

LA FISSURATION SOUS REVÊTEMENT DES PLAQUES TUBULAIRES DE GÉNÉRATEUR DE VAPEUR ET DES TUBULURES DE CUVE DES CHAUDIÈRES NUCLÉAIRES A EAU

I. - DONNÉES DE BASE

LA FISSURATION A FROID

Les appareils des chaudières nucléaires à eau sous pression, réalisés en acier faiblement allié, sont revêtus intérieurement d'alliage inoxydable déposé par soudage. Ce revêtement est destiné à éviter la corrosion par l'eau du circuit primaire de l'acier faiblement allié.

L'apparition, à la suite de cette opération de soudage, de fissures dans le métal de base a été constatée sur des plaques tubulaires de générateurs de vapeur et des tubulures de cuve.

• La fissuration à froid est un phénomène complexe, son apparition dépend de nombreux paramètres, aussi nous n'en ferons ici qu'une analyse succincte.

• Les fissures peuvent prendre naissance dans la zone affectée par la chaleur du métal de base à des températures de l'ordre de 200 °C lors du refroidissement consécutif à l'opération de soudage, ou même quelque temps après. C'est la « fissuration à froid ».

• Ce phénomène, appelé aussi par les métallurgistes « fissuration due à l'hydrogène », nécessite pour se produire dans la zone du métal de base affectée par la chaleur due à l'opération de soudage, la combinaison défavorable de trois facteurs :

- présence d'hydrogène ;
- existence de certains sites présentant une structure métallique sensible ;
- présence de contraintes résiduelles ou créées par l'opération de soudage.

Hydrogène. - Au cours des opérations industrielles de soudage, il est impossible d'éliminer totalement l'hydrogène introduit par le soudage. Cet hydrogène provient essentiellement de l'humidité des produits d'apport. Les précautions prises : choix et qualité des produits d'apport, étuvage de ces derniers, minimisent les quantités d'hydrogène dissous.

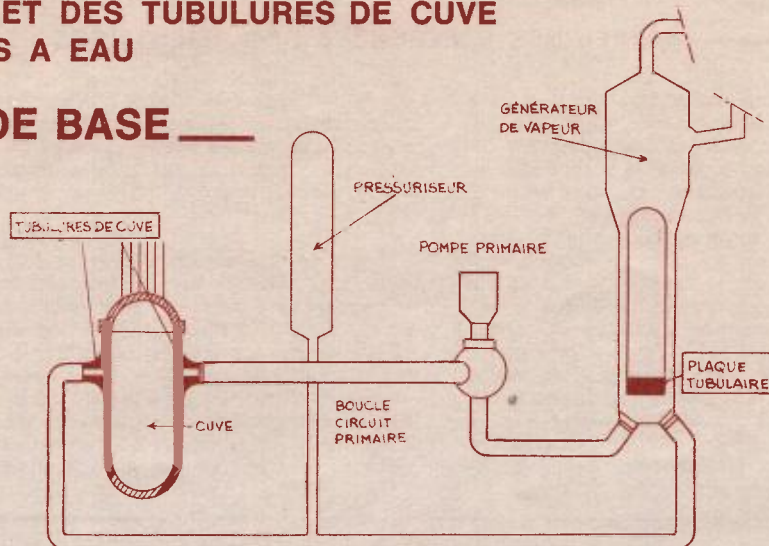
Structure sensible. - La structure sensible est déterminée par les caractéristiques de structures (inclusions, fibres de laminage, etc.) du métal de base, sa composition chimique et les paramètres de soudage utilisés.

Contraintes. - Il s'agit :

- des contraintes internes tri-axiales résultant de la transformation de l'austénite ;
- des contraintes locales (l'hétérogénéité des transformations) ;
- des contraintes de « retrait de soudage » (bridage).

L'un des facteurs importants de la fissuration à froid est le moment précis où ces contraintes se développent.

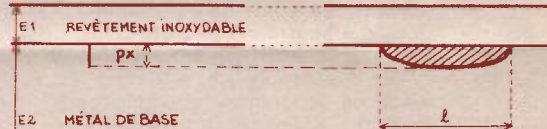
Le phénomène de fissuration à froid peut être minimisé par un préchauffage ou/et un post-chauffage. En effet, on peut imaginer que si des contraintes ont tendance à se manifester dans le métal de base au cours du préchauffage ou/et du post-chauffage de ce dernier, l'élévation de température qui favorise la diffusion de l'hydrogène minimise sa fixation et sa migration vers les fonds d'entaille et les micro-défauts de la structure du métal.



Chaudière nucléaire à eau pressurisée
Schéma du circuit primaire

REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE D'UNE FISSURE

Vues en coupe, dans sa plus grande longueur et dans un plan perpendiculaire, d'une fissure dans une pièce.



La pièce

E₁ : épaisseur du revêtement inoxydable : 7,5 mm pour les tubulures ; épaisseur du revêtement inconel : 7 à 12 mm pour les plaques tubulaires.

E₂ : épaisseur du métal de base : de l'ordre de 300 mm pour les tubulures ; de l'ordre de 500 mm pour les plaques.

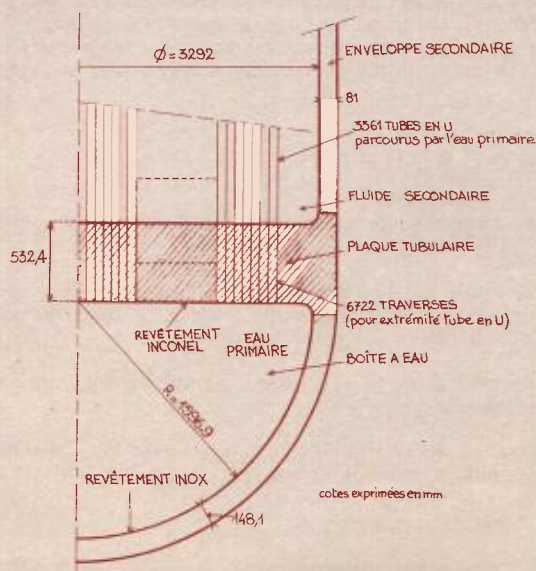
Une fissure	Plaque mm	Tubulure mm
Epaisseur : quasi nulle		
p. profondeur :		
en moyenne	4 à 5	2 à 3
au maximum	13	7
L. longueur : moyenne	20	10 à 12

Nombre de fissures

Très variable, de 0 à plusieurs dizaines par pièce.

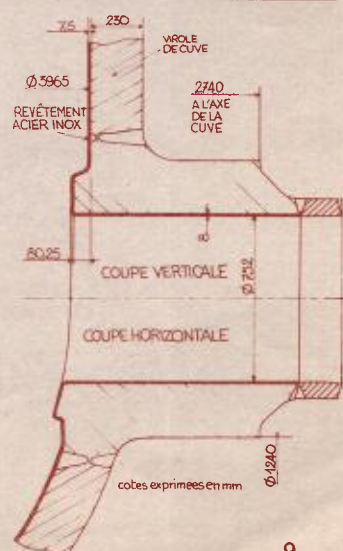
PLAQUE TUBULAIRE DE GÉNÉRATEUR DE VAPEUR

C'est une plaque épaisse qui sépare la « boîte à eau » du générateur de vapeur par laquelle entre et sort l'eau primaire de la zone où l'eau secondaire s'échauffe au contact des 3361 tubes en U parcourus par l'eau primaire. Cette plaque est traversée par les deux extrémités de chaque tube en U, elle est donc percée de 6722 trous. Elle est recouverte d'inconel sur la face en contact avec l'eau primaire.



TUBULURE DE CUVE

Les tubulures de cuve sont des pièces servant au raccordement des tuyauteries de trois boucles primaires à la cuve du réacteur. On distingue les tubulures « froides » G servant à l'arrivée de l'eau dans le réacteur et les tubulures chaudes H pour la sortie de l'eau. Les tubulures sont revêtues intérieurement d'acier inoxydable.



II. - HISTORIQUE DES EXAMENS TECHNIQUES ET ADMINISTRATIFS

RAPPEL DES RÉFÉRENCES RÉGLEMENTAIRES ET DES PROCÉDURES

1° En application du décret modifié du 11 décembre 1963, relatif aux installations nucléaires, toute centrale est étudiée sur la base des rapports de sûretés successifs, correspondant à différents stades de projet, de réalisation, de mise en service. Ces documents, élaborés par l'exploitant, sont examinés par le service central de sûreté des installations nucléaires et son appui technique. L'analyse de sûreté faite sur la base de ces documents par l'I.P.S.N. est présentée à un groupe d'experts, le « groupe permanent chargé des réacteurs », qui émet avis et recommandations. Au vu de cette instruction, le ministre de l'Industrie ac-

corde à l'exploitant des autorisations successives, correspondant aux différents stades d'avancement évoqués ci-dessus, et assorties des prescriptions jugées nécessaires.

2° En application du décret modifié du 2 avril 1926, portant règlement sur les appareils à pression de vapeur, et de l'arrêté du 26 février 1974 relatif au circuit primaire principal des chaudières nucléaires à eau, la direction interdépartementale de l'industrie de Bourgogne - Franche-Comté (bureau de contrôle de la construction nucléaire) examine la conception et la réalisation

de la chaudière, qui sera ensuite suivie en fonctionnement par la direction interdépartementale de l'industrie territorialement compétente. Les conclusions de l'analyse menée par le bureau de contrôle de la construction nucléaire sont soumises à un groupe d'experts, la « section permanente nucléaire de la commission centrale des appareils à pression » qui émet un avis. Au vu de cette instruction, le ministre de l'Industrie prend une décision assortie des prescriptions jugées nécessaires. Un procès-verbal d'épreuve finale du circuit primaire est délivré au constructeur de la chaudière (Framatome).

LES PLAQUES TUBULAIRES

Juin 1978 : La découverte de défauts sur deux plaques est portée à la connaissance du bureau de contrôle de la construction nucléaire de la Direction interdépartementale de l'industrie de Bourgogne - Franche-Comté, tandis que le constructeur en recherche les causes et s'attache à mettre au point une méthode de contrôle adaptée.

Novembre 1978 : Le phénomène de fissuration est identifié par le constructeur (fissuration à froid) et des mesures correctives sont prises pour les nouvelles fabrications ; la méthode de contrôle est qualifiée pour les plaques non percées. Le constructeur recherche la population de plaques qui pourraient être affectées, une dizaine de plaques antérieures ayant vu leur revêtement enlevé en 1976 sans qu'aucune fissure ne soit mise en évidence dessous. Il lance un programme d'expérimentation et de calcul permettant d'apprécier la nocivité des défauts existants.

Avril 1979 : Les résultats des premiers calculs concluent à l'innocuité des défauts.

Mal 1979 : Le dossier de synthèse des expertises est remis par le constructeur : toutes les plaques revêtues côté tête du lingot selon les conditions en vigueur avant la découverte du phénomène, sont affectées.

LES TUBULURES DE CUVE

Décembre 1978 : Découverte de défauts isolés sur une tubulure de sortie de cuve qui est rebutée.

Janvier 1979 : Cette découverte est portée à la connaissance du bureau de contrôle de la construction nucléaire de la Direction interdépartementale de l'industrie Bourgogne - Franche-Comté, tandis que le constructeur en recherche les causes et s'attache à mettre au point une méthode de contrôle adaptée.

Juin 1979 : Le phénomène est identifié (fissuration à froid) et n'affecterait que les tubulures de sortie à partir de la cinquième cuve du contrat programme pluri-annuel 1, des mesures correctives sont prises pour les nouvelles fabrications, la méthode de contrôle mise au point est appliquée aux autres pièces recouvertes d'acier inoxydable. Le constructeur lance des calculs pour évaluer la nocivité des défauts.

Juillet 1979 : Les résultats des premiers calculs effectués concluent à l'innocuité des défauts connus à cette date.

Août 1979 : La fissuration affecte également les tubulures d'entrée G et les tubulures de sortie H des cuves qui précèdent la cinquième tranche du contrat pluri-annuel 1.

Cependant, à la demande du Bureau de contrôle de la construction nucléaire, Framatome engage de nouveaux calculs, sur des bases volontairement pessimistes, afin de conforter les assurances en matière de sûreté.

Septembre 1979 : Avec ces nouvelles hypothèses très pessimistes, Framatome ne peut conclure à l'innocuité du défaut maximum que pour une durée de fonctionnement limitée. Sous le contrôle des autorités de sûreté, le constructeur et l'exploitant mettent au point un programme d'action sur les méthodes de contrôle et de réparation en prolongement des travaux déjà engagés.

PROCÉDURES

24 août 1979 : Information de la section permanente nucléaire de la Commission centrale des appareils à pression.

13 septembre 1979 : Examen de l'ensemble du dossier relatif au chargement, par le groupe permanent chargé des réacteurs, qui émet un avis favorable, sous réserve de l'avis de la section permanente nucléaire pour ce qui concerne le problème des fissures.

25 septembre 1979 : Examen et avis favorable de la section permanente nucléaire de la Commission centrale des appareils à pression.

1^{er} octobre 1979 : Décisions d'autorisation de chargement des premières tranches des centrales nucléaires de Tricastin et de Gravelines, et notification de ces décisions à Electricité de France.

III. - LE POINT DES CONCLUSIONS TECHNIQUES

LES CAUSES D'APPARITION DE FISSURES ET LES ACTIONS ENTREPRISES POUR LES SUPPRIMER

Lors de la qualification des matériaux et des procédés, le problème de la fissuration à froid avait été pris en compte et avait fait l'objet d'études et d'essais. Sur la base des résultats obtenus, le constructeur avait cru pouvoir conclure à l'absence de risque d'une telle fissuration. La remise en cause à posteriori de ces conclusions illustre la difficulté extrême d'interprétation de tels phénomènes, liés à un nombre important de paramètres qui doivent se combiner de façon défavorable pour produire le phénomène.

LES PLAQUES

Pour les plaques, les interprétations et les solutions font appel à deux ensembles de considérations.

1. La sensibilité du métal de base de ces pièces à la fissuration à froid.

La fissuration a été surtout rencontrée sur les plaques revêtues côté « tête » du lingot d'acier dont elles étaient issues. En outre, on a remarqué la présence dans le métal de base de zones ségrégées.

Une première mesure a donc consisté à spécifier que le côté à revêtir devait obligatoirement correspondre au côté « pied » du lingot de départ, de manière à éviter de revêtir sur les zones ségrégées.

2. Les précautions prises lors du revêtement par soudage.

Le revêtement se fait par soudage (feuillard en zone courante, électrode enrobée en zone arrondie) en un nombre suffisant de couches pour atteindre l'épaisseur requise compte tenu de l'usinage ultérieur (trois couches en zone courante). La première passe de revêtement a toujours fait l'objet d'un préchauffage et d'un postchauffage, les couches suivantes ne faisaient pas l'objet de telles précautions, jugées superflues.

Une deuxième mesure a donc consisté à prévoir des opérations de pré et postchauffage pour ces couches, avec des températures soigneusement choisies.

La mise en œuvre de ces deux mesures à la fois donne toutes garanties pour les fabrications en cours.

LES TUBULURES

Dans le cas des tubulures :

1. L'interprétation de la sensibilité du métal de base de ces pièces à la fissuration à froid, a mis en évidence l'importance de leur géométrie et de certains paramètres sur lesquels les études se poursuivent.

2. Les précautions prises lors du revêtement par soudage.

L'analyse faite pour les plaques tubulaires est transposable au cas des tubulures : l'épaisseur requise, de l'ordre de 7,5 mm, est réalisée en deux ou trois couches. Les précautions de pré et postchauffage, qui n'étaient appliquées antérieurement qu'à la première couche, le sont aussi aux autres couches.

Le processus de fabrication ainsi défini assure l'absence de défaut sur les fabrications en cours.

L'ÉVALUATION DE LA NOCIVITÉ DES FISSURES

LA MÉCANIQUE DE LA RUPTURE

La mécanique de la rupture est une branche particulière de cette science de l'ingénieur que l'on nomme « mécanique des milieux continus », l'objet de cette dernière est d'une part, de calculer les contraintes et les déformations qui prennent naissance dans un appareil sous l'action des sollicitations auxquelles il doit résister sa vie durant, et d'autre part de déterminer, si le matériau constitutif de l'appareil peut supporter ces contraintes et ces déformations sans subir de dégradations pouvant compromettre la sécurité de l'appareil en exploitation.

La mécanique de la rupture est née du constat qu'il est impossible d'empêcher qu'il existe des « défauts » dans les constructions quelles qu'elles soient, et que ces « défauts » peuvent faciliter le développement de fissures : il faut donc connaître l'évolution des fissures au cours des sollicitations vécues par l'appareil et s'assurer que ces fissures restent stables pendant toute la durée de la vie de l'appareil. C'est-à-dire ne traversent pas la paroi, ce qui donnerait lieu à une fuite, ou à une rupture. L'étude, et la prévision, de l'évolution des fissures et de leur stabilité font l'objet de la mécanique

de la rupture. Ce constat s'est affirmé au fur et à mesure que progressaient les moyens d'investigations de la structure intime des matériaux, les moyens de contrôle non destructifs industriels des pièces et les connaissances des mécanismes d'endommagement des matériaux.

La mécanique de la rupture étudie depuis 1920 les propriétés des contraintes et des déformations au voisinage immédiat du front de la fissure, ainsi que la résistance du matériau à la progression de la fissure.

Elle a connu un grand développement et a fait de rapides progrès après 1945.

Les divers matériaux peuvent grâce à la mécanique de la rupture, être caractérisés du point de vue de leur aptitude à résister à la croissance des fissures et à assurer leur stabilité, et être ainsi classés les uns par rapport aux autres par « tenacité » croissante.

D'abord développée pour les matériaux très fragiles qui étaient les plus concernés, la mécanique de la rupture s'applique maintenant au domaine des aciers très ductiles et très « tenaces » du type de ceux utilisés dans les chaudières nucléaires.

A quelques nuances près, la même analyse peut concerner les plaques et les tubulures ; il convient d'explicitier en premier lieu les hypothèses prises en compte dans les calculs :

— La population des défauts est statistiquement bien connue, grâce aux réparations effectuées en usine. Les calculs ont porté sur des défauts-type de taille supérieure au plus grand des défauts jamais rencontré dans la pièce ou partie de pièce concernée ;

— Les sollicitations auxquelles est soumise la zone d'un défaut ont été systématiquement appréciées de façon très pessimiste en supposant notamment que la charge de la centrale soit modifiée de 15 à 100 % et retour, une fois par jour ;

— La loi empirique permettant d'apporter la certitude que l'évolution réelle sera plus lente que celle décrite par

le calcul a été choisie de façon pessimiste par rapport à de nombreux résultats expérimentaux. Comme l'a rappelé le bref historique présenté ci-dessus, les premiers calculs du constructeur sur les plaques (fait avec une loi dite « représentative ») conduisaient à l'innocuité des défauts rencontrés pour la durée de vie des centrales ; mais, pour atteindre une approche de sûreté parfaitement rigoureuse, le constructeur, en liaison avec le bureau de contrôle de la construction nucléaire, a décidé de poursuivre les calculs avec une loi dite « loi sûre », apportant une garantie absolue de pessimisme. On peut donc avoir la certitude que l'évolution réelle sera plus lente que celle décrite par le calcul. Un programme expérimental en cours en apportera une confirmation complémentaire.

Les résultats obtenus par ce calcul très conservatif sont les suivants :

1. Le défaut-type, majorant des défauts existants, n'évolue pas de façon significative au cours de la durée de vie d'une centrale, dans la plupart des zones concernées par le phénomène de fissuration.

2. Dans certaines zones, cependant, le calcul montre une évolution non négligeable du défaut. L'indicateur utilisé est le temps déterminé par calcul, au bout duquel le défaut perce le revêtement inoxydable ; même à ce stade, le défaut n'induit toujours aucun risque pour l'intégrité du circuit primaire à court ou moyen terme, car il faudrait encore plusieurs années d'évolution de la fissure dans le métal de base avant que le défaut n'atteigne une taille critique.

Ainsi, pour les plaques, un défaut de 15 mm de profondeur en zone centrale traverse le revêtement entre 8 et 10 ans, selon le calcul. Il faut entre 6 et 8 ans pour que les fissures en périphérie traversent le revêtement. Il s'agit là de temps minimaux pour les défauts majorants placés dans les positions les plus pénalisantes.

Pour les tubulures, l'évolution la plus importante est pour l'arrondi de raccordement avec la virole de cuve de la tubulure de sortie et de la partie cylindrique à proximité immédiate de cet arrondi. Le défaut, majoré de 7 mm de profondeur, perce le revêtement au bout de 6 à 8 ans.

3. Ces résultats sont intéressants et utilisables au plan de la sûreté puisqu'ils apportent une garantie de non-évolution significative dans un délai inférieur au résultat du calcul. Ils ont donc été pris en compte comme seule base de raisonnement dans les éléments de décisions relatives à la sûreté.

Par contre, ces résultats risquent d'induire une perception erronée des problèmes pour des décisions d'une autre nature (économique, par exemple). Leur niveau de conservatisme, difficile à évaluer, mais sans doute considérable, les rend inadaptés à une appréciation du délai vraisemblable d'évolution des défauts. Compte tenu du grand pessimisme des calculs, il n'apparaît pas déraisonnable de penser que les défauts existants n'évolueront pas de façon significative pendant toute la durée de vie des centrales.

LES TECHNIQUES DE CONTROLE ET DE RÉPARATION

Les contrôles

Framatome a d'ores et déjà développé des méthodes de contrôle particulières, capables de détecter des défauts de type fissure sous les revêtements, tant des plaques que des tubulures. Au-delà des contrôles manuels actuellement disponibles et qualifiés, des travaux complémentaires restent cependant à effectuer :

- pour rendre ces méthodes opérationnelles sur toutes les zones à surveiller ;
- pour adapter des automates à l'exécution de ces contrôles en milieu irradié.

LES PLAQUES

Pour les plaques, la technique retenue consiste à utiliser un appareil de contrôle par courants de Foucault à sonde tournante placée à l'intérieur des tubes.

En intervention automatique, un tel appareillage pourra être monté sur le type de machine déjà utilisée pour déplacer sur les plaques les sondes de contrôle des tubes de générateur de vapeur.

Le principe est donc défini et la mise au point très avancée. L'ensemble sera opérationnel début 1980.

LES TUBULURES

Pour les parties cylindriques et coniques à faible pente des tubulures (c'est-à-dire toutes les parties exemptes de fortes courbures), les développements de la méthode retenue consistent à utiliser un transducteur d'ultrasons focalisé travaillant sous immersion, le déplacement du palpeur étant effectué à l'aide d'un bras mécanique. Elle est pratiquement opérationnelle en usine. Elle doit être opérationnelle sur le site vers avril 1980.

Pour les parties arrondies des tubulures d'entrée (dite « G »), la méthode retenue consiste à utiliser la technique par ultrasons en onde longitudinale inclinée à 70°, avec semelles d'adaptation permettant d'explorer la surface concernée. Elle est opérationnelle manuellement en usine et sur site.

Enfin, une méthode capable de détecter les fissurations sous revêtement dans les zones de géométrie complexe (en particulier la partie arrondie des tubulures de sortie dites « H ») est mise au point ; elle repose sur la technique des courants de Foucault et sa qualification est en cours. Sa version manuelle devrait être disponible au mois de mai 1980 et sa version automatique à la fin 1980.

En attendant sa mise en service, les expertises sont faites par enlèvement et réfection du revêtement inoxydable.

Il résulte de l'exposé technique qui précède que le constructeur et l'exploitant disposeront, dans un délai inférieur à 6 mois, d'un ensemble satisfaisant de moyens d'investigations et de contrôle, tant en usine que sur site, y compris en milieu irradié.

Il convient de noter, par ailleurs, que Framatome mène un important programme de contrôle sur d'autres pièces revêtues d'acier inoxydable : viroles de cuve, brides de cuve, fonds de générateur de vapeur, afin de vérifier que celles-ci ne sont pas aussi affectées par des phénomènes de fissuration similaires. Les résultats actuels semblent conduire à la confirmation de cette hypothèse.

Les réparations

Les éléments en usine ou en cours de montage sur site, produits avant la mise en œuvre des mesures correctives de fabrication, font et feront l'objet de réparations à court terme, pour tous les défauts susceptibles de la moindre évolution notable. Les problèmes techniques associés à ces réparations en usine sont résolus. Pour les réparations en cours de montage sur site, le constructeur prend ses dispositions pour mettre au point cette méthode dans un délai inférieur à six mois.

Framatome et Electricité de France développent par ailleurs des méthodes particulières, permettant de procéder aux éventuelles réparations qui apparaîtraient nécessaires au cours de la vie de la centrale. Ces différentes méthodes doivent être opérationnelles dans un délai variant de 6 mois à 2 ans.

SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Il convient de récapituler les points suivants :

- Le processus de fabrication ayant été modifié, il n'existe plus de phénomène de fissuration dans les fabrications en cours, concernant le contrat pluri-annuel 1 à partir de la 21^e tranche.
- Les appareils en usine ou en montage sur site seront réparés.
- Pour les tranches en fonctionnement, ou sur le point d'être mises en fonctionnement :
 - des calculs très conservatifs à partir d'hypothèses très pessimistes prouvent qu'aucune évolution significative des défauts ne peut intervenir avant plusieurs années ;
 - un ensemble satisfaisant de méthodes de contrôle existe

dès maintenant et pourra permettre à terme rapproché un suivi rigoureux en exploitation ;

- des méthodes sont développées pour permettre, en tant que de besoin, des réparations. La possibilité de telles réparations doit être prise en compte au niveau de la sûreté, même s'il n'est pas certain qu'elles s'avèrent un jour nécessaire.

Il est donc clair que, du point de vue de la sûreté, le fonctionnement des tranches en service et la mise en activité des tranches en voie d'achèvement ne fait courir aucun risque aux travailleurs et aux populations.

Dans le suivi des tranches en fonctionnement, les décisions relatives à la sûreté seront prises avec toute la rigueur nécessaire et seront toujours prioritaires.