traversées des mécanismes de commande

-Les 65 traversées sont contrôlées :

- .Examens télévisuels internes de chaque adaptateur
- .Examens par courants de Foucault de la peau interne de chaque adaptateur
- .Examens par ultrasons internes de la peau externe de chaque adaptateur
- .Examens complémentaires par courants de Foucault de l'angle du lamage de 7 adaptateurs
- .Examen par ressuage de la soudure et de la paroi interne de l'adaptateur 54
- .Examen par réplique d'une indication de ressuage sur la soudure de l'adaptateur 54
- .Examen télévisuel global de l'intérieur du couvercle
- .Examen complémentaire télé-endoscopique de quelques adaptateurs pour expertises des indications

- .Examen par ressuage de la paroi interne de l'extrémité inférieure de l'adaptateur 17
- .Prise d'empreinte sur 2 adaptateurs (54, 57)

-Résultats

- .L'examen télévisuel global a mis en évidence une tache de bore sur la traversée 54. Il a été suivi d'un examen par ressuage coloré qui a confirmé la présence d'une fissure débouchante dans la partie libre de l'adaptateur, et révélé 3 petites indications linéaires sur la soudure ($l < 3$ mm).
- .L'examen par réplique effectué sur l'une de ces trois indications a montré qu'il s'agit d'un défaut de soudage.
- .L'adaptateur 54 présente des fissures longitudinales situées au droit ou au dessus de la zone soudée réelle dont la longueur maximale est de 75 mm.
- .L'adaptateur 63 présente 3 fissures longitudinales dont aucune ne dépasse la zone soudée.

AUCUNE FISSURE CIRCONFERENTIELLE AMORCEE EN PAROI INTERNE OU EXTERNE N'A ETE OBSERVEE.

-Les ovalisations mesurées sur empreinte donnent 1,38 et 1,46 mm pour les adaptateurs 54, 57.

4.3 CONTROLES EFFECTUES SUR BUGEY 4

1) Traversée de l'évent

Le contrôle par courants de Foucault de la peau interne a été effectué et n'a montré la présence d'aucun défaut.

2) Traversées des mécanismes de commande

Les 65 traversées ont été contrôlées.

Contrôles non destructifs effectués

- Examen télévisuel interne de chaque adaptateur
- Examen par courants de Foucault de la peau interne
- Examen par ultrason interne de la peau externe
- Examen complémentaire par courants de Foucault de l'angle du lamage pour tous les adaptateurs présentant des indications (7 adaptateurs - le 8ème est inaccessible)
- Examen complémentaire par télé-endoscopie pour expertiser certaines indications
- Examen par ressuage sous dôme de la soudure de l'adaptateur 65
- Examen par ressuage de l'intérieur de l'adaptateur 65
- Examen télévisuel global de l'intérieur du couvercle
- Prise d'empreinte sur 6 adaptateurs (14, 17, 46, 50, 53, 65)

Résultats

-L'examen télévisuel global a mis en évidence la tache de bore sur la traversée 65. Il a été suivi d'un examen par ressuage coloré qui a confirmé la présence d'une fissure débouchante dans la partie libre de l'adaptateur.

Cet examen par ressuage a aussi révélé 3 petites indications arrondies sur la soudure ($\varphi < 3$ mm)

-Les examens télévisuels et courants de Foucault ont mis en évidence 8 adaptateurs avec fissures longitudinales
 .dont 2 avec fissures longitudinales courtes dans ou sous le lamage (longueur maximale 7 mm) (adaptateurs 50 et 54)
 .5 avec fissures longitudinales localisées au droit, ou en dessous de la zone soudée (adaptateurs 55, 61, 62, 63, 65).
 .et 1 adaptateur (57) dont 1 des 6 fissures longitudinales dépasse la zone soudée.

AUCUNE FISSURE CIRCONFERENTIELLE AMORCEE EN PAROI INTERNE OU EXTERNE N'A ETE OBSERVEE.

-Les ovalisations mesurées sur empreinte sont résumées dans le tableau ci-dessous

N° adaptateur	14	17	46	50	53	65
Ovalisation (mm)	0,56	0,67	1,86	1,42	1,13	1,61

4.4 CONTROLES EFFECTUES SUR FESSENHEIM 1

1) Traversée de l'évent

Le contrôle par courants de Foucault de la peau interne a été effectué et n'a montré la présence d'aucun défaut.

2) Traversées des mécanismes de commande

Nombre de traversées contrôlées : 26

4 thermocouples

8 réserves Pu

14 traversées démontées dont 12 périphériques

(les 2 traversées non périphériques sont la 11 qui avait été redressée (cf 5.2) et la 28 pour permettre l'accès à cette traversée 11).

Contrôles non destructifs effectués sur les 26 traversées

- Examen télévisuel interne
- Examen par courants de Foucault de la peau interne
- Examen par ultrason de la peau externe
- Examen complémentaire par télé-endoscopie pour expertiser certaines indications
- Prise d'empreinte sur 12 adaptateurs (14 à 17, 46 à 53)

Résultats

Seule la traversée 53 présente une fissure longitudinale dans la zone hors soudure (partie libre de l'adaptateur)

AUCUNE FISSURE CIRCONFERENTIELLE EN PAROI INTERNE OU EXTERNE N'A ETE OBSERVEE.

- Les ovalisations mesurées sur empreinte sont données dans le tableau 4.4.1.

- Les ovalisations mesurées par ultrasons donnent le classement résumé dans le tableau 4.4.2.

4.5 SYNTHESE DES CONTROLES DES 3 COUVERCLES CP0 (FES1, BUG3,BUG4)

4.6.1 EVENTS

Sur les 3 événements contrôlés aucune indication de type fissure n'a été relevée en peau interne du tube.

4.6.2 ADAPTATEURS

AUCUNE FISSURE CIRCONFERENTIELLE EN PAROI INTERNE OU EXTERNE N'A ETE OBSERVEE SUR LES 156 ADAPTATEURS CONTROLES.

Onze d'entre eux, situés sur les cercles les plus périphériques, sont affectés de fissures longitudinales.

La répartition des adaptateurs contrôlés en fonction de leur position sur le couvercle est résumée dans le tableau 4.6.2.1. et illustrée par le graphe 4.6.2.1.

La répartition des adaptateurs fissurés est dans le tableau 4.6.2.2. et illustrée par le graphe 4.6.2.2.

Ces fissures se développent préférentiellement dans deux zones diamétralement opposées : 0° (côté bride) et 180° (côté axe du couvercle). Cette localisation est cohérente avec les arguments développés au chapitre 6.

Les adaptateurs trouvés fissurés ont une ovalisation supérieure ou égale à 1,2 mm.

5 BILAN DE L'ANALYSE DES DOSSIERS DE FABRICATION

5.1 INTRODUCTION

L'analyse a porté sur les points suivants :

- l'approvisionnement des adaptateurs,
 - . élaboration ;
 - . forgeage ;
 - . traitement thermique après forgeage,
- l'usinage,
- le frettage,
- le soudage des adaptateurs sur la calotte,
- les contrôles en fin d'assemblage (de la géométrie et du libre passage)
- l'examen des non conformités.

Les investigations, commencées sur BUGEY 3, ont été étendues ensuite à l'ensemble du palier CP0.

Les manchettes d'adaptateurs sont usinées dans des barres forgées. De nombreuses coulées ont été utilisées pour fabriquer les manchettes d'adaptateurs des couvercles CP0 avec des modes d'élaboration allant de l'élaboration à l'air au four électrique jusqu'à la refusion sous vide ou sous laitier.

5.2 SYNTHESE

Il n'y a pas eu de modification fondamentale dans les spécifications d'approvisionnement , ainsi que dans les conditions de frettage.

Pour ce qui concerne les conditions de soudage des adaptateurs sur la calotte, on ne relève pas d'évolution de forme du lamage et de changement de type d'électrodes utilisées, pour le palier CP0.

On relève surtout que les séquences de soudage n'étaient ni spécifiées, ni documentées et ne faisaient pas l'objet d'une attention particulière à l'égard des déformations des adaptateurs.

Les conséquences des géométries variables, présence ou non d'un chambrage usiné en partie basse des adaptateurs, sont appréciées par le calcul (voir paragraphe 6).

L'examen des fiches de non conformité a mis en évidence quelques anomalies susceptibles d'affecter la résistance à la corrosion sous contrainte : correction d'altitude des adaptateurs, frettage non homogène, coup d'outil, redressage de

la partie supérieure des adaptateurs. Certaines ont été prises en compte dans le programme de contrôle (par exemple, l'adaptateur 11 de FESSENHEIM 1 qui a été redressé, voir paragraphe 4.4).

L'examen détaillé des conditions d'approvisionnement des adaptateurs du palier CP0 a conduit à constater les points suivants :

- différents types d'élaboration des coulées ont été utilisés,
- les taux de corroyage ne sont pas identiques selon les coulées,
- les traitements thermiques subis par les barres après forgeage ne sont pas identiques (deux types de traitement),
- les spécifications contractuelles de recette sont respectées,
- les caractéristiques mécaniques sont relativement dispersées,

Le nombre de barres issues de chaque coulée n'est pas connu. De même, le nombre d'adaptateurs usinés dans chaque barre n'est pas connu (seule la filiation adaptateurs/coulées est connue).

Compte tenu de ce qui précède et du mode de fabrication adopté (manchette forée à partir de barres forgées unitairement), il ressort des différents éléments recensés que les barres issues des différentes coulées peuvent présenter des caractéristiques mécaniques individualisées et une structure variable y compris dans une même barre, qui peuvent se traduire par des sensibilités à la corrosion sous contrainte différentes entre adaptateurs.

TABLEAU 4.4.1

OVALISATIONS MESUREES SUR EMPREINTE SUR FESSENHEIM 1

N° adaptateur	14	15	16	17	46	47	48	49	50	51	52	53
Ovalisation (mm)	0,30	0,41	0,53	0,69	1,50	1,05	1,23	1,72	1,28	1,16	1,46	1,23

TABLEAU 4.4.2

OVALISATIONS MESUREES PAR ULTRASONS SUR FESSENHEIM 1

	$Ov < 0,5 \text{ mm}$	$0,5 < Ov < 1$	$1 < Ov < 1,5$	$1,5 < Ov < 2$
Adaptateur N°	14, 15, 17, 28	11, 16, 47, 48	46, 49 à 62, 65	63, 64
Total	4	4	16	2

x colonnes Thermocoules
• adaptateurs de réserve, obtus

TABLEAU 4.6.2.1

ADAPTATEURS CONTROLES

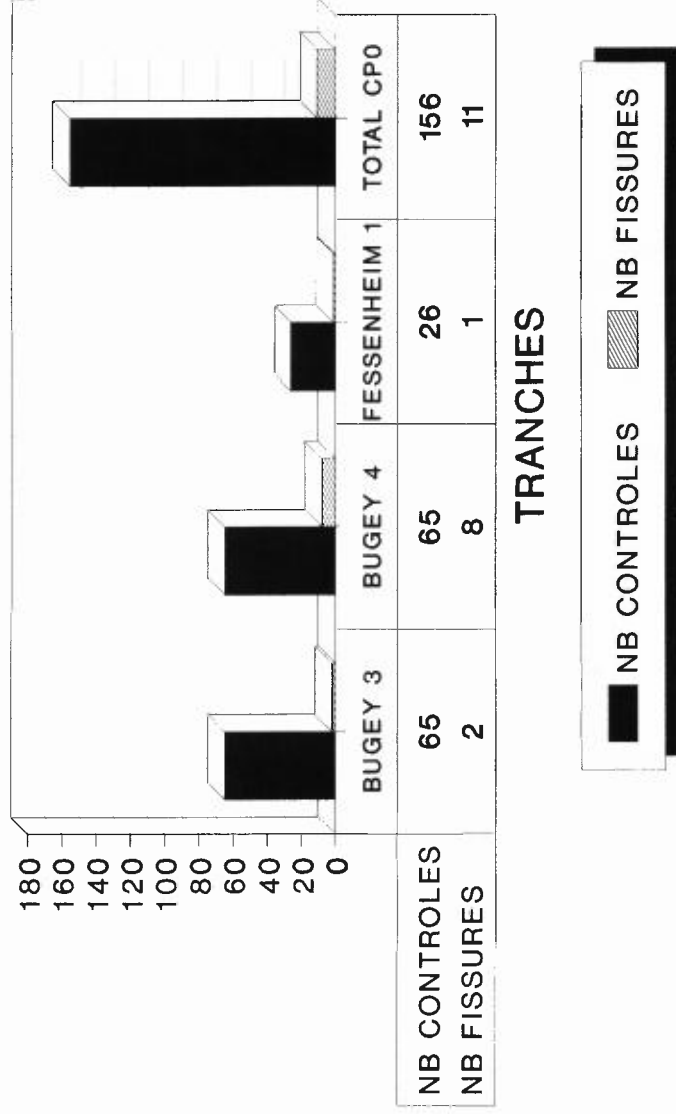
TRANCHE	CERCLES<10	CERCLE 10	CERCLE 11	CERCLE 12	TOTAL
BUGEY 3	45	8	4	8	65
BUGEY 4	45	8	4	8	65
FESSENHEIM 1	6	8	4	8	26
TOTAL CP0	96	24	12	24	156

TABLEAU 4.6.2.2

ADAPTATEURS FISSURES

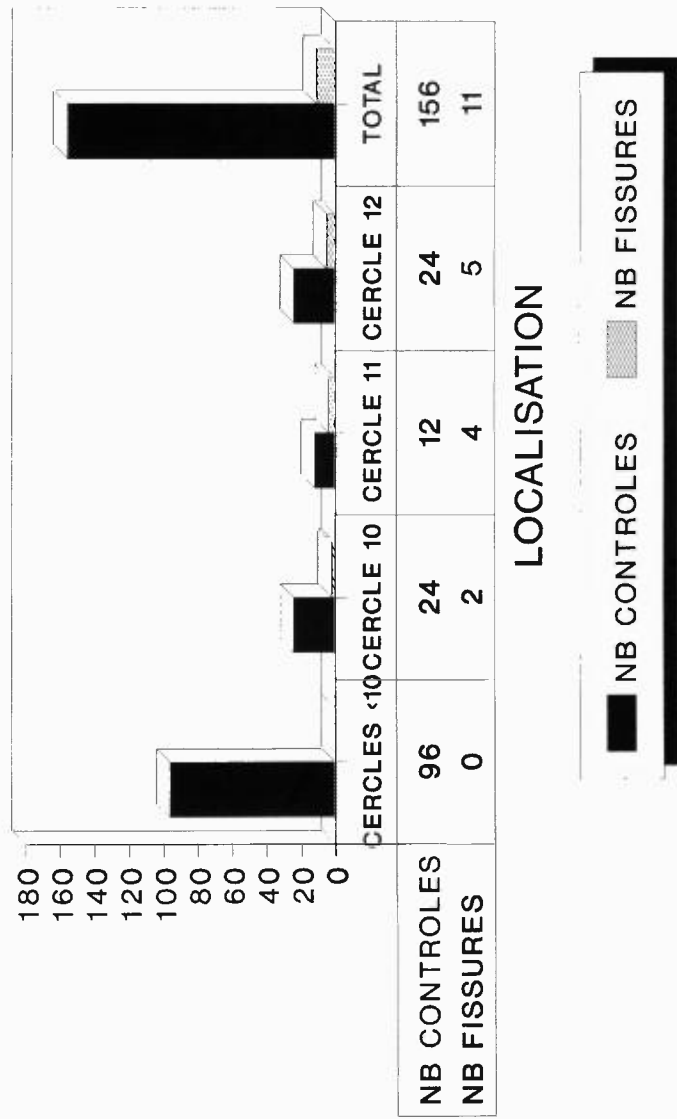
TRANCHE	CERCLES<10	CERCLE 10	CERCLE 11	CERCLE 12	TOTAL
BUGEY 3	0	0	1	1	2
BUGEY 4	0	1	3	4	8
FESSENHEIM 1	0	1	0	0	1
TOTAL CP0	0	2	4	5	11

BILAN DES CONTROLES DES COUVERCLES CP0



GRAPHE 4.6.2.2

BILAN DES CONTROLES PAR CERCLES



GRAPHE 4.6.2.1

6 CONNAISSANCE ET ANALYSE DU PHENOMENE

6.1 IDENTIFICATION DU MODE DE DEGRADATION

6.1.1 REPLIQUE SUR LA SOUDURE DE LA T54 DE BUGEY 3

Suite à la mise en évidence de 3 défauts de type linéaire lors d'un contrôle par ressuage de la soudure de l'adaptateur 54 de BUGEY 3, une intervention sur site a eu lieu le 17 décembre 1991, pour prise de répliques métallographiques sur l'une des indications.

L'indication, située à 270° et de longueur 2,5 mm, a été caractérisée. Elle correspond à un défaut de soudage, volumique et allongé (longueur : 2,2 mm, largeur maximale 0,3 mm), de type manque de matière. Il est situé entre deux passes en Inconel 182. Aucun caractère évolutif n'a été décelé.

6.1.2 PRELEVEMENTS SUR L'ADAPTATEUR 65 DE BUGEY 4

Les premières analyses réalisées (nature du matériau, conditions de service, contrôles non destructifs, contrôles géométriques) et les connaissances acquises sur le comportement de l'alliage 600 en milieu primaire permettent d'avancer l'hypothèse la plus vraisemblable sur l'origine des dégradations constatées, à savoir un phénomène de corrosion sous contrainte, liée à d'importantes contraintes résiduelles de fabrication.

Afin de conforter cette hypothèse, un prélèvement de type pastille ($\varnothing$:20 mm, prof : 2 mm) était envisagé au niveau d'un défaut situé en surface interne de la partie inférieure de l'adaptateur. Il ne remet pas en cause le comportement et la fonction de la pièce et permet la caractérisation métallographique volumique de défauts décelés aux contrôles non destructifs.

Prévue initialement sur l'adaptateur 54 de BUGEY 3, cette intervention a eu lieu sur l'adaptateur 65 de BUGEY 4 du fait de l'obtention de résultats similaires lors des contrôles non destructifs de ces pièces et afin de conserver l'intégrité de l'adaptateur 54, considéré comme étalon pour les contrôles non destructifs et devant être, de ce fait, caractérisé par une expertise destructive globale. Ce prélèvement a formellement confirmé la nature du phénomène, à savoir la corrosion sous contrainte en milieu primaire de l'inconel 600.

6.1.3 EXPERTISE DE L'ADAPTATEUR 54 DE BUGEY 3

Il a été décidé l'extraction de l'adaptateur 54 de BUGEY, élément à l'origine de la découverte du phénomène, afin de mettre en oeuvre une expertise destructive la plus riche en enseignements possible et, en particulier, répondant aux objectifs rappelés ci-après:

- confirmer et ainsi valider les contrôles non destructifs réalisés sur site,
- caractériser le mode d'endommagement (amorçage, propagation jusqu'à fuite finale),
- déterminer le chemin de fuite,
- examiner l'influence de l'épreuve hydraulique sur la propagation des défauts,
- caractériser l'état de l'acier ferritique au contact de l'adaptateur,
- examiner les différents paramètres pouvant influencer sur le comportement du matériau (microstructure, écrouissage, caractéristiques mécaniques et chimiques),
- examiner la géométrie des défauts et leur éventuelle propagation dans le matériau d'apport de la soudure.

L'ensemble de ces éléments a conduit à l'élaboration et à la préparation d'une intervention sur site répondant aux précédents critères et permettant la mise en place d'un nouvel adaptateur. Elle a été conçue en plusieurs phases principales :

- prélèvement de la partie inférieure de l'adaptateur dépassant sous le couvercle, permettant en particulier un accès aux indications décelées au contrôle par ressuage dans la soudure et une première analyse des défauts situés à 180°,
- "carottage" de la partie inférieure de l'adaptateur implantée dans l'épaisseur du couvercle jusqu'au-dessus de la soudure, en incluant une partie de la soudure et de l'acier ferritique du couvercle,
- mise en place d'un nouvel adaptateur en tenant compte de la nouvelle configuration, ce qui nécessite, après la mise en position de l'adaptateur neuf, le montage d'une douille vissée, liée à cet adaptateur par soudure puis fixée sur le couvercle par soudage au niveau de l'emplacement de l'ancienne soudure.

L'intervention est terminée et l'expertise est en cours.

Pour l'adaptateur central, à déplacement maximal radial égal, le modèle élastoplastique (modèle 2) conduit, par rapport au modèle élastique, à réduire les contraintes longitudinales dans le rapport de 1 à 0,53 et les contraintes circonférentielles dans le rapport de 1 à 0,56.

Si dans le modèle élastique (modèle 1) on postule que le retrait radial est égal à la limite d'élasticité (363 MPa dans le modèle élastoplastique), on constate que :

- le déplacement radial maximal calculé est inférieur à celui mesuré et obtenu dans le calcul élastoplastique (0,12 contre 0,18),
- la contrainte circonférentielle maximale est surestimée que l'étude soit faite sans ou avec modélisation de la calotte (432 et 490 MPa contre 430 MPa dans le calcul élastoplastique),
- la contrainte longitudinale est surestimée dans les modèles sans ou avec calotte (424 MPa et 348 MPa contre 288 MPa dans le calcul élastoplastique correspondant à un déplacement radial de 0,18 mm).

Pour l'adaptateur périphérique, la référence 2 présente l'étude élastique effectuée (modèle 1). Trois sous-modèles ont été retenus avec comme paramètre de variation :

- l'orientation du retrait qui est postulée soit parallèle au fond de lamage (modèle 1.1), soit perpendiculaire au tube (modèles 1.2 et 1.3),
- la constitution de la soudure qui est postulée être réalisée, soit en montant des couches successives horizontales (modèle 1.2), soit en tournant régulièrement autour du tube (modèles 1.1 et 1.3).

Une profilométrie par empreinte et par US a été effectuée sur l'adaptateur 54 de BUGEY 3.

La flèche de l'adaptateur 54 de BUGEY 3 est d'environ 1 mm d'après la profilométrie effectuée par US.

Pour obtenir une telle valeur avec le modèle 1.2, il faudrait postuler un retrait radial de 1000 MPa. Cette valeur serait encore plus forte avec les 2 autres modèles.

L'ovalisation maximale de l'adaptateur 54 est d'environ 1,4 mm d'après les différentes mesures effectuées. Cette ovalisation maximale est obtenue au droit de la soudure dans sa partie basse (c'est-à-dire dans notre modèle, à environ 90 mm du bas de l'adaptateur).

Pour obtenir un niveau d'ovalisation comparable avec celui des mesures, il faut postuler un retrait radial de 750 MPa avec le modèle 1.3. Cette valeur serait encore plus forte avec les 2 autres modèles.

6.2 ETUDES THEORIQUES-CALCULS

6.2.1 PRINCIPAUX CHARGEMENTS SUR L'ADAPTATEUR

Les différentes sollicitations sur l'adaptateur proviennent :

- de l'opération de frettage,
- de l'opération de soudage,
- des conditions normales de pression et de température,
- des situations transitoires des conditions de 2ème catégorie.

Les contraintes en état permanent (286°C, 154 bar) et (315°C, 154 bar) sont estimées et cumulées aux contraintes de frettage. Les contraintes maximales restent faibles dans le tube d'adaptateur et dans la soudure (inférieures à 30 MPa).

L'étude des transitoires en peau interne d'adaptateur au niveau de la soudure, lors des transitoires de 2ème catégorie confirme que les risques de fissuration par fatigue dans cette zone sont très faibles malgré une représentation très sévère des transitoires locaux.

Les contraintes de soudage ont été estimées avec 3 jeux d'hypothèses de complexité et de raffinement croissant pour l'adaptateur central ; l'étude est en cours pour un adaptateur périphérique :

- modèle 1 : approche élastique et représentation de l'opération de soudage par une pression au niveau du joint soudé;
- modèle 2 : approche élastoplastique et représentation de l'opération de soudage par une déformation imposée au niveau du joint soudé;
- modèle 3 : approche élastoplastique utilisant un jeu de conditions aux limites et de conditions de représentation des chargements spécifiques aux adaptateurs, appliqué à un adaptateur central.

Le recalage des calculs se fait soit par référence aux informations disponibles sur l'adaptateur 54 de BUGEY 3 pour l'adaptateur périphérique (ovalisation, zone de contrainte maximale fissurée, profilométrie et flèche) soit par référence au déplacement radial maximal mesuré dû au soudage.

Le dépouillement se fait également en terme de rapport entre la contrainte longitudinale maximale et la contrainte circonférentielle maximale.

Avec une telle valeur de contrainte radiale, les contraintes circonférentielles et longitudinales maximales sont largement supérieures à la limite d'élasticité. On peut penser là également qu'une étude élastoplastique conduirait, pour être en accord avec ovalisation et flèche, à des contraintes circonférentielles et longitudinales moins élevées.

Les fissures détectées ont toujours été positionnées près des plans 0° et 180° . C'est dans ces deux plans que nous obtenons également les contraintes circonférentielles maximales.

L'altitude où ces fissures ont été trouvées est celle de la soudure dans sa partie basse. Pour le calcul, les contraintes maximales sont localisées à une altitude beaucoup plus haute, particulièrement pour le plan 180° .

L'approche élastique d'un adaptateur périphérique n'est pas suffisante, ni pour retrouver les valeurs des flèches et ovalisations mesurées, ni pour assurer la cohérence entre l'altitude des contraintes circonférentielles maximales et la position des défauts longitudinaux constatés. Une étude élastoplastique du phénomène devrait permettre d'assurer une meilleure cohérence et abaisser encore le rapport contrainte longitudinale sur contrainte circonférentielle.

Par contre, l'étude montre bien la plus grande sensibilité des plans 0° et 180° et la tendance à une flèche dirigée vers l'extérieur du couvercle.

Malgré cette cohérence limitée et grâce au calcul élastoplastique effectué sur l'adaptateur central (modèle 2), nous pouvons conclure à la prédominance des contraintes circonférentielles sur les contraintes longitudinales. Si les calculs élastoplastiques (modèle 2) qui vont être entrepris sur un adaptateur périphérique confirment les valeurs obtenues sur adaptateur central, il devrait pouvoir être affirmé le faible risque de création de fissure circonférentielle.

Concernant l'adaptateur central, un troisième modèle a été utilisé, il donne des résultats très encourageants:

- variation maximale de rayon : 0,24 mm
- présence d'une zone défrettée d'environ 5 mm juste au-dessus de la soudure
- présence d'une zone surfrettée d'environ 10 mm au-dessus de cette zone
- contraintes longitudinales et circonférentielles en peau interne avec un double pic (un de chaque côté de la soudure); une contrainte circonférentielle maximale de 420 MPa environ et une contrainte longitudinale maximale de 280 MPa environ.

Une comparaison de ces contraintes avec les mesures réalisées par la méthode du trou sur un adaptateur neuf confirme que le niveau calcul est un peu élevé mais que le rapport contrainte longitudinale / contrainte circonférentielle est bien évalué et que les pics de contraintes sont correctement situés.

Un raffinement du modèle et quelques études paramétriques permettront probablement d'expliquer ces différences avant d'appliquer ce type d'approche à un adaptateur périphérique.

En conclusion, les calculs élastiques ne permettent pas des simulations raisonnables de l'opération de soudage, les calculs plastiques déformation imposée donnent des résultats intéressants. L'utilisation du modèle plastique spécifique à un adaptateur central est très encourageante.

Pour l'adaptateur périphérique les études plastiques sont en cours. Tous les résultats de calcul et de mesure confirment un niveau de contraintes longitudinales significativement plus faible que celui des contraintes circonférentielles. Les études de recalage calcul/expérience se poursuivent ainsi que quelques études paramétriques afin de mieux apprécier le niveau de contraintes dans ce type d'assemblage.

6.2.2 ANALYSE DU FRETTEGE

Les adaptateurs sont assemblés par frettage dans la calotte de la cuve avec une interférence au diamètre de 0,08 mm(+0.01,-0) puis soudés. Les différentes études disponibles confirment que la pression a un fort effet "défrettant" et la température un léger effet "surfrettant". L'essentiel des études est réalisé sur l'adaptateur central; une étude bidimensionnelle plane justifie que les effets d'ovalisation des adaptateurs périphériques augmentent ponctuellement les pressions d'interface, mais pas de façon significative, ce qui justifie que l'essentiel des raisonnements soit réalisé sur l'adaptateur central.

Lors de l'épreuve hydraulique décennale (207 bar, 80°C environ), il n'y a pas défrettage total sur toute la hauteur du couvercle, quelques millimètres restent en contact légèrement au-dessus de la soudure avec de faibles pressions d'interface. Les longs défauts traversants (au-delà de cette zone de contact résiduelle) mèneront à fuite lors de cette épreuve. Quant aux défauts plus courts mais traversants juste au-dessus de la soudure, ils en feront très probablement de même en raison de l'"inétanchéité" du frettage (faible hauteur, faible pression d'interface), mais le débit sera beaucoup plus faible que précédemment. Seule l'épreuve hydraulique initiale à 20°C mène à un défrettage total.

En transitoire, 15 transitoires des conditions de 2ème catégorie conduisent à un défrettage sur plus de la moitié de l'épaisseur de la calotte, mais souvent pendant des durées très courtes ce qui entraînera quelques cas de fuite avec des débits très faibles et donc des volumes de fuite négligeables.

Alors qu'en fonctionnement normal (155 bar, 315°C) le frettage reprend très probablement l'effet de fond en cas de rupture hypothétique circonférentielle de l'adaptateur au-dessus de la soudure, ce n'est probablement plus le cas lors des transitoires entraînant un défrettage sur une hauteur significative.

Il est à remarquer que pour toutes ces analyses en transitoire, la modélisation thermohydraulique locale des transitoires de conception reste très simple, ce qui surestime les effets de choc thermique et donc les risques de défrettage.

Des essais, à 20°C, de débit de fuite à travers des maquettes frettées représentatives (à l'exception de la fissuration) confirment que pour cette température, même avec des pressions d'interfaces significatives, l'étanchéité de l'assemblage n'est pas conservée. Une transposition de ces essais aux conditions réacteurs (155 bar, 315°C) est réalisée.

6.2.3 ANALYSE DES DEFORMATIONS (OVALISATION, FLEXION)

Les profilométries réalisées sur le palier CP0 permettent de faire les premières corrélations entre les informations concernant l'ovalisation et les risques de fissurations.

Le tableau 6.2.3 confirme que l'ovalisation seule ne permet pas de dégager un critère de fissuration. D'autre part, sur le plan des calculs, il est très délicat de parvenir à la notion de contraintes à partir des informations d'ovalisation sans connaissance de l'état initial. Des travaux sont en cours chez FRAMATOME pour valider une méthode inverse itérative permettant de remonter au niveau des contraintes à partir des informations de profilométrie complète par l'intermédiaire de calculs élastoplastiques bi et tridimensionnels.

L'analyse du tableau confirme le caractère nécessaire mais non suffisant de l'existence de l'ovalisation pour obtenir une fissuration : il n'y a pas de fissuration pour des ovalisations inférieures à 1,23 mm; il peut ne pas y avoir de fissuration pour des ovalisations de l'ordre de 2 mm.

La localisation azimutale des fissures longitudinales est cohérente avec les contraintes maximales calculées et les relevés profilométriques.

6.2.4 IMPACT DU CHAMBRAGE SUR LE CHAMP DES CONTRAINTES

Sur les adaptateurs des cercles périphériques X, XI et XII des tranches du BUGEY, un chambrage de $\varnothing$ 74 mm sur 85 mm de hauteur a été réalisé en pied d'adaptateur (diamètre interne de l'adaptateur 70 mm). Le rayon en fond de chambrage est de 0.5 mm. Une étude élastique tridimensionnelle complétée par une étude

locale bidimensionnelle montre une augmentation des contraintes circonférentielles de 10 % et un doublement des contraintes longitudinales, par rapport au même adaptateur sans chambrage.

Cependant, le point où les contraintes longitudinales sont maximales se situe au-dessus du chambrage: le fond de chambrage n'est pas un précurseur en terme d'amorçage de fissure par CSC.

6.2.5 ANALYSE DE NOCIVITE DE DEFAUTS

6.2.5.1 INTRODUCTION

L'analyse a pour objet :

- l'estimation de la possibilité d'amorcer et de propager des fissures dans les adaptateurs,
- la compréhension du phénomène de fissuration longitudinale observé sur plusieurs adaptateurs.

Elle s'appuie sur l'analyse des contraintes du § 6.2.1 et un cumul des contraintes de fretage, de soudage et des contraintes en service tant pour un adaptateur central (modèle élastoplastique déformation imposée) que pour un adaptateur périphérique (modèle élastique pression imposée).

Elle considère les propriétés de matériau suivante :

- une loi d'amorçage de fissure à 315°C reliant la contrainte au temps d'amorçage (borne inférieure du temps à amorçage pour un Inconel 600 forgé en milieu primaire),
- une loi de propagation de fissure à 315°C reliant la vitesse de fissuration au facteur d'intensité de contrainte avec un seuil de 9 MPa $\sqrt{m}$ et un palier constant de 3 mm/an (borne supérieure de la vitesse de propagation pour un Inconel 600 non écroui en milieu primaire).

Elle complète l'analyse de l'amorçage et de la propagation par une détermination des défauts critiques en utilisant la méthode du double critère (déchirure - écoulement plastique) et pour les défauts longitudinaux la détermination de l'aire de brèche et du débit de fuite en fonctionnement nominal.

6.2.5.2 DEFAUTS LONGITUDINAUX

Pour les adaptateurs centraux :

- le risque d'amorçage est exclu pour une durée de fonctionnement inférieure à 64 000 heures (environ 7 ans) ; pour 140 000 h (environ 16 ans) 2 zones

d'amorçage peuvent éventuellement se développer (sur 15 mm de longueur en dessous de la soudure et 5 mm de longueur au dessus de la soudure)

- les risques de propagation de ces fissures sont très faibles, soit qu'elles ne deviennent pas traversantes (zone au dessus de la soudure) soit qu'elles s'arrêtent au niveau de la zone frettée
- les défauts critiques en terme de rupture brutale ont une longueur supérieure à 350 mm au dessus du couvercle
- les débits de fuite en fonctionnement normal sont de 10 l/h pour une fissure dépassant le couvercle de 28 mm et de 100 l/h pour une fissure le dépassant de 57 mm.

Pour les adaptateurs périphériques, l'analyse utilise des contraintes élastiques très pénalisantes :

- le risque d'amorçage au point le plus chargé intervient à 23 000 h sur les génératrices 0° et 180° ,
- les hauteurs des fissures traversantes après propagation sont estimées à 40 mm sur la génératrice 0° et 50 mm sur la génératrice 180° après 80 000 h de fonctionnement (ce qui est cohérent avec les constatations sur l'adaptateur T54 de BUGEY 3). Au-delà de ces 80 000 h, la vitesse de propagation est d'environ 3 mm/an,
- le défaut critique en terme de rupture brutale à une longueur très importante : 350 mm au-dessus du couvercle,
- la fuite détectable en fonctionnement normal correspond à un défaut de longueur très inférieure au défaut critique (environ 30 mm de long au dessus du couvercle pour 10 l/h)

6.2.5.3 DEFECTS CIRCONFÉRENTIELS

Pour les adaptateurs centraux, à partir des résultats du calcul élastoplastique, il est possible de montrer qu'il existe sur ces adaptateurs une marge importante vis-à-vis de la fissuration circonférentielle par CSC. Le calcul fait apparaître une durée d'amorçage de l'ordre de 190 000 h (environ 21 ans). De plus, le conservatisme associé au niveau des contraintes calculées permet d'exclure normalement le risque d'amorçage de fissures circonférentielles pendant la durée de vie.

Dans l'hypothèse où une telle fissure s'amorcerait, cet amorçage ne s'accompagnerait pas d'un percement de l'adaptateur : en effet, la contrainte longitudinale, dans la section où elle est maximale en peau interne, décroît rapidement et devient compressive au-delà de 3 mm de profondeur ; le facteur

d'intensité de contrainte présente un maximum pour environ 2 mm de profondeur, puis décroît mais reste toujours inférieur au seuil de 9 MPa $\sqrt{m}$, ce qui assure l'absence de propagation de la fissure.

Le défaut critique non traversant complet est très important : 90 % de l'épaisseur de l'adaptateur.

La garantie d'intégrité du tube vient en fait de l'existence d'une zone en compression sur une partie importante de l'épaisseur, ce qui bloque la propagation des fissures. La validité de l'analyse tient à ce que l'existence d'une zone en compression est une caractéristique liée aux conditions générales de l'interaction entre le couvercle, la soudure et le tube lors du refroidissement.

Notons que le passage par un calcul élastique intermédiaire a permis de montrer à quel point un tel calcul augmente le niveau des contraintes longitudinales maximales en peau interne et modifie dans l'épaisseur l'état des contraintes calculées. Il pénaliserait donc exagérément une éventuelle analyse des défauts circonferentiels qui en exploiterait les résultats en diminuant l'importance relative des contraintes de compression vers la peau externe.

Nous utiliserons cette remarque qualitativement pour les adaptateurs périphériques, jusqu'à obtention des résultats de calculs élastoplastiques spécifiques.

Pour les adaptateurs périphériques, nous avons cherché à déterminer, à partir d'une évaluation très pessimiste des contraintes (calcul élastique) et au terme d'un fonctionnement de 90 000 h (environ 10 ans), quelle était la taille maximale des fissures circonferentielles hypothétiques que l'on pourrait avoir à envisager au-dessus de la soudure.

Nous avons montré avec ces hypothèses pessimistes que le risque d'amorçage d'une fissure circonferentielle au-dessus de la soudure ne pourrait intéresser qu'une petite partie de la circonférence (80° autour de la génératrice 0° et 10° autour de la génératrice 180° au maximum pour les 40 ans de durée de vie de la tranche).

L'analyse de la distribution des contraintes nous a conduit à considérer, en plus du risque de propagation dans la direction circonferentielle proprement dite, un risque de fissuration le long d'un contour parallèle au bord de la soudure qui relie les deux zones d'amorçage aux génératrices 0° et 180°. Pour simplifier l'analyse, nous avons construit un modèle d'analyse de comportement des fissures en projection sur une coupe perpendiculaire à l'axe du tube.

L'étude globale d'amorçage et de propagation montre que la taille cumulée de la projection des fissures développées à partir des deux zones d'amorçage atteint au plus 122° après 90 000 h de fonctionnement. Cette taille est très inférieure à la taille critique qui excède 320°.

TABLEAU 6.2.3

CORRELATION OVALISATION MESUREE - RESULTATS DES
CONTROLES

TRANCHE	ADAPTATEUR	OVALISATION MAX (mm)	RESULTAT CONTROLES
BUG 3	54	1.38	F
	57	1.46	NF
BUG 4	14	0.56	NF
	17	0.67	NF
	46	1.86	NF
	50	1.42	F
	53	1.13	NF
	65	1.61	F
FES 1	14	0.30	NF
	15	0.41	NF
	16	0.53	NF
	17	0.69	NF
	46	1.50	NF
	47	1.05	NF
	48	1.23	NF
	49	1.72	NF
	50	1.28	NF
	51	1.16	NF
	52	1.46	NF
	53	1.23	F

F = Fissuré - NF = Non Fissuré

En raison des conservatismes attachés à la méthode de détermination des contraintes dans l'adaptateur par calcul élastique et des conservatismes attachés aux modèles retenus pour les analyses d'amorçages et de propagation, ces résultats permettent de garantir l'absence du risque d'éjection d'un adaptateur suite à une rupture circonférentielle liée à la CSC pendant une période de fonctionnement d'un cycle supplémentaire (soit un total de 90 000 h).

Une évaluation plus réaliste du comportement pourra être faite à partir des résultats d'un calcul élastoplastique 3D en cours actuellement. Au vu des différences obtenues entre les calculs élastique et élastoplastique de l'adaptateur central, nous pouvons compter obtenir une diminution des contraintes suffisamment importante pour faire disparaître le risque d'amorçage à la génératrice 180° et fortement ralentir le développement de la fissuration à partir de la génératrice 0° sur plusieurs cycles de fonctionnement, ce qui est confirmé par les résultats de mesure des contraintes résiduelles sur un couvercle neuf.

6.3 ETUDES EXPERIMENTALES-MAQUETTES

6.3.1 OBJECTIFS

Un programme d'essais sur maquettes a été envisagé notamment pour confirmer l'aspect "précurseur" vis-à-vis de la corrosion sous contrainte de certains composants, dont le tube d'évent du couvercle de cuve.

Les incidents affectant des adaptateurs de couvercles de cuve CP0 ont accéléré le lancement du programme dès le mois d'octobre 91 pour valider l'hypothèse d'un mécanisme de corrosion sous contrainte de l'Alliage 600 en milieu primaire.

A cette fin, deux types de maquettes (échelle 1) ont été considérés :

- des maquettes en acier inoxydable permettant grâce à des essais de corrosion en $MgCl_2$ de courte durée de disposer rapidement d'éléments d'appréciation sur la localisation et la hiérarchisation de contraintes,
- des maquettes en Inconel 600 destinées par des essais en soude et des mesures de contraintes résiduelles à préciser les résultats des essais précédents et à valider les calculs entrepris par ailleurs, afin de définir un critère de fissuration.

6.3.2 DEFINITION DU PROGRAMME

6.3.2.1 CHOIX DES CONFIGURATIONS

Plusieurs configurations ont été sélectionnées avec le constructeur, en prenant en compte les paramètres suivants:

- Position des adaptateurs en relation avec leur déformation (ovalisation, flèche...)
- Forme du chambrage,
- Forme du lamage dans l'acier ferritique,
- Influence du procédé de soudage.

Par ailleurs, la configuration tube d'évent a été testée en tant que zone "précurseur".

6.3.2.2 PROCEDURE D'ESSAIS

- Essais en MgCl₂

Il a été décidé de retenir pour les deux premiers essais les conditions standard de 24 h à 154°C correspondant à un seuil de fissuration de l'ordre de 80 à 100MPa (réf 2).

IL EST IMPORTANT DE NOTER QUE CE SEUIL EST BEAUCOUP PLUS BAS QUE CELUI DE L'ALLIAGE 600 EN MILIEU PRIMAIRE ET PAR CONSÉQUENT QUE CE TEST S'AVÈRE PLUS SEVERE QUE LA SITUATION EN FONCTIONNEMENT INDUSTRIEL.

- Essais en soude

L'essai de corrosion en soude à 350°C sur maquettes en Inconel 600 permet un amorçage de fissuration sous une contrainte un peu plus faible que celle produisant une fissuration en service en milieu primaire (seuil évalué à 0,8 Sy). Sur la base d'une durée d'amorçage de l'ordre de 200 h, un essai en soude de courte durée (1000 h ou moins) permet d'estimer les risques d'amorçage de fissures en service.

Un essai plus long permettra d'évaluer la répartition des contraintes résiduelles dans l'épaisseur de l'adaptateur (essai visé de 3000 h compte tenu de la vitesse de propagation dans ce milieu).

6.3.3 PREMIERS RESULTATS- POINT D'AVANCEMENT DU PROGRAMME

6.3.3.1 MAQUETTE INOX

La première maquette d'adaptateur central a été mise en essai en MgCl₂ dans les conditions standard 24 h à 154°C.

Les examens par ressuage effectués après essai révèlent en peau interne la présence de nombreuses fissures longitudinales situées entre les cotes 90 et 105 mm de l'extrémité inférieure du tube (zone de déformation maximale), ainsi que de deux fissures circonférentielles de 10 mm de long respectivement aux cotes 148 et 153 mm (au-dessus de la soudure).

Aucune fissure débouchante en peau externe n'a été mise en évidence. L'examen micrographique sur coupes de ces fissures montre :

- que la profondeur maximale pour les fissures longitudinales est de 2,4 mm
- que la profondeur maximale relevée pour une des fissures circonférentielles est de 1,8 mm.

La localisation et l'orientation de ces fissures sont cohérentes d'une part avec les calculs élastoplastiques d'un tube d'adaptateur central, d'autre part avec les mesures de contraintes effectuées par la méthode du trou sur l'adaptateur central n° 1 d'un couvercle neuf.

Il est à noter que l'effet de dilatation différentielle entre le tube en acier inoxydable et le cimblot tend à diminuer le niveau des contraintes circonférentielles au-dessus de la soudure lors de l'essai, ce qui en rend l'interprétation délicate; de ce fait, le programme en MgCl₂ a été interrompu au profit des maquettes en inconel, plus représentatives.

6.3.3.2 MAQUETTES INCONEL

La réalisation des maquettes a démarré, les premières maquettes seront disponibles pour les essais en soude courant avril. Les premiers résultats devraient être disponibles courant juillet.

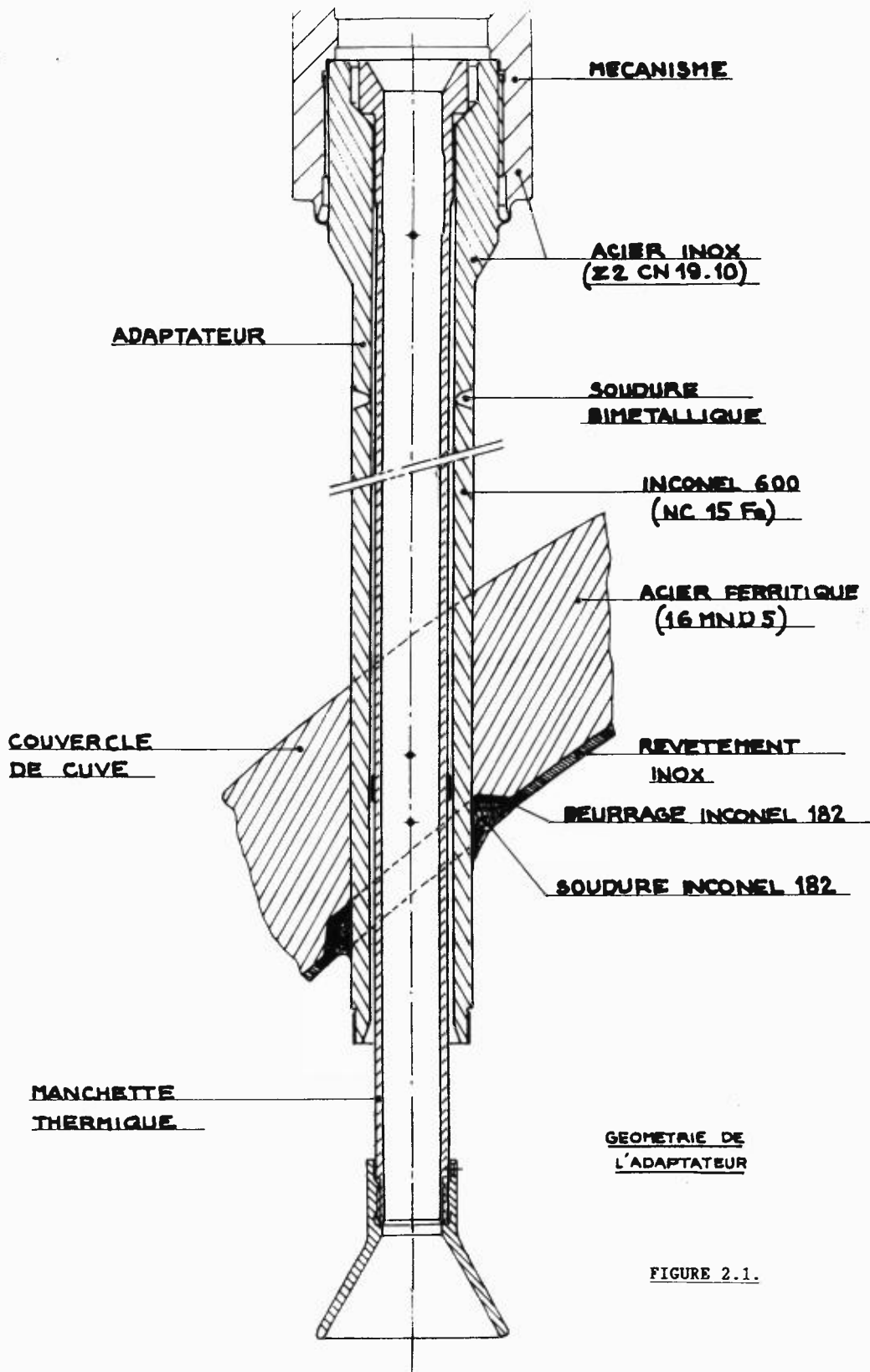
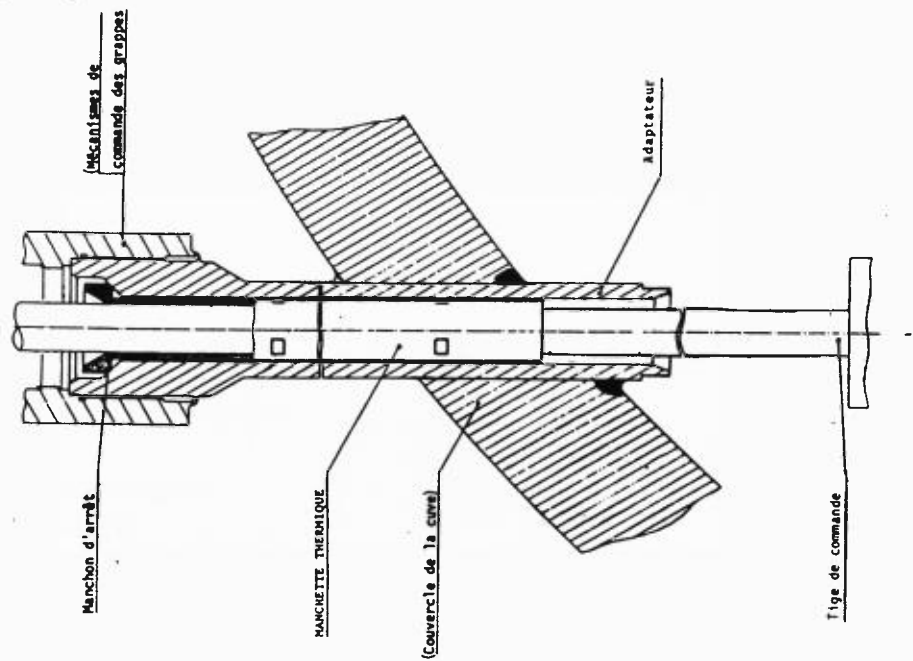
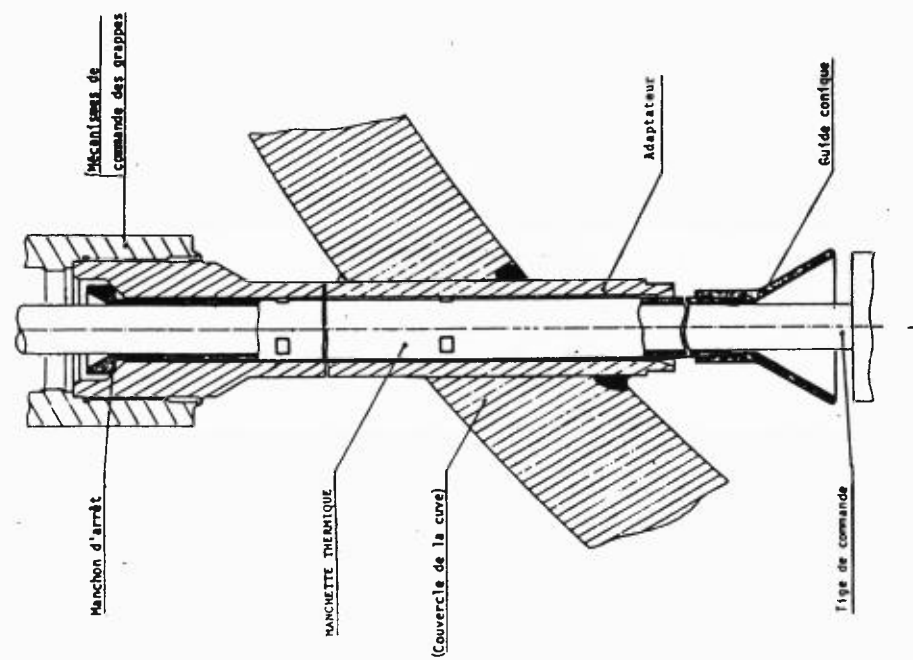


FIGURE 2.1.



ADAPTATEUR POUR MECANISME
GRAPPES PARTIELLES



ADAPTATEUR POUR MECANISMES
GRAPPES LONGUES

FIGURE 2.2.

6.4 SYNTHESE DES CONNAISSANCES ACQUISES INFLUENCE DES CONTRAINTES RESIDUELLES

L'ensemble des éléments disponibles à ce jour :

- résultats des contrôles non destructifs,
- des calculs mécaniques,
- des mesures de contraintes résiduelles,

montre que le phénomène, à l'origine des dégradations constatées sur les adaptateurs du palier CP0, est un phénomène générique de corrosion sous contrainte de l'alliage 600 en milieu primaire. Les contraintes résiduelles, dues à la réalisation de la soudure de résistance de l'adaptateur avec le couvercle de la cuve, qui ont été calculées, mesurées et qui se traduisent par d'importantes déformations résiduelles (ovalisation, flexion), permettent d'expliquer l'occurrence des fissures longitudinales décelées lors des contrôles non destructifs.

Les analyses destructives réalisées ou en cours de préparation (prélèvements sur l'adaptateur 65 de BUGEY 4, extraction de l'adaptateur 54 de BUGEY 3) permettront de conforter cette analyse et tenteront de la compléter dans de nombreux domaines. En particulier, le rôle éventuel de la fatigue thermique sur la propagation des défauts, estimée actuellement faible, pourra être cerné.

Il est à noter que la réplique, réalisée sur une indication décelée au contrôle par ressuage de la soudure de l'adaptateur 54 de BUGEY 3, n'a mis en évidence aucune corrosion du métal déposé, en alliage 182 non détensionné.

Les résultats des analyses élastiques et élastoplastiques des adaptateurs centraux et périphériques (du type du cercle XI) avec déformations imposées simulant le retrait après dépôt mettent en évidence les éléments suivants :

- les contraintes sont inférieures sur l'adaptateur central par rapport au périphérique,
- les contraintes longitudinales sont inférieures aux contraintes circonférentielles pour une configuration considérée.

Toutefois, la cohérence de ces études avec les profilométries réalisées sur des adaptateurs et avec la situation des défauts détectés, en terme de niveau d'ovalisation et de localisation des zones de contraintes maximales, est encore à affiner.

Les valeurs mesurées des contraintes résiduelles présentes en surface interne d'adaptateurs, central et périphériques, d'un couvercle neuf représentatifs en terme de fabrication de ceux du palier CP0, confirment et accentuent les tendances qualitatives précédemment citées des analyses par calcul et montrent le caractère conservatif des résultats.

L'analyse de nocivité réalisée sur la base des résultats obtenus par les calculs conclut à l'existence d'un risque d'occurrence de fissures longitudinales en particulier pour l'adaptateur périphérique.

Toutefois ces défauts ne peuvent conduire à une rupture brutale du fait d'une taille critique importante, induisant alors une propagation dans la zone frettée, propagation difficilement concevable.

De plus, si cependant le défaut atteignait la face externe du couvercle une fuite importante apparaîtrait avant le risque de rupture brutale.

Pour les adaptateurs centraux, compte tenu du niveau de contrainte moindre et des hypothèses sur les durées de vie à considérer pour les couvercles du palier CP0, ce type de défaut ne devrait présenter qu'une longueur et une propagation limitées.

Concernant le risque d'occurrence de défauts circonférentiels, eu égard à des niveaux de contrainte peu élevés obtenus et vérifiés lors des mesures sur adaptateurs, il apparaît faible pour l'adaptateur central. Dans le cas improbable d'un amorçage, la propagation d'un tel défaut serait limitée du fait de la présence de gradient de contraintes important dans l'épaisseur allant rapidement jusqu'à des valeurs de compression. Pour l'adaptateur périphérique, si le risque d'occurrence est plus élevé, l'amplitude d'un tel défaut serait faible et, dans les hypothèses de durée de vie considérées, sa propagation ne pourrait atteindre la taille importante du défaut critique (90% de la section).

L'ensemble de ces éléments devrait être confirmé par la campagne de fabrication et d'essais de maquettes en acier inoxydable et en inconel représentatives, en cours de réalisation (les résultats de la maquette adaptateur central en acier inoxydable testée confirment cette analyse).

Actuellement le seul élément discriminant les diverses fabrications (hors aspects matériaux) apparaît être le chambrage qui induit une faible augmentation des contraintes circonférentielles (+ 10 %), ce qui peut traduire, en terme de durée d'amorçage de défauts longitudinaux dans cette zone, une certaine différence de comportement des adaptateurs.

L'exploitation actuelle des résultats de profilométrie montre que la présence d'une ovalisation importante (>1,2 mm) est nécessaire mais non suffisante (absence de défauts pour des ovalisations de l'ordre de 2mm) pour l'apparition de défauts longitudinaux.

Les analyses de l'évolution du frettage de l'adaptateur dans le couvercle de cuve sous l'action des transitoires issus du dossier des situations rév F montrent que seule l'épreuve hydraulique à 20°C conduit à un défrettage total. Par ailleurs, 15 transitoires des conditions de 2ème catégorie conduisent à des défrettages supérieurs à la moitié de la hauteur de l'adaptateur,

de même que l'épreuve hydraulique à 80°C (type BUGEY 3). Toutefois ces analyses ont été réalisées sur les adaptateurs centraux où l'effet de la soudure est sensible. Sur les adaptateurs périphériques, du fait de la dissymétrie, cet effet est probablement moindre et donc les conditions de défretage devraient être plus favorables.

7 CONSEQUENCES SUR LA SURETE DE L'EXPLOITATION

7.1 SCENARIO A ETUDIER

Les contrôles effectués sur site ont mis en évidence au voisinage de la soudure des fissures longitudinales, ayant conduit sur une seule traversée à une fuite primaire, pendant l'épreuve décennale.

Ce constat a été confirmé par les analyses mécaniques exposées aux paragraphes précédents dont les conclusions ont validé :

1. que les contraintes circonférentielles sont supérieures aux contraintes longitudinales au voisinage de la soudure,
2. que la propagation axiale des fissures longitudinales est limitée,
3. qu'il n'y a aucun risque de fissure circonférentielle.

Dans ces conditions, le scénario de dégradation maximale en fonctionnement est celui d'un défaut longitudinal qui devient traversant et, ce faisant, génère une fuite.

Cette situation ne constitue pas un risque pour la sûreté de l'exploitation, sous réserve que :

- il n'y ait pas de perte d'intégrité (résistance) du couvercle par phénomène de corrosion de l'acier ferritique du couvercle par le fluide primaire,
- et donc que la fuite puisse être détectée par un des systèmes particuliers présentés en 8.2, avant de générer des dégradations mettant en cause la résistance du couvercle.

7.2 ANALYSE DE LA CORROSION POTENTIELLE DU COUVERCLE PAR LE FLUIDE PRIMAIRE

Le retour d'expérience américain d'une part, des essais de laboratoire d'autre part, ont mis en évidence le risque de corrosion généralisée de l'acier de la cuve par le fluide primaire dans certaines conditions (aération et concentration en acide borique du milieu).

L'importance de ce risque est fonction de la durée du contact fluide-acier :

- soit la fuite intervient lors d'un essai hydraulique tel qu'à BUGY 3, ou lors d'un essai d'étanchéité particulier : ce contact sera limité et sans conséquence,

- soit la fuite se révèle en fonctionnement :

- * si la fuite est importante (environ 10 l/h), le système de détection permettra une intervention rapide, sans conséquence pour l'acier du couvercle,
- * une fuite faible, restant confinée dans l'interstice d'un alésage pourrait induire un risque de corrosion; la vitesse de corrosion a été estimée à quelques microns par an-cf réf 2,
- * une fuite faible se déversant sur le couvercle peut entraîner une corrosion avec une vitesse estimée très conservativement à 50 mm/an (en fait, une telle fuite sera vraisemblablement détectée aussi, car les systèmes de détection maintenant disponibles ont un seuil de détection de l'ordre de un litre par heure).

7.3 CONSEQUENCES D'UNE HYPOTHETIQUE RUPTURE CIRCONFERENTIELLE

Compte tenu des faibles contraintes longitudinales évaluées dans les analyses mécaniques, le risque de voir se développer une fissure circonférentielle est quasi nul.

Néanmoins, pour une meilleure progressivité de la défense en profondeur, les conséquences d'une rupture guillotine postulée sur un adaptateur ont été analysées.

Les études ont porté sur :

- le comportement du missile créé et les dégradations qu'il peut générer,
- les conséquences des flux thermohydrauliques liés à la brèche,
- la détermination des temps d'arrêt d'urgence dans les différentes configurations possibles,
- la sensibilité de l'efficacité de l'arrêt d'urgence à plusieurs grappes bloquées hors du coeur.

Il ressort de ces travaux que les conséquences de l'éjection d'un adaptateur restent enveloppées par les études de conception du rapport de sûreté :

- pour l'ensemble des dégradations envisageables, les seuls accidents du rapport de sûreté impactés sont Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) et l'éjection de grappe,

- l'hypothèse de découplage des études APRP et d'éjection d'une grappe n'est pas remise en cause par la brèche créée dans le dôme par l'éjection d'un adaptateur,
- le transitoire d'APRP causé par la brèche dans le dôme est enveloppé par la brèche de même diamètre en branche froide présentée dans le rapport de sûreté, sous réserve de conservation de l'efficacité de l'AU,
- La ruine occasionnée par une rupture guillotine sur l'environnement (en dessous et au-dessus du couvercle) a été analysée pour tous les types de composants équipant le couvercle : adaptateur équipé de mécanisme avec ou sans grappe, adaptateur équipé de bouchon ou de colonne de thermocouple.

L'endommagement extrême a été recherché dans chaque cas, en terme de pénalités :

- sur l'arrêt d'urgence, par blocage de grappe de commande (par impact du missile) ou accroissement du temps de chute de grappe (par perturbation thermohydraulique),
- sur la conduite de la tranche, par perte d'instrumentation post-accidentelle .

Les endommagements maximaux ont été évalués de façon très pénalisante à :

- 3 grappes bloquées hors du coeur et à la perte de la mesure de niveau cuve pour un adaptateur éjecté non équipé de grappe.
Les conséquences de ce scénario sont équivalentes à celles d'un accident de brèche primaire (brèche initiale + rupture de l'évent) avec une efficacité d'arrêt d'urgence diminuée du poids de 3 grappes, suivi d'une perte de la mesure de niveau cuve.
- à la rupture de la tuyauterie d'évent et à la perte d'une colonne de thermocouple RIC pour un adaptateur équipé de grappe de commande.
Les conséquences de ce scénario sont équivalentes à celles d'un accident de brèche primaire (brèche initiale + rupture de l'évent) et d'éjection d'une grappe, suivis d'une perte de mesure de ce niveau cuve et d'une colonne de thermocouple.

Des études de sensibilité ont été réalisées sur les accidents d'éjection de grappes et d'APRP long terme.

Compte tenu de l'intervention des moyens de sauvegarde d'une part et des conservatismes des méthodes et codes du rapport de sûreté d'autre part, leurs conséquences restent compatibles avec le respect des critères de sûreté.

Par ailleurs, la décision d'installer des dispositifs anti-éjection sur les tranches CP0 conforte le fait qu'une rupture guillotine d'un adaptateur n'aura aucune conséquence sur la sûreté.

7.4 SYNTHESE

Sur la base du bilan des contrôles et des analyses mécaniques réalisées, les études de sûreté associées aux dispositions complémentaires décrites par ailleurs permettent de conclure que la sûreté des tranches CP0 n'est pas remise en cause.

8 DISPOSITIONS PARTICULIERES A COURT ET MOYEN TERMES POUR LE PALIER CP0

8.1 DETECTION DE FUITE EN FONCTIONNEMENT

8.1.1 GENERALITES

Plusieurs méthodes peuvent être avancées pour réaliser un système de surveillance en fonctionnement des fuites des traversées des couvercles de cuve, et notamment :

- l'utilisation de traceur,
- la détection acoustique,
- la mesure de températures locales.

Les qualités recherchées pour ce dispositif de surveillance :

- marche en continu avec une maintenance réduite,
- grande fiabilité du système,
- emploi simple par l'exploitant,
- mise en oeuvre celui-ci dans les délais les plus courts,

ont conduit à retenir la solution avec utilisation de traceur radioactif.

8.1.2 DESCRIPTION DU DISPOSITIF (synoptique 8.1)

Le principe consiste à faire un prélèvement gazeux au niveau du casing du couvercle, à exécuter une mesure d'activité β gaz sur ce prélèvement, à comparer cette mesure à l'activité β gaz de l'enceinte et à élaborer une alarme en cas d'écart.

8.2.2.1 Circuit aéraulique

Le circuit aéraulique se développe du casing à la zone annulaire niveau + 8,00 du B.R. dans un circuit aller-retour.

Le prélèvement de l'air au niveau du casing est effectué en 9 points répartis sur la surface de celui-ci.

L'air prélevé est acheminé vers une console de mesure au moyen d'un circuit hydraulique (pompe + tube) puis est retourné vers le casing en un point de rejet.

Le circuit retour comprend un piquage servant à l'injection d'un traceur pour validation de la mesure.

8.2.2.2 Console de mesure

La console de mesure se compose de :

- une platine de prélèvement,
- une console β gaz, elle-même constituée notamment d'une chambre d'ionisation CD 10 compensée, d'un coffret de raccordement CR 52 et d'un coffret électronique CM/CI 10,
- une motopompe y compris le coffret électrotechnique.

Ce matériel est installé en zone annulaire du BR au niveau 8,00 pour d'une part se garantir des rayonnements importants et d'autre part permettre une maintenance plus aisée grâce à la proximité du sas personnel.

L'intérêt de son installation dans le BR réside dans l'utilisation de traversées électriques de l'enceinte existantes et non pas de traversées mécaniques à définir.

8.2.2.3 Module de mesure

Il s'agit d'un ictomètre INR 200 situé dans les locaux électriques qui traite le signal de la console de mesure avant de l'envoyer vers un enregistreur qui fera la comparaison avec l'activité enceinte et élaborera une alarme.

8.1.3 PERFORMANCES ATTENDUES

Deux paramètres interviennent :

- l'activité du circuit primaire,
- l'interaction de la ventilation (RRM) des dispositifs de commande de barre sur le volume du casing, au travers des joints de calorifuge.

On estimait que la fuite détectable serait de 10 l/h environ sur la base d'une activité Σ gaz du circuit primaire de 4 GBq/m³; en fait, des essais réalisés sur la tranche 2 du BUGEY ont montré un seuil 5 à 6 fois supérieur.

C'est pourquoi, il a été décidé de mettre au point et de tester une nouvelle chaîne de mesure d'activité azote 13 : il est démontré que les performances de cette chaîne sont considérablement supérieures (le seuil de détection est diminué d'un facteur supérieur à 50 par rapport à la chaîne β gaz).

Par ailleurs, il a été décidé aussi de tester un dispositif de traçage basé sur la mesure d'hygrométrie de l'air du casing: ses performances sont du même ordre de grandeur que celles de la méthode N13 (seuil de détection de un litre par heure).

8.2 DISPOSITIFS ANTI-EJECTION

8.2.1 GENERALITES

En ce qui concerne les mécanismes de barres du CPO, les fonctions anti-sismique et anti-missile ont été prises en compte dès l'origine.

Par contre, la fonction anti-éjection n'avait pas été étudiée et donc pas mise en oeuvre.

Cette fonction anti-éjection a pour objet de limiter le déplacement axial des parties mobiles créées après une rupture brutale au-dessus de la soudure adaptateur-calotte, de manière à éviter un déboîtement en pied de l'adaptateur hors de la traversée.

8.2.2 DESCRIPTION DU DISPOSITIF (cf plans 8.2.2.1 et 8.2.2.2)

Les options techniques sont les suivantes:

- prolonger les équipements sur traversées jusqu'à une même cote de référence à chaud,
- offrir un plan d'appui sous la structure porteuse de la dalle anti-missile de manière à limiter le déplacement vertical.

Pour éviter tout couplage mécanique des deux aménagements cités plus haut, on a retenu le choix de leur indépendance ce qui garantit l'existant moyennant un renfort éventuel de l'ossature support de la dalle antimissile.

Comme l'efficacité du système en situation accidentelle repose sur son aptitude à garantir la stabilité de forme (pas de flambement lors de l'impact), on a été conduit à retenir la mise en place de dispositifs élastiques écrêtant l'effort dans le mobile de manière à obtenir des marges vis-à-vis de l'instabilité.

Le dispositif est donc constitué :

- d'un jeu de prolongateurs de mise à niveau en altitude (grappes courtes et traversées avec bouchons),
- d'un ensemble de butées avec amortisseurs, suspendues à une plaque de 130 mm d'épaisseur, elle-même solidaire du chevalet support de la dalle anti-missile.

Pour les traversées liées aux thermocouples, il a été préféré une solution de dispositif anti-envol par pontage sur les deux traversées voisines situées de part et d'autre.

Par ailleurs, pour éviter tout risque de détérioration des mécanismes lors des opérations de manutention, il a été décidé de monter les "butées/amortisseurs" une à une sur la plaque posée à niveau sur les trois chapes de manutention des couvercles.

8.2.3 PERFORMANCES ATTENDUES

Le réglage à froid du jeu entre tête de réseau et "butée/amortisseur" vise à obtenir un jeu à chaud de 25 mm environ.

Ce jeu à chaud ajouté au coulisement de la butée amortisseur limite le déplacement axial de l'adaptateur rompu à 50 mm, et donc garantit une protection pour tous les cas de rupture qui se développeraient au-dessus de la partie la plus haute de la soudure adaptateur-couvercle.

8.3 CONTROLES GENERIQUES EN ARRET POUR RECHARGEMENT

8.3.1 Configuration de contrôle

8.3.1.1 Adaptateurs non équipés de manchettes thermiques (MT)

C'est le cas des thermocouples et des réserves Pu.

Les techniques de contrôles réalisées télévisuel (ITV), courants de Foucault (CF) et ultrasons internes (US), seront à l'identique de la pratique actuelle et décrits au chapitre 4.

8.5.1.2 Adaptateurs équipés de leur MT

Plusieurs méthodes de contrôles développées ou en cours de développement pourraient être mises en oeuvre. Elles seront qualifiées sur des maquettes, voire des défauts réels.

Contrôle par ultrasons externe

Le palpeur est posé sur la partie dépassante de l'adaptateur. La seule méthode actuellement disponible met en oeuvre des palpeurs classiques et sera testée lors de la qualification au CETIC en cours.

Suivant le même principe, on pourrait être amené à utiliser des capteurs à focalisation électronique dont l'étude se poursuit actuellement.

Il est à noter que ces méthodes sont très bien adaptées pour détecter des fissures d'orientation circonférentielles.

Contrôle par courants de Foucault pulsés

EDF/DER continue son développement pour évaluer les performances de la méthode et pour la rendre plus industrielle quant à l'acquisition et au dépouillement. Elle a été testée avec succès sur l'adaptateur 54 de BUGEY 3.

Contrôle par courants de Foucault classique

Plusieurs sociétés développent des sondes CF adaptées au problème des adaptateurs équipés de leur MT. Les premiers résultats sur maquettes sont encourageants, mais nécessitent une optimisation de la sonde.

Dans le cas des méthodes CF (pulsés ou classiques) le contrôle est effectué, la sonde étant à l'intérieur de la MT.

Contrôle US et CF palpeurs entre manchette et adaptateur

Plusieurs sociétés développent des palpeurs "sabres" qui intrinsèquement donnent de bons résultats.

Leur phase d'industrialisation est en cours d'étude, et sera un peu plus longue pour intégrer la géométrie réelle de l'espace entre MT et adaptateur.

8.3.1.3 Adaptateurs équipés de MT ayant une lumière

Les études de faisabilité CND (Cf, US, ITV) sont en cours. Dans ce cas, on se rapprocherait (aux capteurs près) aux méthodes de contrôles sans MT.

8.3.1.4 Event

Les contrôles prévus sont là aussi ITV, CF et US. Les CF seront à l'identique de ce qui a été pratiqué (Chapitre 4). L'ITV et les US sont directement dérivés des techniques appliquées aux tubes de générateur de vapeur.

8.3.2 OUTILLAGES

Trois robots sont en cours de fabrication (deux par la société ACB et un par FRAMATOME) en FRANCE; par ailleurs, des sociétés étrangères développent aussi de tels outils (ABB Allemagne, WESTINGHOUSE,...).

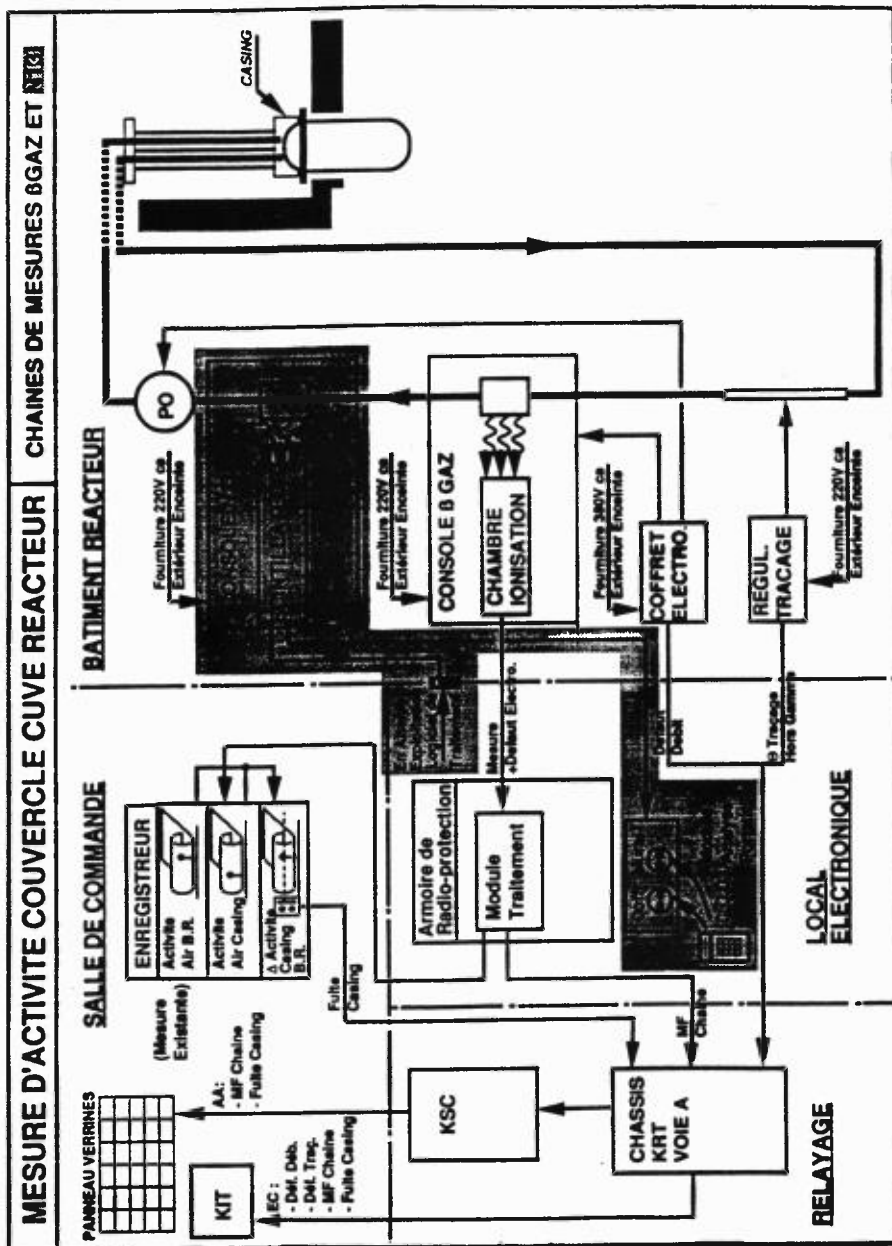
- La qualification du robot N° 1 d'ACB est en cours de finalisation.

- La qualification du robot N° 2 d'ACB et du robot de FRAMATOME est en cours.



NOTE DE FAISABILITE
DETECTION DE FUITE SUR LE COUVERCLE CUVE REACTEUR

SYNOPTIQUE 8.1



8.4 REPARATION PROVISOIRE D'UNE TRAVERSEE

Les interventions envisagées consistent à réparer un adaptateur présentant une ou des indications caractérisées par CND comme traversantes au dessus de la soudure. Les fissurations situées au voisinage de telles indications feront l'objet d'une réparation par affouillement et rechargement éventuel.

Cette intervention prévue normalement couvercle de cuve, partiellement déséquipé, entreposé en position "casque" sur son stand, se décompose selon les phases suivantes :

- élimination par coupe biaise de la partie inférieure de l'adaptateur,

- élimination des défauts par affouillement et acceptation en l'état en fonction des contrôles et de la profondeur atteinte,

- élimination par affouillement des défauts subsistants et rechargement "à froid" de la cavité en fonction des contrôles et de la profondeur.

Ce procédé doit être mis en oeuvre sur quatre adaptateurs du couvercle de BUGEY 4 en juin 92 (à noter toutefois que dans le cas d'espèce le couvercle a été complètement déséquipé et décontaminé).

La définition des limites géométriques des configurations correspondant aux 3 phases de réparation citées ci-dessus (dimension des affouillements et définition des profils à reconstituer) ont fait l'objet d'une justification.

9 SYNTHESE POUR LE PALIER CPO

Il résulte de ce qui précède que les dommages constatés sur certains adaptateurs des tranches de BUGEY 3 et 4 et de FESSENHEIM 1 ne remettent pas en cause la sûreté de fonctionnement du palier CPO, en particulier pour les raisons suivantes :

- improbabilité du développement axial des fissures longitudinales au delà de l'épaisseur de la calotte et impossibilité d'atteindre le défaut critique sans une fuite très importante qui sera détectée à coup sûr,
- très faible probabilité d'amorçage et quasi impossibilité d'un développement significatif d'éventuelles fissures circonférentielles- dont la taille critique est par ailleurs très importante.

Il subsiste néanmoins un risque résiduel - faible - de voir apparaître une fuite en fonctionnement, ce qui est potentiellement préjudiciable sur le plan de la disponibilité des tranches CP0.

C'est pourquoi, afin de limiter ce risque, on procèdera, dans l'attente du remplacement des couvercles à :

- la réparation des adaptateurs ayant des fissures traversantes au dessus de la soudure,
- la mise en place progressive de systèmes de détection de fuite performants,
- au contrôle des couvercles à l'aide d'un robot (contrôle global) ou limité aux traversées périphériques les plus potentiellement affectées dans l'attente de ces robots.

De plus, dans le cadre de la défense en profondeur, des dispositifs anti éjection seront mis en place à brève échéance sur toutes les tranches.

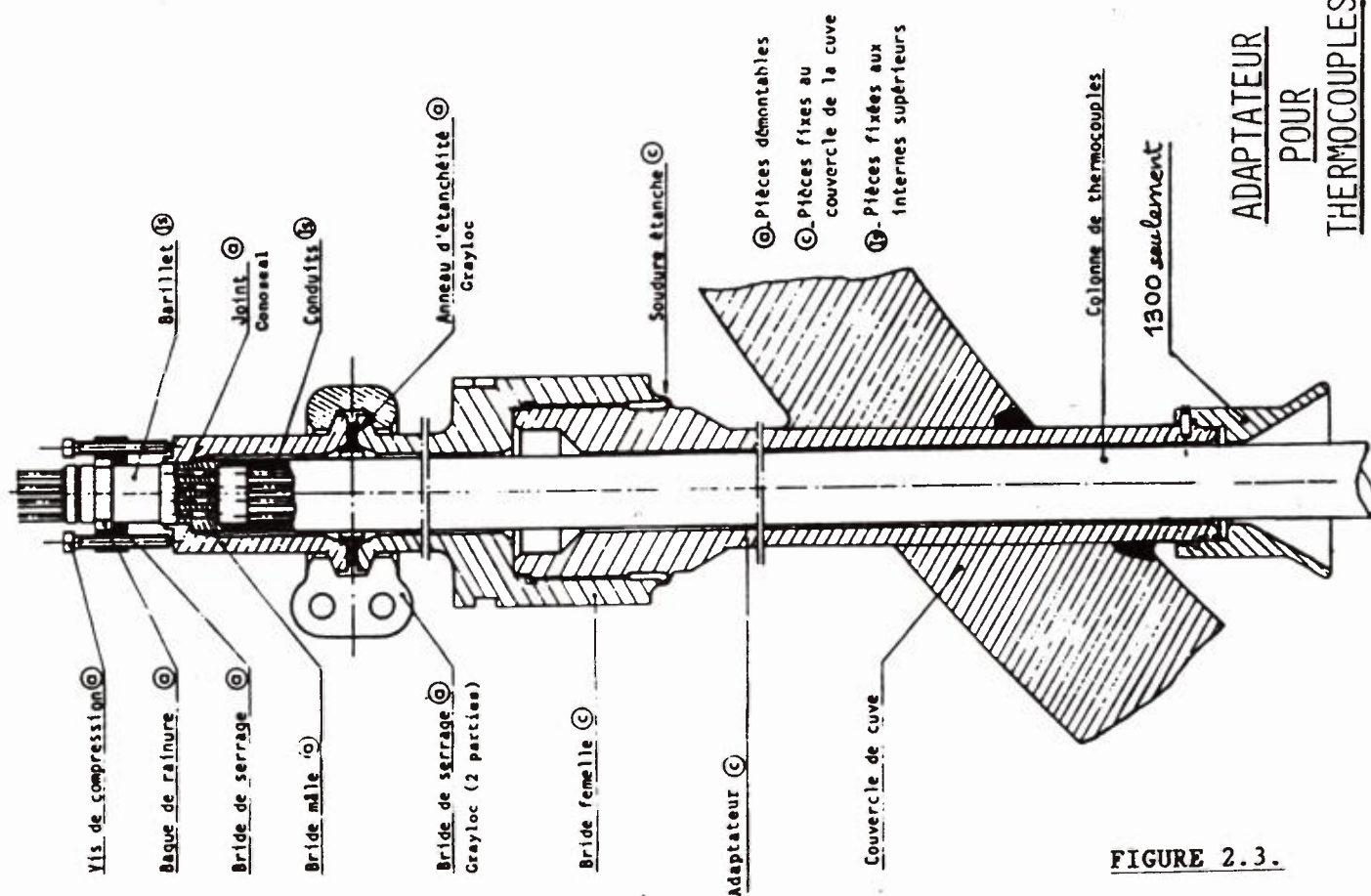
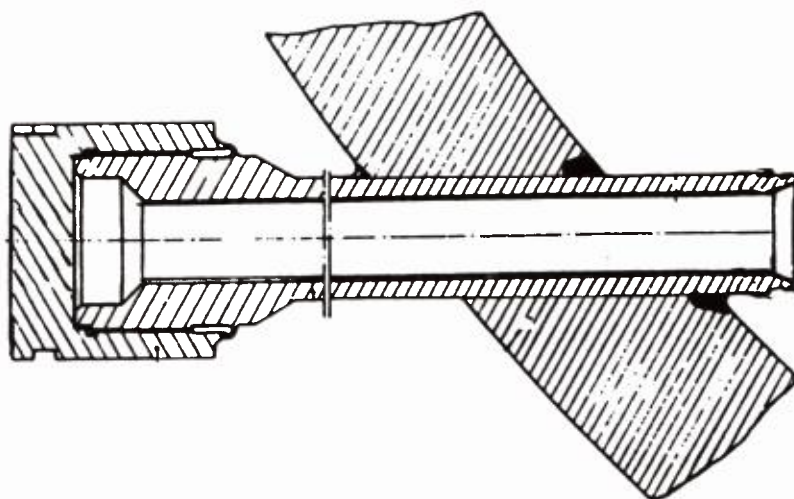


FIGURE 2.3.



ADAPTATEUR
POUR
RESERVE

ADAPTATEUR
POUR
THERMOCOUPLES

A		B		C		D		E		F		G		H		I		J		K		L		M		N		O		P		Q		R		S		T		U		V		W		X		Y		Z		AA		AB		AC		AD		AE		AF		AG		AH		AI		AJ		AK		AL		AM		AN		AO		AP		AQ		AR		AS		AT		AU		AV		AW		AX		AY		AZ		BA		BB		BC		BD		BE		BF		BG		BH		BI		BJ		BK		BL		BM		BN		BO		BP		BQ		BR		BS		BT		BU		BV		BW		BX		BY		BZ		CA		CB		CC		CD		CE		CF		CG		CH		CI		CJ		CK		CL		CM		CN		CO		CP		CQ		CR		CS		CT		CU		CV		CW		CX		CY		CZ		DA		DB		DC		DD		DE		DF		DG		DH		DI		DJ		DK		DL		DM		DN		DO		DP		DQ		DR		DS		DT		DU		DV		DW		DX		DY		DZ		EA		EB		EC		ED		EE		EF		EG		EH		EI		EJ		EK		EL		EM		EN		EO		EP		EQ		ER		ES		ET		EU		EV		EW		EX		EY		EZ		FA		FB		FC		FD		FE		FF		FG		FH		FI		FJ		FK		FL		FM		FN		FO		FP		FQ		FR		FS		FT		FU		FV		FW		FX		FY		FZ		GA		GB		GC		GD		GE		GF		GG		GH		GI		GJ		GK		GL		GM		GN		GO		GP		GQ		GR		GS		GT		GU		GV		GW		GX		GY		GZ		HA		HB		HC		HD		HE		HF		HG		HH		HI		HJ		HK		HL		HM		HN		HO		HP		HQ		HR		HS		HT		HU		HV		HW		HX		HY		HZ		IA		IB		IC		ID		IE		IF		IG		IH		II		IJ		IK		IL		IM		IN		IO		IP		IQ		IR		IS		IT		IU		IV		IW		IX		IY		IZ		JA		JB		JC		JD		JE		JF		JG		JH		JI		JJ		JK		JL		JM		JN		JO		JP		JQ		JR		JS		JT		JU		JV		JW		JX		JY		JZ		KA		KB		KC		KD		KE		KF		KG		KH		KI		KJ		KK		KL		KM		KN		KO		KP		KQ		KR		KS		KT		KU		KV		KW		KX		KY		KZ		LA		LB		LC		LD		LE		LF		LG		LH		LI		LJ		LK		LL		LM		LN		LO		LP		LQ		LR		LS		LT		LU		LV		LW		LX		LY		LZ		MA		MB		MC		MD		ME		MF		MG		MH		MI		MJ		MK		ML		MM		MN		MO		MP		MQ		MR		MS		MT		MU		MV		MW		MX		MY		MZ		NA		NB		NC		ND		NE		NF		NG		NH		NI		NJ		NK		NL		NM		NN		NO		NP		NQ		NR		NS		NT		NU		NV		NW		NX		NY		NZ		OA		OB		OC		OD		OE		OF		OG		OH		OI		OJ		OK		OL</	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	------	--

Figure 8.2.2.1

