

## Note d'information

### Intégrité des cuves des réacteurs électronucléaires à eau sous pression

#### Cas des cuves des réacteurs français

Lors de contrôles par ultrasons de la cuve du réacteur n° 3 de la centrale belge de Doel, réalisés à l'occasion de la visite décennale, des défauts ont été détectés en grand nombre dans la partie cylindrique de la cuve. Le réacteur est actuellement à l'arrêt pour des études complémentaires et son redémarrage reste soumis à l'autorisation de l'autorité de sûreté belge.

La présente note a pour objet d'expliciter les éléments relatifs à la conception, à la fabrication et au contrôle en exploitation des cuves des réacteurs du parc électronucléaire français, en particulier pour ce qui concerne les viroles de cuve.

#### Principales caractéristiques de conception, de fabrication et de contrôle des cuves des réacteurs nucléaires français

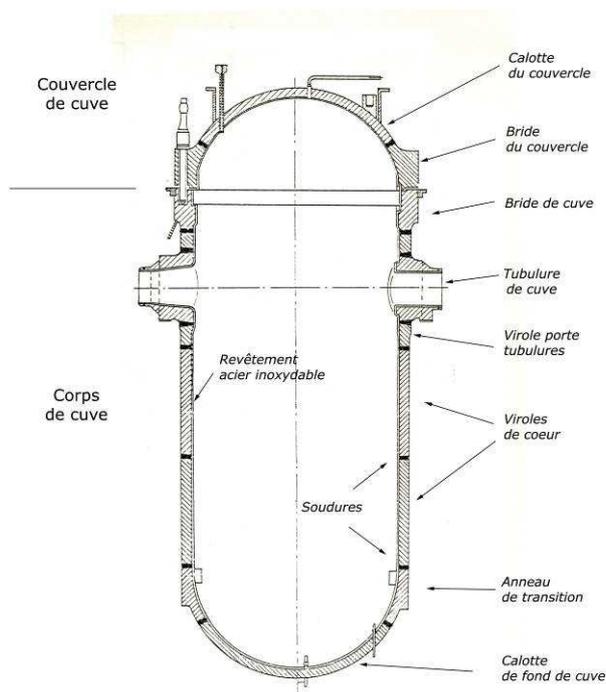
Dans les 58 centrales électronucléaires à eau sous pression en exploitation du parc français, la cuve est un gros composant en acier qui contient le cœur nucléaire du réacteur. Le cœur du réacteur est refroidi par l'eau du circuit primaire dont la pression est égale à 155 fois la pression atmosphérique. Cette eau entre dans la cuve à une température de l'ordre de 290 °C et en ressort à environ 325 °C en évacuant l'énergie thermique produite dans le cœur. La cuve d'un réacteur à eau sous pression (REP) est donc soumise aux conditions de pression et de température du circuit primaire, ainsi qu'à l'irradiation neutronique engendrée par les réactions nucléaires qui se produisent dans le cœur. Cette irradiation concerne principalement les parties cylindriques (viroles) de la cuve situées au droit du cœur.

La cuve constitue une partie de la deuxième barrière de confinement des éléments radioactifs (la première est la gaine des assemblages combustibles et la troisième l'enceinte de confinement) et son rôle pour la sûreté de l'installation est primordial. Son intégrité doit être assurée et justifiée dans toutes les situations de fonctionnement du réacteur et pour toute la durée de son exploitation. La cuve du réacteur constitue un élément essentiel du circuit primaire des centrales électronucléaires. C'est un composant considéré comme « non ruptible » et, en conséquence, sa conception, sa fabrication, sa réception et son suivi en service font l'objet de dispositions de contrôle particulièrement exigeantes.

Contrairement à d'autres appareils du circuit primaire, comme les générateurs de vapeur ou les couvercles de cuve, le remplacement d'une cuve n'est pas une opération envisagée par EDF. La durée de vie de l'installation est en conséquence directement liée à la justification de l'aptitude à l'emploi de la cuve.

Ces cuves sont en acier et sont composées de différentes pièces élémentaires. La figure 1 ci-dessous détaille l'ensemble des pièces constitutives d'une cuve française.

Les pièces élémentaires (viroles, anneau, brides, tubulures et calottes) ont été obtenues par laminage pour quelques unes d'entre elles, comme certaines calottes de couvercle ou de fond de cuve, et par forgeage pour toutes les autres pièces.



Cuve de réacteur 1300 MWe

Figure 1 : pièces constitutives d'une cuve

Les différentes pièces constitutives sont assemblées par soudage. Les cuves françaises ne comportent que des joints soudés circonférentiels. Elles comprennent deux viroles dites de cœur mis à part la cuve du réacteur n° 1 de la centrale de Fessenheim qui en comporte trois. Les cuves des paliers 900 MWe, 1300 MWe et 1450 MWe sont similaires et comportent le même nombre de pièces constitutives. Pour le réacteur EPR, l'utilisation d'une virole porte-tubulure dans laquelle la bride de cuve est intégrée permet de réduire encore les opérations de soudage.

La totalité de la surface intérieure des cuves est revêtue d'acier inoxydable d'environ 8 mm d'épaisseur déposé par soudage en deux couches. Ce revêtement assure une protection contre la corrosion.

La dimension des cuves augmente avec la puissance des cœurs comme indiqué dans le tableau ci-dessous qui résume les principales caractéristiques de la zone de cœur des cuves françaises.

	Fessenheim 1	900 MWe	1300 MWe	1450 MWe	EPR
Nombre de viroles	3	2	2	2	2
Diamètre interne (mm)	3988		4394	4486	4885
Épaisseur virole (mm)	200		220	225	250
Hauteur d'une virole de cœur (mm)	1479	2370	2383	2370	2362
Masse de la cuve (t)	330		440	460	510

Tableau 1 : caractéristiques dimensionnelles des viroles des cuves françaises

La cuve de la centrale EPR en construction à Flamanville est toujours en cours de fabrication. Sa mise en place dans le bâtiment du réacteur est prévue à ce jour pour fin 2013.

## Conception

Pour l'ensemble des situations de fonctionnement du réacteur, y compris les situations accidentelles, un dossier de justification du dimensionnement mécanique a été établi par le concepteur. Il permet de garantir la tenue mécanique de la cuve en toute situation en prenant en compte les coefficients de sûreté requis par la réglementation française. En particulier, le risque de rupture brutale est analysé. Le rayonnement neutronique du cœur induit en effet au cours de l'exploitation une baisse de ductilité de plus en plus importante d'une partie de l'acier des viroles de cuve. L'analyse de la résistance à la rupture brutale revêt donc une grande importance dans la démonstration de sûreté et peut faire apparaître un critère spécifique de fin de vie.

C'est pourquoi, dès l'origine, un programme de surveillance de l'irradiation (PSI) a été défini pour mesurer la fragilisation. Son but est de suivre, pendant la durée d'exploitation de chaque cuve, l'évolution des caractéristiques mécaniques afin de vérifier le bien-fondé des évaluations prévisionnelles, en particulier pour ce qui concerne :

- les marges au regard du risque de rupture brutale de la cuve,
- la température d'épreuve hydraulique.

Cette surveillance s'effectue au moyen d'éprouvettes représentatives de l'acier de la cuve et de ses soudures qui sont installées dans des capsules placées sur l'enveloppe de cœur. Ces éprouvettes subissent une irradiation supérieure à celle reçue par la cuve puisqu'elles sont plus proches du cœur. Au cours de l'exploitation du réacteur, des éprouvettes sont prélevées et testées mécaniquement. Ceci permet d'anticiper l'évolution des propriétés mécaniques de l'acier de la cuve qui sont utilisées pour la justification de l'aptitude en service.

## Fabrication

Toutes les cuves des centrales françaises ont été fabriquées par FRAMATOME à partir de pièces forgées fournies presque exclusivement par CREUSOT-LOIRE. Toutes les viroles de cuves ont été fournies par CREUSOT-LOIRE.

A partir de lingots coulés en aciérie, les viroles de cuve sont obtenues par un processus complexe (voir figure 2) comportant différentes opérations de forgeage :

- la découpe des extrémités du lingot pour éliminer les zones contenant des impuretés,
- le perçage du lingot (dans le cas du lingot plein),
- l'étirage sur mandrin,
- le bigornage.

Au cours de ces opérations, la plupart des impuretés et des ségrégations<sup>1</sup> majeures sont éliminées. Après ces opérations de transformation à chaud, les pièces forgées sont inspectées dans leur totalité par un procédé de contrôle par ultrasons afin d'y rechercher des défauts éventuels (criques, retassures, inclusions, fissures...). Ceci peut conduire au rebut de la pièce en cas de dépassement des critères. Ensuite, les différentes pièces sont assemblées par soudage. Les soudures sont également contrôlées dans leur intégralité avec deux procédés de contrôles différents (radiographie et ultrasons).

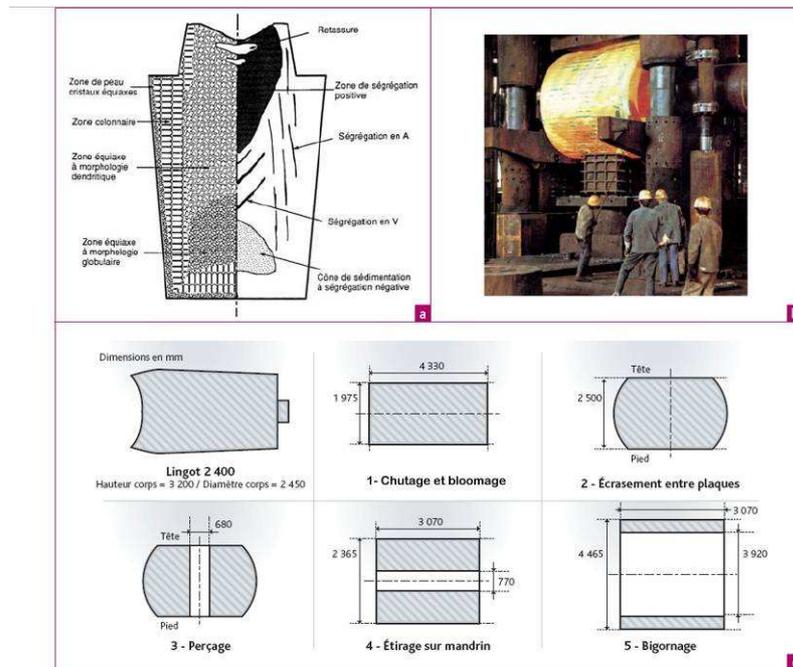
Le revêtement interne en acier inoxydable est déposé par soudage en deux phases sur la paroi interne des différents tronçons constitutifs de la cuve.

---

<sup>1</sup> Hétérogénéités dans la concentration locale d'espèces chimiques.

Une fois la cuve assemblée, les opérations ultérieures sont principalement une épreuve hydraulique en usine, requise par la réglementation française, puis l'expédition sur site.

Le suivi de fabrication est réalisé depuis l'origine par le bureau de contrôle des chaudières nucléaires du ministère chargé de l'industrie (BCCN) devenu la direction des équipements sous pression nucléaire de l'ASN.



a. Ségrégations dans un lingot ; b. Opération de bigornage d'une virole 900 MWe ; c. Gamme de forge moyenne virole C - 900 MWe.

**Figure 2 : gamme type de forgeage d'une virole 900 MWe à partir d'un lingot plein**

### Défauts en fabrication dans les viroles des cuves françaises

Malgré une conception et une fabrication soignées, certains défauts ont pu néanmoins se produire en fabrication. Les principaux sont les défauts sous revêtement (DSR) et les défauts dus à l'hydrogène (DDH). Il existe aussi des défauts plus petits comme les décohésions intergranulaires dues au réchauffage (DIDR).

Les défauts sous revêtement (DSR) peuvent se produire lors du soudage du revêtement en acier inoxydable lorsque le conditionnement thermique appliqué n'est pas suffisant. Il s'agit de défauts plans perpendiculaires à la paroi interne de la cuve (voir figure 3), correspondant à une microfissuration de l'acier de la cuve. Ces défauts sont situés dans l'acier de la cuve juste sous le revêtement, principalement au niveau des tubulures. Seules certaines cuves bien identifiées sont affectées par ce type de défaut car, suite à leur découverte en 1979, le procédé de soudage a été amélioré ; plus aucun DSR n'a été observé sur les cuves fabriquées par la suite.

Concernant la zone de cœur, une trentaine de défauts de type DSR ont été répertoriés sur l'ensemble du parc, répartis sur huit cuves. La cuve du réacteur n° 1 de la centrale du Tricastin est la plus affectée avec une vingtaine de DSR et six cuves ne présentent qu'un seul DSR. Le plus grand défaut situé sur la cuve du réacteur du Tricastin mesure 11 mm, incertitude de mesure comprise. Ces défauts sont surveillés périodiquement en service par des contrôles spécifiques et aucune évolution n'a été constatée. Par ailleurs, leur absence de nocivité a fait l'objet d'analyses mécaniques de justification détaillées.

### Défauts détectés sur la cuve du réacteur n° 3 de la centrale belge de Doel

En juin 2012, des contrôles ont été effectués sur la cuve du réacteur n° 3 de la centrale de Doel. Pour la première fois en Belgique, l'intégralité de la surface interne de la cuve en zone de cœur - c'est-à-dire de la partie cylindrique au droit du cœur - a été inspectée par ultrasons comme c'est le cas en France. Ces contrôles visaient à rechercher des défauts sous revêtement (DSR).

D'après les éléments portés à la connaissance de l'IRSN, ces contrôles ont mis en évidence des indications qui ont été considérées par l'exploitant comme étant dues à des défauts localisés dans l'acier de la cuve. Ces indications, orientées plus ou moins parallèlement à la paroi interne de la cuve, sont en très grand nombre. Ces deux éléments et la localisation tendraient à attribuer ces indications à des défauts dus à l'hydrogène (DDH - voir figure 4) ; leur origine pourrait être liée au taux d'hydrogène présent dans le métal lors de la fabrication par l'entreprise néerlandaise RDM.

Il convient de rappeler que cette entreprise, qui n'existe plus aujourd'hui, n'a pas fabriqué de viroles pour les cuves des centrales françaises.

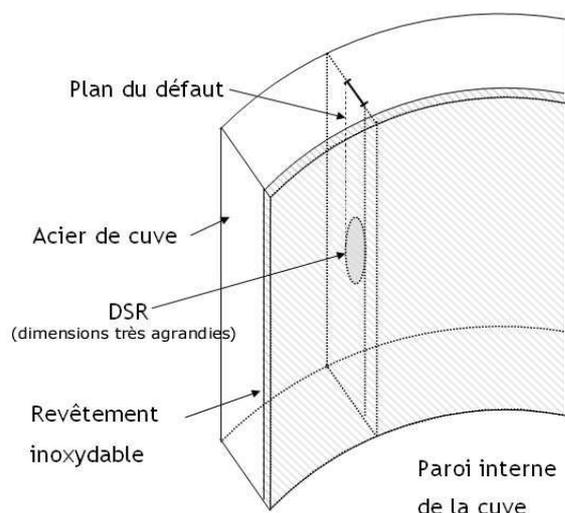


Figure 3 : exemple de défaut sous revêtement (DSR) (présentation schématique)

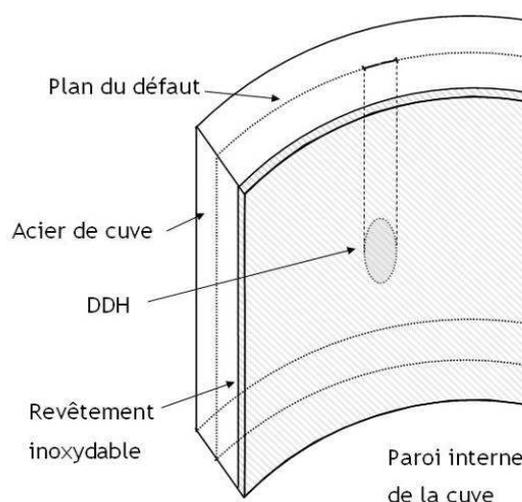


Figure 4 : exemple de défaut dû à l'hydrogène (DDH) (présentation schématique)

### Défauts de type DDH dans le cas du parc français

Ces défauts peuvent apparaître lorsque le taux d'hydrogène dissous dans le métal est trop élevé localement ; ils sont en général associés à des zones de ségrégation. Ils se produisent sous forme de multiples microfissures orientées presque parallèlement à la paroi interne de la cuve. Pour éviter l'apparition de ces défauts, le taux d'hydrogène est contrôlé à la coulée et un traitement thermique spécifique est réalisé lors du forgeage pour réduire autant que faire se peut le taux d'hydrogène dans la pièce métallique. Au cours des cinquante dernières années, seules quelques pièces destinées au parc électronucléaire français ont présenté ponctuellement des DDH et ont été mises au rebut suite aux contrôles réalisés par le fabricant.

Une recherche a été effectuée récemment par l'exploitant et le constructeur sur la base des documents de fabrication des cuves françaises. Les éléments actuellement disponibles ne conduisent pas à suspecter la présence de nombreux défauts de type DDH, compte tenu des dispositions et des contrôles de fabrication effectués depuis l'origine sur les cuves du parc français.

### Autres défauts détectés sur des cuves du parc français

Des dégradations en service par corrosion sous contrainte sont apparues par le passé sur quelques traversées (tubes adaptateurs) de couvercles de cuves. Il est en effet apparu que l'alliage à base de nickel retenu à la conception pour ces traversées soudées sur le couvercle était sensible à la corrosion sous contrainte en milieu primaire. Ceci a conduit EDF à remplacer l'ensemble des couvercles de ses réacteurs nucléaires en optant pour un alliage non sensible à ce mode de dégradation.

En fin d'année 2011, une indication correspondant à ce même phénomène de dégradation a été observée lors d'un contrôle en service sur une traversée en alliage à base de nickel (pénétration de fond de cuve) soudée sur la cuve du réacteur n° 1 de la centrale de Gravelines. Cette dégradation n'a pas conduit à une fuite et, dans l'attente de la mise au point d'une méthode de réparation définitive, la traversée a été condamnée par bouchage. La centrale a pu redémarrer pour le cycle suivant moyennant la mise en place d'un système de détection de fuite en continu et de dispositions de contrôle en service renforcées.

### Les contrôles non destructifs réalisés sur les cuves au titre du suivi en exploitation

Les contrôles non destructifs pratiqués en France sur les cuves visent à détecter des défauts et à surveiller leur évolution potentielle en service. Ces examens viennent en complément de l'épreuve hydraulique réglementaire réalisée à 206 bars selon une périodicité décennale.

Pour les viroles de cœur, les contrôles sont de plusieurs types :

- l'examen télévisuel de 100 % de la surface interne de la cuve, avec enregistrement des images, à l'aide de caméras embarquées sur la machine d'inspection en service (MIS) : cet examen est pratiqué depuis la fin des années 70 lors de la visite complète initiale ainsi que lors de la première visite complète qui a lieu au plus tard 30 mois après la première épreuve hydraulique du circuit primaire, puis lors des visites décennales. Il vise à déceler des désordres visibles en surface (chocs, usure, arrachements de métal...) ;
- l'examen par ultrasons des soudures des viroles : il s'agit d'un examen volumique réalisé sur toute l'épaisseur des soudures qui concerne le métal déposé ainsi que la zone adjacente du métal de base de part et d'autre sur une distance de 50 mm. L'examen vise à détecter des défauts perpendiculaires à la paroi interne de la cuve, mais aussi des défauts parallèles. Cet examen est pratiqué depuis la fin des années 70 suivant la même périodicité que les examens télévisuels ;
- l'examen en zone de cœur est destiné à rechercher des défauts sous revêtement (DSR). Il est pratiqué sur le parc depuis 1999, à l'occasion des visites décennales des réacteurs, avec une méthode de contrôle qualifiée ; il concerne toutes les soudures et toute la paroi interne des viroles située dans les parties les plus irradiées de la cuve, sur les 25 premiers millimètres d'épaisseur à partir de la paroi interne de la cuve. Cette zone correspond en effet à la zone susceptible de présenter des DSR et est la plus sensible à l'irradiation. Ces contrôles ont mis en évidence la trentaine de défauts de type DSR évoqués précédemment.

Cet examen n'est pas destiné à rechercher des DDH en profondeur, mais il aurait détecté des DDH éventuellement présents dans la zone d'enregistrement.

Les parties examinées par ultrasons en zone de cœur sont présentées sur la figure 5 ci-dessous.

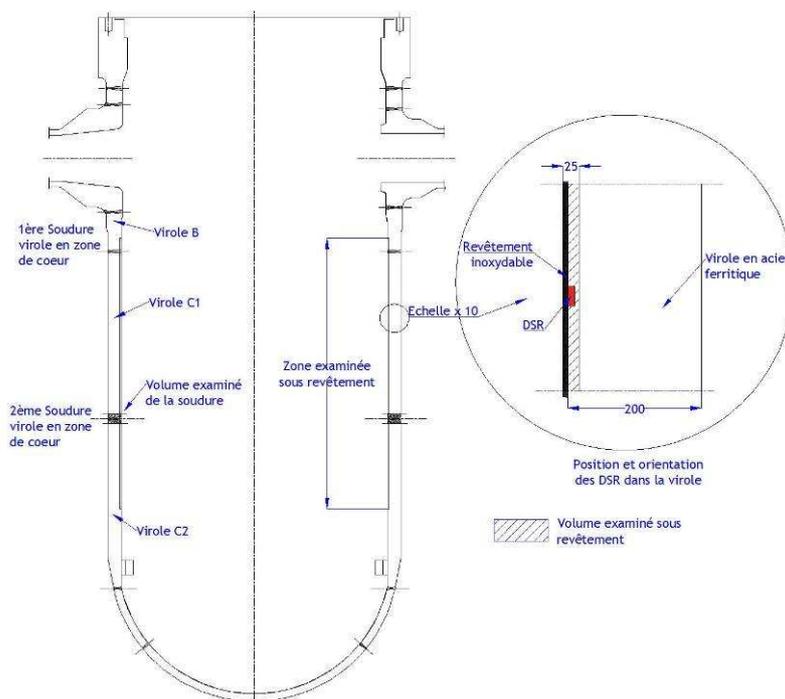


Figure 5 : zone de cœur contrôlée par ultrasons

## Conclusion

Les informations disponibles, qui sont résumées ci-dessus, ne conduisent pas à suspecter la présence sur des cuves du parc électronucléaire français de défauts de fabrication en nombre et dimensions analogues à ceux découverts sur la cuve du réacteur n° 3 de Doel.

Les défauts sous revêtement détectés en nombre limité sur quelques cuves sont bien identifiés et leur absence de nocivité a fait l'objet d'analyses mécaniques de justification détaillées. Ils sont surveillés périodiquement en service et aucune évolution de ces défauts n'a été constatée.

En tout état de cause, l'IRSN tirera les enseignements de l'événement détecté en Belgique et proposera à l'ASN les dispositions qui pourraient s'avérer nécessaires pour les réacteurs du parc français, par exemple en termes de contrôle volumique des viroles de cuve. Ce retour d'expérience portera également sur les différences de méthodes de fabrication et de contrôles entre les différents pays.