



***GUIDE DES BONNES PRATIQUES POUR
L'INSPECTION DES RESERVOIRS
CRYOGENIQUES DE STOCKAGE
D'AMMONIAC***

Edition de Juillet 2008

Sommaire

1. INTRODUCTION	3
2. LES STOCKAGES CRYOGENIQUES D'AMMONIAC	4
2.1. Description.....	4
2.2. Les stockages cryogéniques d’ammoniac.....	7
2.3. Les réglementations applicables en France	8
2.4. Inspection des réservoirs installés en France	9
3. DEGRADATIONS POTENTIELLES AFFECTANT CES STOCKAGES.....	11
3.1. Défauts de réalisation des soudures d’origine	11
3.2. Corrosion généralisée	11
3.3. Corrosion fissurante sous tension.....	12
3.4. Fatigue.....	13
3.5. Modes de dégradation rencontrés dans les situations transitoires	13
3.6. Informations sur les incidents rencontrés dans le monde sur les réservoirs de stockage cryogéniques d’ammoniac.....	15
4. STRATEGIE D’INSPECTION	17
5. INSPECTION.....	18
5.1. Compétence	18
5.2. Détermination des intervalles d’inspection.....	18
5.3. Calcul de l’intégrité structurale.....	20
5.4. Inspection depuis l’intérieur du réservoir	21
5.5. Inspection non intrusive par l’extérieur du réservoir.	22
5.6. Méthodes alternatives.....	24
5.7. Taille, nombre et localisation des zones à inspecter.....	27
5.8. Planning d’inspection	28
5.9. Traitement des observations et actions correctives.....	28
5.10. Traitement des cas spécifiques.....	28
5.11. Tableau récapitulatif des modes de dégradation, méthodes d'inspection et solutions techniques	31
5.12. Vérification de l’état initial d’un réservoir	34
5.13. Elaboration des procédures d'inspection par l'extérieur	34
6. CONCLUSION.....	35

1. INTRODUCTION

Ce guide de bonnes pratiques fait suite aux travaux de l'UNIFA et de l'EFMA pour fournir des règles de bonnes pratiques pour l'inspection des stockages cryogéniques d'ammoniac. Il reprend notamment les travaux précédemment réalisés sur le couvert de l'UNIFA et les dernières recommandations de l'EFMA, et en particulier le guide 2007 : « Guidance for inspection of Atmosphéric refrigerated storage Tanks ».

Ce document s'appuie sur l'expérience acquise dans l'inspection de ces réservoirs et sur la connaissance des mécanismes de dégradation auxquels ils sont exposés.

La principale difficulté rencontrée est de trouver une issue à la situation contradictoire dans laquelle se trouvent ces installations.

- La nécessité de vérifier régulièrement l'état d'un réservoir est habituellement satisfaite en procédant à des contrôles de l'intérieur du réservoir après arrêt de son exploitation, inertage et réchauffage à la température ambiante.
- Mais l'expérience a montré que les principaux modes de dégradation potentiels de ces installations avaient leur origine lors des phases transitoires d'arrêt et de remise en exploitation.

Cette démarche a été abordée dans l'optique de l'Inspection Basée sur la Criticité (IBC, Risk Based Inspection, RBI, en langue anglaise) qui demande une évaluation de la probabilité d'occurrence d'une défaillance éventuelle des équipements concernés et de ses conséquences afin de déterminer un programme d'inspection adapté. Les inspections et contrôles sont définis et planifiés en fonction des informations obtenues et d'une analyse de criticité de l'équipement.

Cette inspection passe d'abord par l'identification des modes de dégradation potentiels puis par l'estimation de leurs effets sur l'intégrité de l'ouvrage et enfin par l'évaluation des conséquences et de la probabilité d'une défaillance. Ces résultats permettent alors de définir les modalités (nature, périodicité, localisation) de suivi en exploitation et d'inspection les mieux adaptées. Le programme d'inspection doit permettre de détecter et d'évaluer les dégradations éventuelles avant que l'aptitude à la fonction risque d'être compromise.

2. LES STOCKAGES CRYOGENIQUES D'AMMONIAC

2.1. Description

2.1.1. Modes de stockage de l'ammoniac anhydre

L'ammoniac est généralement stocké sous forme anhydre liquéfiée

- soit à la température ambiante sous pression (stockage sous pression),
- soit à -33 °C à la pression atmosphérique (stockage cryogénique).
- soit à des températures et pressions intermédiaires (stockage semi-réfrigéré).

Seuls les stockages cryogéniques à pression atmosphérique sont concernés par ce document.

En Europe les réservoirs cryogéniques sont de grands réservoirs cylindriques d'axe vertical d'une capacité de 5 000 à 60 000 m³, construits en acier résilient à faible température, reposant sur une dalle en béton armé, elle-même sur fondations profondes. Ils sont isolés de façon à limiter le réchauffement de l'ammoniac. La température est maintenue en dessous de la température d'ébullition du liquide par aspiration des vapeurs puis compression, condensation et réinjection du liquide froid dans le bac de stockage, l'ensemble formant un groupe frigorifique où le réservoir serait l'évaporateur.

Dans d'autres régions du monde, en Amérique notamment, il existe des réservoirs cryogéniques de capacité plus modeste et même des réservoirs cryogéniques mobiles.

2.1.2. Types de réservoir de stockage cryogénique d'ammoniac

Il existe deux grands types de réservoir de stockage cryogénique de l'ammoniac :

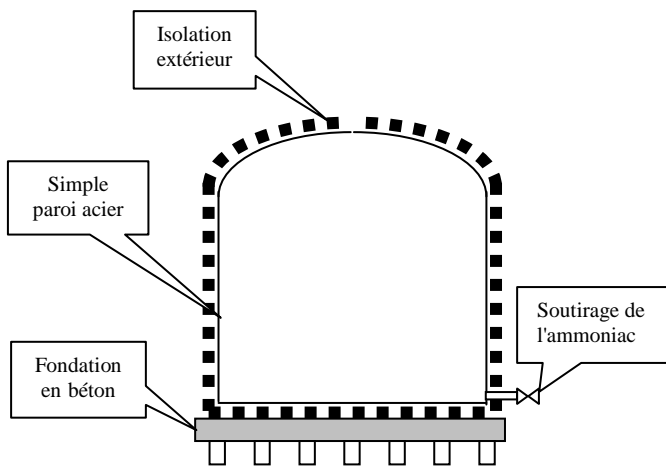
Les **réservoirs à simple paroi** qui comportent un fond et une paroi en acier

Les **réservoirs à double paroi** qui comportent un double fond et une double paroi en acier

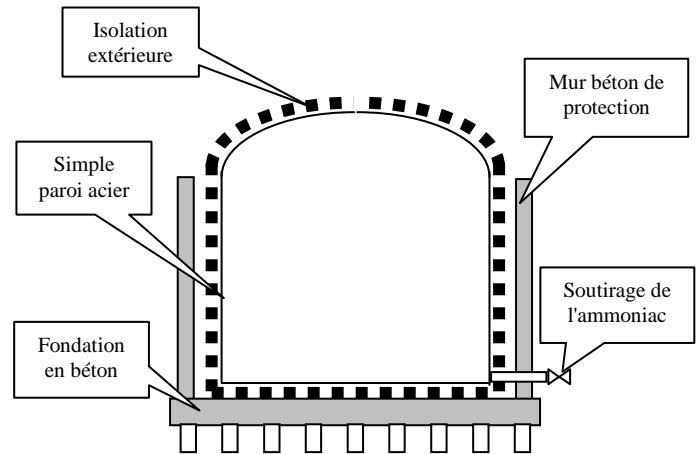
Mais tous les réservoirs sont constitués de plusieurs barrières entre l'ammoniac liquide et l'environnement. On peut en dénombrer jusqu'à quatre :

1. un réservoir acier qui contient tout le volume d'ammoniac liquide,
2. un réservoir acier extérieur dessiné pour pouvoir contenir tout le volume d'ammoniac liquide, le toit peut être distinct pour chacun des deux réservoirs intérieur et extérieur ou commun,
3. une paroi en béton ou en acier, destinée à protéger le réservoir et le système d'isolation et qui peut aussi être conçue pour contenir l'ammoniac comme une véritable rétention en cas de perte de confinement,
4. un mur de rétention ou digue d'une hauteur et à une distance telles que l'ammoniac liquide puisse être totalement contenu en cas de perte de confinement,

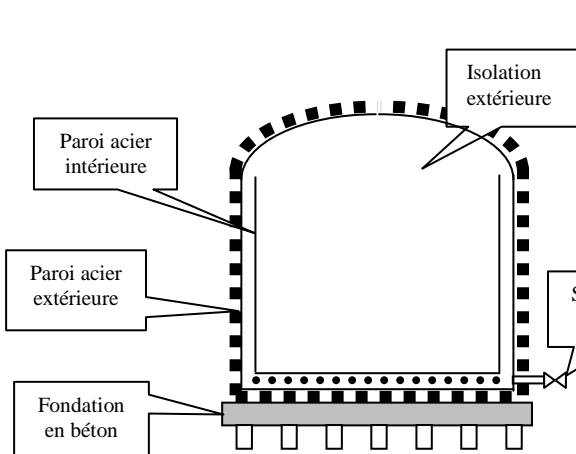
Les schémas qui suivent donnent des exemples de stockage et de rétention sans prétendre être exhaustifs.



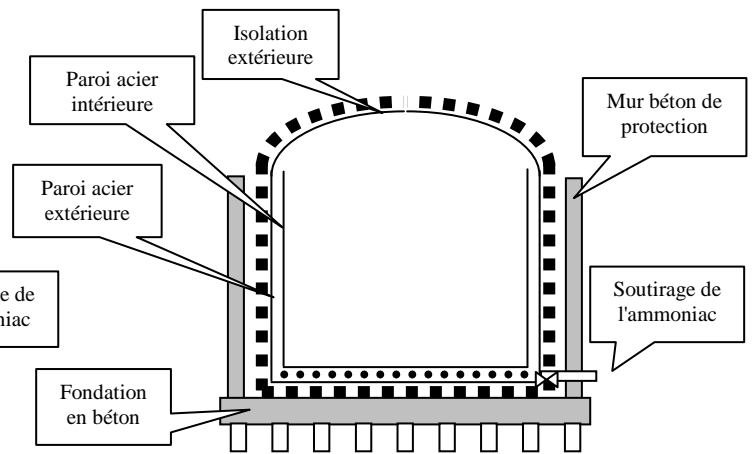
**Réservoir à simple paroi
avec isolation extérieure**



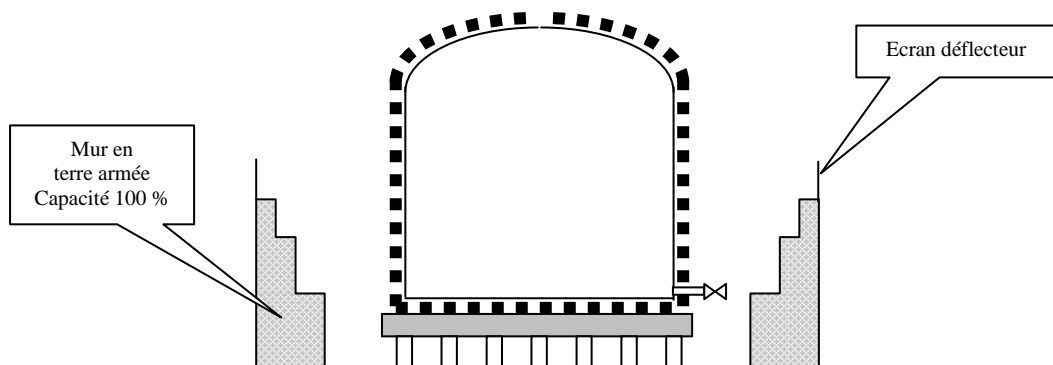
**Réservoir à simple paroi
avec mur béton**



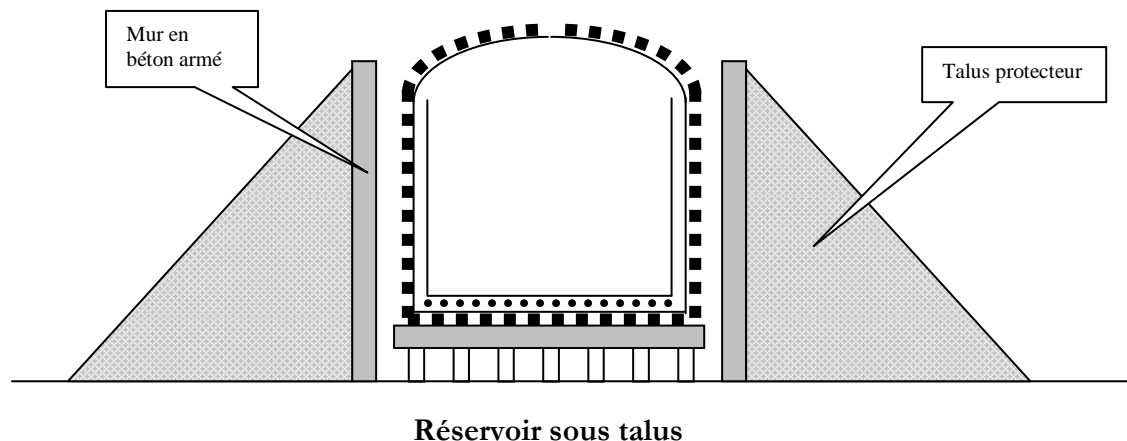
**Réservoir à double paroi
toit et simple toit**



**Réservoir à double paroi, et simple
avec mur de protection**



Réservoir avec mur de rétention en terre armée



2.1.3. Exploitation

L'installation de ce genre de stockage et leur mise en service sont subordonnées à étude de danger, étude d'impact et autorisation administrative prenant différentes formes suivant le pays. Ces stockages sont exploités conformément à des procédures documentées, validées par l'application d'une méthode d'évaluation des risques dans une unité de production en continu (Hazop). La conception des réservoirs et de leurs équipements connexes varie d'une installation à l'autre. Certains points demandent une attention systématique en exploitation :

- Les vannes de décharge ou soupapes de sécurité
- Le dispositif de maintien en froid de l'ammoniac
- Les piquages
- Les systèmes de pompage et de circulation de l'ammoniac
- L'isolation, tant sur le toit que sur les murs et le fond
- La protection contre le roll-over, le cas échéant
- Les détecteurs d'ammoniac
- Les éléments Importants Pour la Sécurité d'une façon générale

La maîtrise de ces points est essentielle. Elle doit être assurée par des procédures d'exploitation adaptées et appliquées rigoureusement. Ces différents points doivent être inclus dans un programme systématique pour maintenir en état le réservoir et ses équipements connexes. Le réservoir lui-même est bien sûr l'équipement le plus important. Il est au centre de ce document.

2.1.4. Conception et matériaux de construction

Les réservoirs pour le stockage d'ammoniac anhydre à une pression voisine de la pression atmosphérique et à -33°C sont normalement conçus selon un code tel que le standard américain de l'American Petroleum Institute 620 R : "Conception et construction de grands réservoirs soudés pour le stockage à basse pression" ou équivalent. Les matériaux utilisés pour ces réservoirs sont habituellement choisis pour satisfaire les préconisations de ces codes de conception. Le type courant de matériau est un acier au carbone ou faiblement allié certifié à basse température avec test de résilience à la température de service ou au voisinage. Des matériaux avec une limite élastique entre 290 et 360 Mpa, volontairement limitée, sont le plus souvent retenus.

Les métaux d'apport utilisés pour les soudures disposent d'un niveau de résistance et de résilience égaux ou supérieurs à ceux du métal de base. La compatibilité des métaux de base et d'apport est un paramètre important pour la résistance à la Corrosion Fissurante sous Tension (CFT).

Il est important que les données de la conception et de fabrication du réservoir soient enregistrées et conservées pour permettre de mener à bien une étude de type « Inspection Basée sur la Criticité » efficace.

2.2. Les stockages cryogéniques d'ammoniac

Plus de 1000 réservoirs de stockage cryogénique d'ammoniac sont en service dans le monde dont 400 aux Etats Unis. Cette évaluation inclut des stockages de faible capacité et des réservoirs mobiles assez répandus en Amérique du Nord. Alors qu'en Europe les stockages cryogéniques d'ammoniac sont toujours de grands réservoirs fixes implantés dans des unités industrielles.

Les stockages cryogéniques d'ammoniac existant en France à ce jour sont listés dans le tableau ci-dessous.

Exploitant	Localisation	Année de construction	Volume utile (m ³)	Diamètre (m)	Hauteur (m)	Pression maximale (bars)	Type de conception
Yara France	Le Havre	1968	15 000	29,9	26,6	0,050	Simple paroi acier Rétention acier 100 % du volume
		1981	12 000	24	30,2	0,050	Simple paroi acier Rétention acier 100 % du volume
	Montoir	1970	19 000	30	28	0,075	Simple paroi acier mur terre armée 100 % volume
		1970	19 000	30	28	0,075	Simple paroi acier mur terre armée 100 % volume
	Ambès	1990	30 000	44	25	0,100	Simple paroi acier mur béton haut 100 % volume
	Pardies	1997	20 000	26	26	0,100	Simple paroi acier mur béton haut 100 % volume
Grande Paroisse	Grand Quevilly	1978	35 300	50	19,4	0,100	Simple paroi acier Mur béton haut + talus 100 % volume
	Ottmar-sheim	1976	15 000	28,4	25	0,100	Simple paroi acier Mur béton haut + talus au 2/3 du mur 100 % volume

2.3. Les réglementations applicables en France

Les réservoirs de stockage cryogéniques d'ammoniac sont classés dans la rubrique 1136 "Emploi et stockage de l'ammoniac" de la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement. Ils sont tous soumis à autorisation avec servitude et donc classés site Seveso seuil haut. Ils sont assujettis à toutes les prescriptions et obligations imposées par ce classement.

Etant exploités à la pression atmosphérique, ils ne sont pas soumis à la réglementation concernant les équipements sous pression. Des clapets et soupapes de sécurité les protègent de toute surpression.

Par contre, il n'existe pas actuellement de réglementation nationale définissant l'inspection ou le suivi en exploitation que les exploitants de ces ouvrages doivent assurer.

Certains sont soumis à inspection périodique par l'arrêté préfectoral d'exploitation de l'établissement. C'est le cas des réservoirs les plus récents qui sont soumis à une inspection périodique interne tous les dix à quinze ans avec contrôle magnétoscopique des soudures. Ce contrôle est parfois défini suivant l'Arrêté du 9 octobre 1980 relatif aux vérifications et réparations des réservoirs sphériques utilisés à l'emmagasinage de gaz liquéfiés sous pression et des réservoirs d'ammoniac liquéfié, utilisé comme référence bien que les réservoirs atmosphériques n'entrent pas dans son champ d'application.

D'autres stockages n'ont pas d'obligations précises d'inspection périodique.

2.4. Inspection des réservoirs installés en France

Les réservoirs cryogéniques de stockage d'ammoniac ont souvent fait l'objet d'une ou plusieurs visites internes conventionnelles. Les contrôles par magnétoscopie, portant sur des centaines de mètres de cordon de soudure, n'ont jamais révélé que des défauts d'origine relativement mineurs et jamais de corrosion fissurante sous tension :

Société	Localisation	Année de construction	Année de visite interne	Résultats de la visite
Grande Paroisse	Rouen	1978	1992	Quelques défauts d'origine, pas de CFT
			2002	Quelques défauts d'origine, pas de CFT (750 m de soudure contrôlée)
PEC Rhin	Ottmarsheim	1976	1996	Quelques défauts d'origine, pas de CFT
Yara France	Le Havre	1968	1983	Pas de CFT
			1997	Pas de CFT
	Le Havre	1981	2001	Pas de CFT
	Montoir	1970	1988	Quelques défauts d'origine - 2 ^{ème} inspection remplacée par des contrôles par l'extérieur tous les 3 ans, en attente d'officialisation - pas de CFT
	Montoir	1970	1989	Quelques défauts d'origine - 2 ^{ème} inspection remplacée par des contrôles par l'extérieur tous les 3 ans, en attente d'officialisation - pas de CFT
	Ambès	1990	néant	- contrôles par l'extérieur tous les 3 ans depuis 1999 - pas de CFT
	Pardies	1997	néant	- contrôles par l'extérieur réalisés en 2007 à échéance de première inspection - pas de CFT

Il faut noter que quatre réservoirs font l'objet d'un suivi par l'extérieur depuis 1999.

Dans un premier temps cette mesure a été proposée par Yara France pour suppléer aux visites internes avec contrôles magnétoscopiques arrivant à échéance de 10 ans et porter cette échéance à 15 ans. Ces dispositions ont été approuvées par la DIREC Pays de Loire et par la DIREC Aquitaine et sont appliquées depuis 1999.

Déjà à l'époque ces méthodes avaient été présentées comme pouvant remplacer dans un deuxième temps les visites internes systématiques pour les raisons exposées plus haut. Le tableau ci-dessous résume les différents contrôles effectués :

Localisation	Réservoir	Année des contrôles	Étendue des contrôles	Résultats
Montoir	B 2001 S	1999	Contrôles US de 5 T sur la soudure de la 1ère virole	Absence de CFT, 1 défaut d'origine acceptable en pleine tôle
		2001	Contrôles US de 5 T sur la soudure de la 1ère virole	Pas d'évolution par rapport au premier contrôle
		2004	Contrôles US de 5 T sur la soudure de la 1ère virole + 2 autres zones + trou d'homme + piquages partie basse + soudure marginale	Absence de CFT, 1 défaut d'origine sur 1 soudure extérieure du trou d'homme
		2007	Contrôles US de 5 T sur la soudure de la 1ère virole + 2 autres zones différentes de celles de 2004	Pas de CFT
	B 2002 N	1999	Contrôles US de 5 T sur la soudure de la 1ère virole	Absence de CFT, 1 indication non significative
		2001	Contrôles US de 5 T sur la soudure de la 1ère virole	Pas d'évolution par rapport au premier contrôle
		2003	Contrôles US de 5 T sur la soudure de la 1ère virole + 2 autres zones + trou d'homme + piquages partie basse + soudure marginale	Absence de CFT, 1 défaut d'origine sur 1 soudure extérieure du trou d'homme
		2006	Contrôles US de 5 T sur la soudure de la 1ère virole + 2 autres zones différentes de celles de 2003	Pas de CFT
Ambés	51V01	2000	Contrôle US de 7 T sur la soudure de la 1ère virole	Absence d'indication de corrosion fissurante sous tension
		2002	Contrôles US de 7 T sur la soudure de la 1ère virole (en partie à des emplacements différents)	Absence d'indication de corrosion fissurante, 1 indication non significative
		2002	Contrôle de l'enceinte en béton	Ouvrage en bon état ne nécessitant pas d'intervention à court terme
		2004	Contrôles US de 7 T sur la soudure de la 1ère virole + 2 trous d'homme + 2 piquages en partie basse + 5 ml de la soudure fond/virole + vannes	Contrôles juin 2004

Ambès		2006	Radio vannes de sortie	Bon état
		2007	Contrôle de l'enceinte en béton	Bon état
		2008	Contrôles US de 7 T sur virole + soudure fond virole	Contrôles programmés en juin 2008
Pardies		2007	Contrôles US de 6 T sur soudure de la 1 ^{ère} virole	Pas de CFT

Ces contrôles ont été réalisés par l'Institut de Soudure qui a mis au point les procédures de contrôle et les a mises en oeuvre sur le terrain. La faisabilité de ce genre de contrôle a été confirmée. Toutes les mesures sont comparées aux résultats obtenus sur des maquettes reproduisant précisément la configuration des soudures des réservoirs.

3. DEGRADATIONS POTENTIELLES AFFECTANT CES STOCKAGES

Comme toutes les constructions, les réservoirs d'ammoniac peuvent être affectés par leur environnement intérieur ou extérieur. Il est important d'identifier les différents modes de dégradation qui peuvent en résulter. C'est un préalable indispensable à la définition d'une politique d'inspection.

L'ammoniac n'est pas corrosif pour les matériaux de construction utilisés, les produits contaminants potentiels sont l'huile et l'eau, mais les quantités présentes sont toujours très faibles et leur effet est positif sur les conditions d'exploitation. Les niveaux de contrainte en exploitation sont stables.

Les paragraphes qui suivent analysent les différentes origines imaginables de dégradation d'un réservoir cryogénique.

3.1. Défauts de réalisation des soudures d'origine

Les réservoirs de stockage d'ammoniac ont été construits suivant des standards courants tels que API 620 App. R ou équivalent. Ces standards comportent des préconisations pour l'inspection des soudures par radiographie ou prélèvement de coupons pour garantir un bon niveau de qualité des soudures. La qualité et l'intégrité des soudures sont vitales pour la vie du réservoir. Le phénomène de Fissuration à Froid dans la Zone Affectée Thermiquement des soudures est particulièrement à craindre. Les contraintes résiduelles et les pointes localisées de dureté doivent être minimisées en respectant les procédés de soudage homologués retenus. Ce risque de fissuration à froid en Zones Thermiquement Affectées des soudures peut être suspecté si les paramètres des procédés de soudage tels la température de préchauffage, l'étuvage des électrodes ne sont pas systématiquement respectés.

Si l'inspection initiale n'est pas jugée suffisante, les prescriptions de l'époque n'étant pas toujours conformes aux pratiques plus récentes, une inspection interne avec magnétoscopie des soudures sensibles est en mesure de garantir la bonne santé générale du réservoir. Une inspection de ce type doit être faite au moins une fois soit avant la mise en service, soit lors de la première inspection interne.

3.2. Corrosion généralisée

La corrosion extérieure due aux conditions atmosphériques est d'abord évitée par l'isolation du bac qui comprend une membrane pare-vapeur réduisant l'entrée de l'humidité atmosphérique. Mais elle est

surtout limitée par la température du stockage. A une température de -33 °C la vitesse de corrosion d'un acier au carbone est négligeable.

Le toit, moins froid, peut être plus sensible à la corrosion extérieure. Mais il peut faire l'objet, en service d'inspections et de contrôles performants à partir de l'extérieur. Si nécessaire, des remises en état de la paroi peuvent également être réalisées sans arrêt d'exploitation. Enfin, sa criticité est bien moindre.

Par contre, une entrée d'oxygène par les événements de sécurité des bacs pendant les phases de vidange rapide du réservoir pourrait initier des corrosions dans les parties supérieures de la paroi. Pratiquement il n'en est rien, l'oxygène est éliminé par le système de refroidissement continu qui comporte toujours un dispositif d'élimination des gaz incondensables. De fait, aucune détérioration détectable, provoquée par une corrosion généralisée, n'a été trouvée à l'intérieur de tels réservoirs.

3.3. Corrosion fissurante sous tension

Au dire de certains experts, l'ammoniac liquide, en présence d'oxygène, peut provoquer la CFT dans les aciers au carbone. Ce phénomène, très peu fréquent, n'a été qu'exceptionnellement rencontré dans les réservoirs à basse température car la présence d'oxygène est nécessaire pour catalyser le processus et parce qu'une basse température ralentit le processus.

Le niveau de contrainte effective nécessaire pour amorcer une fissure de ce type est élevé, le matériau doit avoir subi un écrouissage important, situations exceptionnellement rencontrées pour des fabrications habituelles et des conditions normales d'exploitation.

En se basant sur les observations de terrain et sur les importants travaux de recherche effectués au niveau international, il apparaît que la mise en exploitation et dans une mesure encore plus importante la remise en exploitation constituent des phases critiques quant au risque d'initiation de fissures superficielles de corrosion sous tension. Cela est dû en premier lieu à la possibilité d'augmentation du taux d'oxygène à l'intérieur du réservoir et aux variations de température qui augmentent le niveau de contrainte en phases transitoires sous l'effet des dilatations ou des contractions des matériaux.

Les communications faites à la suite de découverte de Corrosion Fissurante sous Tension font état d'un nombre important de fissures mais de taille très limitée et très peu évolutives. Les fissures apparaissent dans les cordons de soudure, elles sont transversales. Les zones les plus favorables à l'apparition des fissures sont les zones de plus fortes contraintes, c'est-à-dire les cordons de soudure et les tés de raccordement entre soudures verticales et soudures circulaires en partie basse des réservoirs particulièrement la soudure entre première et deuxième virole.

La quantification de la probabilité d'apparition d'un défaut de taille critique est basée sur des expériences documentées en matière de stockage d'ammoniac. Dans le monde environ 1000 réservoirs sont en exploitation ce qui représente environ 20 000 années réservoirs. Les cas de Corrosion Fissurante sous Tension ayant fait l'objet de comptes-rendus circonstanciés sont extrêmement rares. Il n'est pas exclu que d'autres réservoirs soient affectés sans être connus de la profession. A contrario, il est arrivé que des défauts d'origine soient identifiés comme de la Corrosion Fissurante sous Tension. Aucun accident n'a été imputé à ce phénomène sur des stockages réfrigérés.

Toutefois, la CFT dans les réservoirs de stockage d'ammoniac réfrigérés est un phénomène qui ne peut être complètement écarté. Ce qui fait de la CFT le seul mode de dégradation en paroi interne qui puisse advenir en exploitation.

De nombreuses recherches ont été réalisées pour comprendre les mécanismes d'initiation et de propagation, les principales conclusions de ces travaux sont les suivantes :

1. La CFT est très difficile à initier à -33°C ,
2. L'initiation de la CFT exige des contraintes importantes supérieures à la limite d'élasticité du matériau (contraintes appliquées ou contraintes résiduelles de soudage).
3. L'initiation de la CFT exige la présence d'oxygène.
4. La présence d'eau inhibe l'initiation et la propagation de la CFT..
5. Quand de la CFT est détectée les défauts sont de très petites tailles (inférieure à 2 mm de profondeur).
6. Le commissioning et le recommissioning sont les périodes les plus importantes pour la formation et le développement de CFT.

Le phénomène de CFT est rare à basse température, à la fois par manque d'oxygène pour initier la fissuration et par le ralentissement de la cinétique de corrosion due à la température.

L'expérience française est plus explicite puisqu'aucune dégradation par CFT n'a jamais été trouvée en France. Les expertises réalisées depuis les années 1980 ont d'ailleurs démontré que les défauts rencontrés en France dans les stockages d'ammoniac, notamment sur les sphères de stockage d'ammoniac, correspondaient à des défauts de construction du type fissuration à froid.

Cependant la CFT doit être considérée comme le principal mécanisme de dégradation pour les réservoirs cryogéniques d'ammoniac. Les autres mécanismes externes de dégradations (corrosion généralisée,...) doivent aussi être pris en compte.

3.4. Fatigue

La fatigue a été avancée comme un mode possible de dégradation qui pourrait se produire du fait de la longue durée de vie des réservoirs de stockage. Un réservoir normal d'importation est rempli et vidé toutes les une à deux semaines. Le nombre de cycles est donc de l'ordre de 50 fois par an soit 2000 cycles pour 40 ans. Sans présence de défauts notables, ce chiffre est largement en dessous du nombre de cycles au-delà duquel des endommagements par la fatigue peuvent apparaître dans des conditions normales d'exploitation. Il est donc admis que la fatigue n'est pas rencontrée sauf conditions particulières dans lesquelles le nombre de cycles ou le niveau de contrainte soient très supérieurs à celui retenu à la conception.

3.5. Modes de dégradation rencontrés dans les situations transitoires

Les situations transitoires que sont les phases de mise en service, d'arrêt et de remise en service peuvent donner lieu à dégradation de l'intégrité des réservoirs.

Le premier mode de dégradation est directement dû aux **dilatations** ou **contractions** relatives provoquées par la variation de température de quelques 50°C entre l'ambiante et la température de service.

Le fond du réservoir, tout particulièrement, subit des mouvements importants de la tôle sur son support qui peuvent engendrer des contraintes extrêmement élevées si le déplacement n'est pas parfaitement libre. Des déchirures locales des soudures à clin des tôles de fond ont déjà été observées sur des réservoirs d'ammoniac et d'autres fluides présentant des caractéristiques similaires tel le propylène par exemple, elles n'ont pu être initiées que dans les phases transitoires car en régime établi les contraintes sont faibles.

La soudure de raccordement virole/fond ainsi que les ancrages sont des zones qui, lors des phases de transition thermique, peuvent subir des contraintes inhabituelles.

Les piquages de raccordement de tuyauteries peuvent également subir des efforts anormalement élevés si les supportages ne sont pas correctement conçus.

Les assemblages boulonnés voient également leurs conditions de serrage perturbées lors des phases transitoires ce qui peut être préjudiciable à une bonne étanchéité en service normal.

Le deuxième mode de dégradation est constitué par la **corrosion généralisée** extérieure qui n'est plus bloquée par la faible température et peut donc s'initier en particulier sur les zones sensibles telles que les piquages et les points singuliers du frigorifuge. Ce phénomène est d'autant plus à craindre que l'humidité atmosphérique peut également parvenir plus facilement au contact des parois du réservoir à une température supérieure à 0°C.

La **protection thermique** ou frigorifuge souffre également beaucoup lors du réchauffage. La dilatation de la tôle associée à la pénétration d'humidité a souvent pour effet de décoller l'isolant des parois provoquant ainsi des dégradations locales ou même générales.

Enfin, il a été précisé plus haut que la probabilité d'initiation de la **Corrosion Fissurante sous Tension** était beaucoup plus élevée dans ces situations transitoires où les conditions d'initiation peuvent être réunies.

L'examen de tous ces modes potentiels de dégradation fait apparaître que ces réservoirs n'ont pour ainsi dire pas de modes de dégradation en exploitation à part la Corrosion Fissurante sous Tension que l'on ne peut exclure complètement même si elle est très rare. Par contre, les phases transitoires d'arrêt et de redémarrage sont les plus critiques. C'est dans ces conditions que peuvent apparaître toutes les dégradations potentielles.

Les nombreuses inspections réalisées sur les stockages français, mettant en oeuvre un procédé de contrôle performant, la magnétoscopie, sur des étendues très représentatives sans révéler de dégradation en service, viennent confirmer que ces réservoirs sont soumis à peu de sollicitations. Récemment encore, le réservoir de Toulouse a fait l'objet d'une inspection par l'Institut de Soudure après sa mise hors exploitation. Les cordons de soudure ont été contrôlés par magnétoscopie sur une longueur totale de 300 m. Cinq prélèvements ont été analysés. Aucune trace de Corrosion Fissurante sous Tension n'a été décelée. Un très bon état général a été constaté après 40 années d'exploitation. Ce réservoir n'avait jamais été ouvert.

On peut donc légitimement s'interroger sur la pertinence des inspections internes et chercher d'autres méthodes permettant de connaître l'état d'un réservoir sans avoir à l'arrêter.

3.6. Informations sur les incidents rencontrés dans le monde sur les réservoirs de stockage cryogéniques d'ammoniac.

Une étude du AICHE Ammonia safety Symposium a été réalisée pour identifier les dégradations majeures qui ont affecté en pratique les réservoirs de stockage cryogéniques d'ammoniac. 18 incidents ont été répertoriés et sont listés dans le tableau suivant.

Type de défaillance	Cause fondamentale.	La défaillance aurait-elle pu être découverte par une inspection interne ou externe du réservoir?	Nombre d'occurrence
CFT	Corrosion de l'acier initiée par la présence d'oxygène, d'ammoniac, et la présence de contraintes	Oui. Les inspections internes précédentes sont en partie la cause vraisemblable de l'initiation du phénomène	4
Suite à une conception inadaptée, le réservoir intérieur s'est mis à « flotter » endommageant la construction.	a) fuite dans le réservoir intérieur b) condensation d'ammoniac dans l'espace annulaire entre le réservoir interne et externe c) débordement l'ammoniac au-dessus du bord du réservoir intérieur.	Oui, seulement quand la cause fondamentale est une fuite du réservoir intérieur. Autrement, non, parce que l'incident est provoqué par des erreurs opérationnelles ou de conception.	3
Dégradations des fondations dues au givre	Formation de couches de glace sous le réservoir provoquée par : a) défaut des tubes de réchauffage (deux exemples) b) défaut de l'isolation provoqué par un tremblement de terre	Oui, En vérifiant régulièrement le fonctionnement des réchauffeurs. Ce contrôle doit faire partie du programme régulier d'inspection.	3

Type de défaillance	Cause fondamentale.	La défaillance aurait-elle pu être découverte par une inspection interne ou externe du réservoir?	Nombre d'occurrence
Surpression causant la rupture complète du réservoir	a) De l'ammoniac chaud a été injecté dans le réservoir b) mélange rapide d'une solution d'ammoniac et d'ammoniac liquide lors de la rupture de la couche d'huile séparant les deux phases (lors d'une remise en service)	Ces accidents se sont produits suite à des erreurs opérationnelles	2
Mise au vide du réservoir engendrant son effondrement	Mauvaise mesure de pression liée à un transmetteur de pression défaillant et défaillance des soupapes de respiration	La vérification des accessoires de sécurité doit être intégrée dans le plan d'inspection.	1
Défaillance de la soudure de la liaison du toit avec les parois cylindriques du réservoir	Mauvaise conception des soudures avec des fortes contraintes en service et fatigue sous faible nombre de cycle	Oui	1
Fuite sur le fond du réservoir	Techniques de soudage inadaptées	Oui, dans ce cas les fuites ont été détectées par la présence d'ammoniac autour du réservoir.	1
Fuite au niveau du toit	Mauvaise réparation d'un défaut de fabrication	oui	1
Fuite au niveau des parties cylindriques	Les matériaux utilisés en fabrication n'étaient pas conformes aux spécifications. Des fissures de fatigue se sont développées.	oui	1
Débordement du réservoir	Mauvaise compréhension du niveau lu par les opérateurs combinée avec une défaillance de l'alarme de niveau haut	Erreur opérationnelle combinée avec une alarme défectueuse de niveau élevé. La vérification des dispositions de sûreté doit faire partie du programme régulier d'inspection.	1

4. STRATEGIE D'INSPECTION

L'inspection des réservoirs cryogéniques d'ammoniac est un compromis entre le besoin de l'inspection et les effets négatifs produits par l'ouverture du réservoir (contraintes thermiques, introduction d'oxygène, ...) qui tendent à augmenter le risque d'initiation de la CFT.

L'établissement d'un plan d'inspection suivant une méthodologie du type IBC, est l'approche qui semble la plus souhaitable.

La stratégie d'inspection doit être établie par une équipe pluridisciplinaire d'inspection, de maintenance et d'exploitation qui prennent en compte les conditions particulières de chaque réservoir (conditions atmosphériques, conditions de site,...). Ce groupe doit agir de façon indépendante et posséder les compétences nécessaires.

Il est essentiel que la conception, les données de construction et l'historique d'exploitation du réservoir soient revus avant l'établissement de la stratégie d'inspection.

La méthodologie et les calculs d'intégrité du réservoir doivent permettre de définir une stratégie d'inspection des réservoirs qui inclut :

- la définition des méthodes de contrôles les plus adaptées,
- la détermination des paramètres opératoires à suivre en continu dans le cadre du suivi en inspection des réservoirs,
- les actions de prévention à mettre en œuvre pour réduire la probabilité et les conséquences d'une fuite ou d'une rupture.

5. INSPECTION

5.1. Compétence

Il faut que l'intégrité de chaque réservoir d'ammoniac soit garantie par la mise en oeuvre d'un plan d'inspection adapté et basé sur des moyens de contrôle fiables et éprouvés. Cela ne peut être obtenu que par un ensemble de visites et de contrôles incluant le contrôle des parois mais allant bien au-delà.

Chaque stockage présente des conditions particulières à prendre en compte lors de son évaluation. Il est donc très important que des personnels de procédé, exploitation, inspection, compétents et expérimentés soient impliqués dans l'évaluation des réservoirs existants. Il est essentiel que la conception et l'historique du réservoir en exploitation soient examinés au cours de l'élaboration de la stratégie d'Inspection. Il est également important de connaître et de prendre en compte toutes les conditions locales qui peuvent influencer le programme d'Inspection : par exemple les conditions atmosphériques, l'état du sol, etc.

Il est important que des données fiables soient utilisées pour l'évaluation et essentiel que les personnels impliqués dans l'approche IBC aient les connaissances requises et une expérience suffisante.

5.2. Détermination des intervalles d'inspection

La détermination des intervalles d'inspection proposés dans le présent document, a été développé après une étude de l'EFMA auprès de ses membres, cette étude réalisées en 2007 a regroupé 48 réservoirs de stockage cryogénique d'ammoniac, représentant 80% des capacités européennes.

La matrice fournie en annexe 2, détermine les intervalles d'inspection recommandés par L'EFMA, en se basant sur une approche IBC et sur le retour d'expérience européen. Cette matrice discrimine 5 niveaux de criticité.

Le but de cette évaluation est d'établir les bases pour un programme d'inspection basé sur la criticité. L'évaluation concerne les paramètres pertinents affectant la probabilité d'une défaillance ou les conséquences d'une défaillance. Elle permet de positionner chaque réservoir dans une zone du "diagramme de criticité d'un réservoir" développé par l'EFMA.

Tandis que les codes nationaux sont normalement basés sur la fixation de limite maximum pour la périodicité d'inspection interne, le diagramme donne des moyens d'évaluer la criticité des réservoirs. Il est possible d'identifier ceux qui présenteraient le plus fort potentiel de risque, pour lesquels un programme d'amélioration serait requis et pour lesquels la période entre deux inspections pourrait être réduite et l'étendue des contrôles augmentée.

Le diagramme de criticité est basé sur les techniques de l'Inspection Basée sur la Criticité, adaptées et développées afin de répondre aux spécificités de l'inspection des réservoirs d'ammoniac.

Dans le cadre d'une inspection par l'intérieur, cette criticité détermine directement la périodicité d'inspection des réservoirs. Les réservoirs les plus sûrs sont inspectés moins souvent. Cela présente l'inconvénient majeur de multiplier les arrêts d'exploitation et donc le risque d'initier des phénomènes redoutés pour les réservoirs.

Unifa

Pour l'inspection par l'extérieur cette périodicité servira de base à la définition de l'étendue de chaque contrôle de façon à atteindre sur la période la même étendue que précédemment.

Le détail du processus d'évaluation est donné en annexe 2. Il s'appuie sur un questionnaire couvrant les facteurs relatifs à la probabilité et aux conséquences d'une défaillance selon le découpage suivant :

Probabilité d'une défaillance :

- 1- problème relatif à la CFT :
 - a. oxygène et eau contenus dans l'ammoniac,
 - b. propriétés mécaniques des matériaux de base et des soudures,
 - c. connexions des tuyauteries,
 - d. problématique d'inspection,
 - e. réparations.
- 2- Autres mécanismes de dégradations :
 - a. corrosion externe,
 - b. dommages mécaniques,
 - c. fatigue à faible nombre de cycles,
 - d. rupture fragile,
 - e. autres.
- 3- problématiques opérationnelles :
 - a. procédures de mise et de remise en ou hors exploitation (purge, inertage, vitesse de refroidissement)
 - b. retour d'expérience opérationnel

Conséquences d'une défaillance :

1. Risque de mise à l'atmosphère d'ammoniac et sécurisation externe du réservoir (conception du réservoir, murs de rétention,...)
2. Caractérisation mécanique du réservoir en terme de fuite avant rupture.
3. Localisation du réservoir (proximité de la population ou proximité d'eau).

Les critères de l'évaluation sont affectés d'un coefficient dépendant de l'influence respective des différents facteurs et le nombre total des points est calculé aussi bien pour la probabilité de défaillance que pour les conséquences d'une défaillance. Ces nombres de points sont à transposer sur les axes des X et des Y du diagramme de criticité, ils permettent de positionner chaque réservoir dans une zone de criticité et d'en déduire des exigences plus ou moins grandes en terme d'intervalle d'inspection.

5.3. Calcul de l'intégrité structurale.

Le but principal du calcul de l'intégrité structurale est de déterminer les dimensions maximales admissibles pour des défauts situés à des emplacements précis de la paroi du réservoir. Les emplacements pertinents et l'orientation des défauts pris en compte dans les calculs sont définis en annexe 3 d'après l'expérience et la théorie de la corrosion sous tension.

La mise en œuvre d'études de mécanique de la rupture demande un haut niveau d'expertise technique et d'expérience pratique. Un grand soin doit être apporté à la sélection des personnes devant effectuer ce travail. Elles doivent avoir les connaissances voulues. Elles doivent en particulier être capables d'estimer l'influence de certaines imprécisions des données, malheureusement inévitables, sur la précision des calculs et la validité des résultats.

En pratique ces calculs sont habituellement entrepris quand une ou plusieurs des raisons suivantes sont à satisfaire :

1. Justifier l'utilisation de méthodes de CND sans accès direct aux surfaces intérieures à partir de l'extérieur du réservoir pour rechercher la présence éventuelle de défauts débouchant en surface interne (cas de la CFT).
2. Evaluer la criticité estimée du réservoir sur le diagramme IBC.
3. Justifier qu'en cas de propagation d'un défaut, le mode de rupture serait de type fuite avant rupture (leak before failure, LBF)
4. Renforcer la confiance dans les méthodes d'inspection, leur champ d'application et leur périodicité.
5. Estimer la criticité de défauts détectés lors d'inspection interne ou externe.

Des codes reconnus de mécanique de la rupture, tels que BS 7910 : 1999 [méthode de niveau 2] doivent être utilisés pour le calcul de la taille maximale acceptable pour les défauts ainsi que la longueur du défaut traversant acceptable. A partir de ce dernier élément il est possible de prévoir le mode de défaillance le plus probable (Leak Before Failure – Fuite avant Rupture ou Failure Before Leak – Rupture avant Fuite) pour les différents emplacements sélectionnés.

Les données requises pour les calculs de mécanique de la rupture doivent être définies pour tous les emplacements retenus et pour les orientations de défaut pertinentes. Une des données principales pour ces calculs est la contrainte entraînée par la charge hydrostatique d'ammoniac liquide en exploitation. Il est aussi utile d'estimer les contraintes résiduelles de soudage relaxées lors du premier test hydraulique, l'effet bénéfique de cette opération pouvant être pris en compte dans le calcul des tailles de défauts acceptables. Les autres données clés nécessaires sont la résistance au choc ou énergie d'impact Charpy, la limite élastique et la limite de rupture des matériaux des tôles et des soudures. En l'absence des caractéristiques de ténacité, ces données peuvent être déduites des valeurs connues de test Charpy suivant des méthodes détaillées dans le BS 7910.

Il est utile de présenter les résultats des calculs de mécanique de la rupture en portant sur un graphe la profondeur acceptable d'un défaut par rapport à sa longueur pour chacune des orientations de défaut et chacun des emplacements retenus. Cette présentation aide l'interprétation des résultats et par conséquent facilite le processus de décision.

Cas des réservoirs à double paroi acier

Le calcul de l'intégrité structurale de la paroi externe doit être réalisé de la même façon que pour les réservoirs à simple paroi dans le même but de déterminer la taille des défauts acceptables.

Mais il faut également calculer la tenue de la paroi externe en cas de défaillance de la paroi interne. Ce calcul doit être effectué pour une rupture brutale de la paroi interne en prenant en compte l'effet de vague qui peut en résulter. Ces calculs doivent être réalisés par des spécialistes reconnus.

5.4. Inspection depuis l'intérieur du réservoir

La plupart des inspections de réservoir d'ammoniac ont été effectuées depuis l'intérieur du réservoir. Les méthodes d'inspection utilisées sont en général des contrôles par magnétoscopie. En outre, des contrôles de l'épaisseur des tôles de fond et de virole, ainsi que des tests d'étanchéité par boîte à vide sont recommandés. Les contrôleurs non destructifs sont qualifiés conformément à la norme EN 473.

L'ampleur des inspections doit dépendre des résultats obtenus et suivre une approche par étape comme proposée dans la table ci-après. Si aucun défaut significatif n'est identifié dans l'étape 1, ceux-ci sont suffisants pour considérer le réservoir exempt de fissures critiques. Si des défauts sont trouvés lors de l'étape 1 et ne peuvent pas être expliqués en tant que défauts insignifiants de fabrication, il est nécessaire d'étendre le contrôle à l'étape 2.

De la même façon en cas de découverte de défaut significatifs lors de l'étape 2 le contrôle doit être étendue à l'étape 3.

Zone	Etape 1	Etape 2	Etape 3
Soudures des tôles de fond	100%		
Soudure marginale	100%		
Soudures verticales des viroles de premier niveau coté fond	50%	100%	
Noeuds des soudures des viroles de premier et deuxième niveau	40%	100%	
Soudures verticales et horizontales des tôles de virole de premier et deuxième niveau	10%	100%	
Noeuds des soudures des tôles de la troisième virole jusqu'au toit	10%	50%	100%
Soudures verticales et horizontales des tôles de la troisième virole jusqu'au toit		10%	100%
Trous d'homme, raccordements de tuyauterie, et autres raccordements.	100%		
Marque des soudures des clamps utilisés lors de la fabrication et autres soudures provisoires de fabrication	10%	100%	
Zones de réparation antérieurs	100%		

La portée du contrôle lors de l'étape 1 doit être considéré comme indicative. Les opérations de mise hors service et de remise en service, de nettoyage et de préparation (comme les échafaudages,...). demandant un temps plus important que les opérations de contrôle, Il peut être opportun d'étendre le programme de contrôle prévu lors de l'étape 1.

Des contrôles de l'épaisseur des tôles de fonds et des tôles de virole, ainsi qu'un contrôle d'étanchéité par boîte à vide des soudures des tôles de fond sont recommandés.

5.5. Inspection non intrusive par l'extérieur du réservoir.

5.5.1 commentaires préalables

Inspection externe

Le suivi et l'inspection externe d'un réservoir et des équipements associés constituent une part très importante du programme complet d'inspection destiné à garantir l'intégrité du réservoir.

Le personnel d'exploitation doit surveiller régulièrement les surfaces extérieures à la recherche de points froids, renflements, fuites et toutes situations inhabituelles. Tout changement et tout événement inhabituel doit être enregistré et examiné en fonction du programme d'inspection.

Des visites externes doivent être réalisées en tant que partie intégrante du programme complet d'inspection par des inspecteurs expérimentés ayant des qualifications appropriées.

Les équipements et composants tels que les soupapes de sécurité, l'isolation, les fondations, les tuyauteries extérieures, l'alimentation électrique et tous les autres équipements importants pour une exploitation sûre, situés dans le périmètre du stockage, doivent faire l'objet d'un suivi et d'une maintenance systématiques et documentés.

Inspection interne

Moyennant le respect de certaines conditions sur lesquelles nous reviendrons plus loin, il est préférable de ne pas procéder à des inspections internes systématiques qui imposeraient de mettre hors service le réservoir. Il faut donc rechercher des méthodes capables de détecter l'apparition de Corrosion Fissurante sous Tension, seule dégradation interne possible, sans pénétrer dans le réservoir. C'est l'objet qui nous intéresse dans les chapitres suivants.

5.5.2 conditions préalables à une inspection par l'extérieur

L'inspection, non-intrusive, des réservoirs de stockage d'ammoniac par l'extérieur peut être effectuée plus régulièrement que l'inspection interne traditionnelle. Cette méthode d'inspection n'affecte pas l'intégrité du réservoir et est plus facile et moins dangereuse à effectuer.

L'inspection par l'extérieur du réservoir devrait être considérée si les conditions suivantes sont réunies :

- 1/ Au moins une inspection interne doit avoir été effectuée et aucune CFT significative ne doit avoir été détectée. Cette première inspection doit permettre de garantir l'absence de CFT aussi bien que des défauts de fabrication originaux. L'étendue des contrôles réalisés doit être au moins conforme à l'étendue des contrôles prévue dans l'étape 1 du paragraphe 5.4.
- 2/Si cette condition préalable n'est pas réalisée, les alternatives suivantes sont possibles :
 - Confirmez l'intégrité du réservoir par une inspection étendue de l'extérieur. Une telle inspection étendue signifie une inspection avec une étendue de contrôle semblable à ce qui est exécutée pendant une inspection interne du §5.4 (à l'exclusion de l'inspection du fond).

- La construction du réservoir doit avoir été correctement documentée, et 100% des nœuds de soudures des trois premières viroles, ainsi que 100% de la soudure marginale doivent avoir été contrôlé par magnétoscopie ou radiographie.
- L'évaluation IBC prévue dans le présent guide place le réservoir dans une zone où la fréquence d'inspection est d'au moins de 10 ans.
- Les calculs structuraux d'intégrité doivent conclure que les tailles tolérables maximum de défaut sont plus grandes que les tailles discernables par le procédé de contrôle qui sera mis en œuvre par l'extérieur.
- Le programme d'inspection doit inclure les accessoires et les équipements connectés avec l'enveloppe métallique du réservoir.

Fond du réservoir

L'inspection par l'extérieur du fond du réservoir du fond de réservoir n'est pas possible dans la plupart des cas par l'absence d'accessibilité. La dégradation du fond du réservoir en service est très peu probable (absence de contrainte mécanique ou thermique). Le tableau ci après fournit les actions préventives souhaitables en service pour les fonds de réservoirs.

Modes de dégradations des tôles de fond du réservoir.

CFT	Le fond est principalement soumis à la pression hydrostatique du liquide. Par conséquent le niveau d'effort au fond est beaucoup plus petit que dans les viroles du réservoir. Ainsi les résultats d'inspection par l'extérieur des viroles sont une représentation du pire des cas pour le fond. Si aucune CFT n'est trouvée dans les viroles, il est très improbable que le fond soit affecté. De plus une inspection par l'extérieure empêche l'entrée de l'oxygène, qui est l'un des préalables à la formation de la CFT.
Corrosion Externe	Le fond du réservoir est isolé, le taux de corrosion externe est négligeable.
Gonflement dû au gel	L'isolation des fondations doit être appropriée et conforme aux préconisations du code de fabrication.
Défauts de fabrication	Quelques défauts et même fissures (à froid) ont été trouvés dans les réservoirs d'ammoniac. Défauts liés à la fabrication. Idéalement la première inspection de réservoir est une inspection interne, pour vérifier le fond. Un contrôle soigné du réservoir (100% des soudures en magnétoscopie) à l'issue de sa fabrication permet de dédouaner ce risque.
Tremblements de terre, mouvement au sol ou mouvement des fondations	La stabilité des fondations du réservoir doit être vérifiée. En cas de zone sismique, la construction du réservoir et de ses fondations doit être adaptée.

La conséquence d'une fuite dans le fond du réservoir sera très limitée. Une fuite formera seulement une petite fuite au fond, cette fuite ne pouvant pas se propager du fait de l'absence de contrainte sur le fond. L'ammoniac s'évaporerait et la fuite serait facilement détectée par l'odeur de l'ammoniac et la formation de la glace.

5.6. Méthodes alternatives

Des méthodes de contrôles non destructifs performantes, mises en oeuvre à partir de l'extérieur, permettant notamment de détecter et localiser des défauts débouchant en surface intérieure, à coeur des tôles et soudures sont maintenant disponibles.

Ces méthodes non-intrusives d'inspection doivent être validées pour les emplacements retenus et applicables jusqu'à $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$. Elles doivent notamment permettre la détection et la caractérisation de défauts plans de taille très inférieure à celle des défauts critiques pour la tenue des parois. Il faut également être en mesure de définir une carte identifiant les zones du réservoir qui doivent être contrôlées par les méthodes homologuées retenues.

Les méthodes d'inspection à partir de l'extérieur ne sont pas encore, à quelques exceptions près, largement utilisées. Citons les méthodes par ultra sons (US), l'émission acoustique (EA), la méthode par signature de champs électrique (F.S.M.). Nous allons les comparer à la magnétoscopie (MT) qui peut être prise pour référence.

Le contrôle par **magnétoscopie** est particulièrement efficace pour détecter des fissures débouchant ou affleurant la surface de la tôle. Sa mise en oeuvre est assez simple. La magnétoscopie est extrêmement sensible et permet de détecter des fissures de quelques millimètres de longueur et de profondeur inférieure au millimètre. Il visualise la fissure détectée et permet d'en mesurer la longueur. La magnétoscopie est particulièrement indiquée pour détecter des fissures de corrosion sous tension de très petite taille. Par contre, La magnétoscopie demande de pouvoir accéder à l'intérieur du réservoir à contrôler. Il ne permet pas de mesurer la profondeur d'une fissure. C'est jusqu'à présent la méthode la plus utilisée dans le domaine qui nous intéresse.

La méthode de contrôle par **émission acoustique** se heurte, pour l'instant, à la difficulté de mettre le réservoir en légère surcharge afin d'entendre et de repérer les fissures par le bruit qu'elles émettent sous l'effet de cette surcharge. En effet, il n'est pas possible de faire monter la pression à l'intérieur des réservoirs car ils ne sont pas conçus pour supporter une pression. La seule charge qu'ils supportent est constituée par la hauteur de liquide qu'ils contiennent et il n'est pas envisageable de les remplir au-delà de leur niveau maximum. Enfin le bruit du remplissage, celui de l'ébullition permanente de l'ammoniac et parfois même celui provoqué par la glace qui peut se trouver sur la paroi nécessitent des traitements très poussés des signaux obtenus au risque de masquer celui émis par les fissures.

Des mesures ont été faites en 1998 sur un stockage exploité par Yara France à Ambès sans pouvoir tirer de conclusions claires de cet essai.

Cependant des sociétés travaillent encore sur le sujet. Ces techniques sont en constant développement. La possibilité d'effectuer des contrôles localisés sans changement des conditions d'exploitation reste à explorer. Il y a une autre application de l'émission acoustique sur les stockages qui nous concernent, c'est la confirmation et la localisation d'une très faible fuite qui surviendrait sur le fond ou la paroi. Cela ne répond pas à notre objectif de détection préventive mais constitue un outil précieux d'investigation dans le cas d'une très faible perte de confinement.

Il faut donc se garder de conclusions hâtives et définitives sur l'Emission Acoustique qui reste une technologie prometteuse.

Le groupe Yara a également travaillé sur une méthode, dite **FSM**, qui consiste à créer un champ électrique dans une zone de la paroi et à surveiller la répartition de ce champ par des électrodes réparties à la surface de la tôle. Les fissures éventuelles sont détectées par la perturbation du champ qu'elles créent. Cette méthode est encore expérimentale. Elle aurait l'avantage de permettre un suivi très régulier voir même continu, les électrodes étant laissées en place sous l'isolant. Par contre, elle peut difficilement porter sur une étendue importante sauf à multiplier les électrodes. Cet inconvénient est cependant limité par la connaissance de la fissuration sous tension en présence d'ammoniac qui permet de choisir une zone représentative. Quoi qu'il en soit, cette méthode doit encore faire ses preuves et reste aujourd'hui expérimentale.

La dernière technique disponible est celle du **contrôle ultra-sonore**. Elle comprend une gamme variée de possibilités. Elle est maîtrisée par de nombreux organismes de contrôle et laboratoires. Un institut britannique mais aussi l'Institut de Soudure ont défini et testé avec succès des procédures qui répondent aux exigences que nous définirons plus loin. Il demande de pouvoir accéder à la surface extérieure de la tôle à contrôler ce qui exige la dépose du calorifugeage à cet endroit. Cela limite, pratiquement, l'étendue des contrôles mais dans une moindre mesure que pour la FSM et le choix des zones contrôlées assure une très bonne représentativité du résultat. L'apparition de givre sur la tôle, une fois l'isolant enlevé, est facilement gérée par pulvérisation localisée des produits antigel qui servent en même temps de coupleur aux capteurs.

C'est donc la méthode qui a été retenue et a déjà été mise en œuvre avec succès en France

5.6.1. Sensibilité de la méthode de contrôle non destructif retenue

5.4.3. Les méthodes de contrôle non destructif retenues doivent avoir une sensibilité qui assure la détection des défauts recherchés avec une marge suffisante par rapport à la taille des défauts critiques. Les calculs de mécanique de la rupture définissent la taille critique des défauts dans chaque zone sensible et permettent de valider ce point.

5.6.2. Etendue des contrôles et probabilité de détection

Deux approches d'inspection sont possibles voire complémentaires :

- inspection d'un pourcentage représentatif des surfaces de chaque type,
- inspection de surfaces sélectionnées parce qu'un endommagement spécifique est susceptible d'y apparaître

La première approche est prépondérante lorsqu'une inspection doit donner une évaluation de l'état général d'un équipement, les contrôles étant élargis si des découvertes ont été faites dans les premières zones inspectées.

Quand le but poursuivi est la détection d'un phénomène particulier comme la corrosion sous tension, il est alors possible de n'inspecter que des zones judicieusement sélectionnées, au droit desquelles le risque d'apparition et d'évolution de défauts éventuels est estimé être le plus élevé.

Le fait que la Corrosion Fissurante sous Tension, lorsqu'elle apparaît, se présente sous forme d'un grand nombre de fissures, localisées dans des zones où les contraintes sont les plus élevées renforce considérablement l'efficacité et la pertinence de cette approche.

Pratiquement le choix des emplacements représentatifs doit prendre en compte les deux aspects.

5.6.3. Conclusions sur les méthodes

Etant donnée les sensibilités minimales requises, les méthodes de contrôle par Ultra Sons sont actuellement les plus performantes, c'est à dire les plus fiables. Elles sont recommandées pour l'inspection en exploitation des réservoirs d'ammoniac à basse température. De telles méthodes ont été homologuées et mises en oeuvre depuis 1999 avec de bons résultats pour l'inspection à partir de l'extérieur des réservoirs exploités par la société Yara France à Montoir et à Ambès.

A l'époque le but poursuivi était de porter de 10 à 15 ans l'intervalle entre deux inspections internes. L'essentiel de l'argumentaire et des méthodes de contrôle était déjà établi. Les DRIRE concernées ont validé ce dispositif après en avoir fait valider la pertinence par un tiers expert, l'Institut de Soudure en l'occurrence. Cette validation s'est traduite par une recherche bibliographique sur les modes de dégradation potentiels en présence d'ammoniac anhydre, par une approbation des calculs de mécanique de la rupture et par la mise au point et l'évaluation du contrôle par ultra-sons.

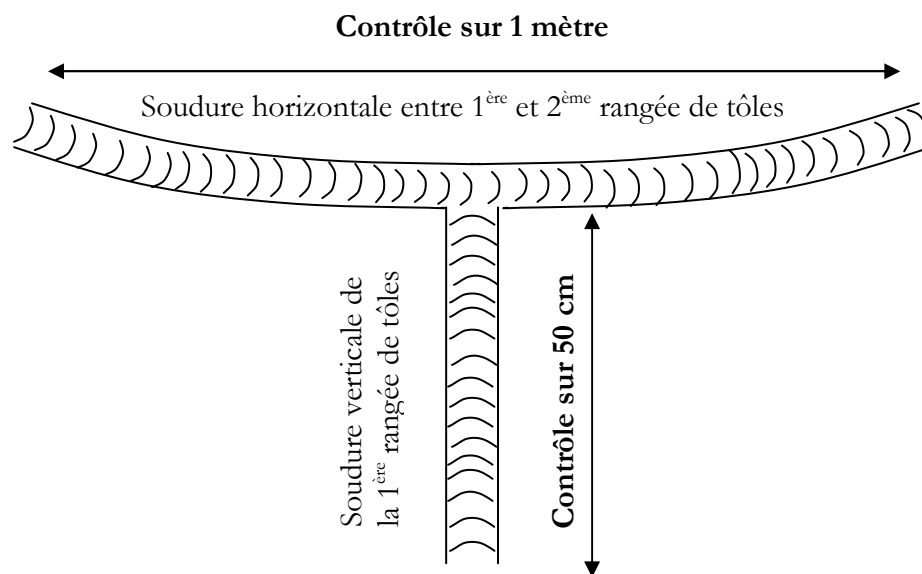
5.7. Taille, nombre et localisation des zones à inspecter

Le nombre de secteurs à inspecter dépend d'un certain nombre de facteurs tels que la taille du réservoir, et de ses précédentes inspections. Les zones inspectées sont choisies pour être représentatives des soudures critiques. Le programme d'inspection doit être adapté à l'historique de l'équipement.

L'inspection du réservoir doit prendre en compte deux contraintes : l'inspection d'un pourcentage représentatif par type de soudure du réservoir, et l'inspection de secteurs spécifiques où un phénomène spécifique de CFT peut se produire.

Les zones choisies pour la réalisation des contrôles sont les zones où les conditions pour le déclenchement de la CFT sont les plus favorables mais aussi dans les zones où la survenue de la CFT aurait les conséquences les plus graves.

Le nombre des zones à inspecter dépend de la dimension des réservoirs. Il est proposé une disposition qui donne une sélection représentative des soudures critiques et des zones où ont été trouvées des fissures dans certains réservoirs. La sélection comprendra des emplacements couvrant les nœuds de soudures dans la première rangée de virole et 50 cm dans chacune des directions à partir du T.



Croquis d'une zone à inspecter

Plusieurs zones stables et prédéfinies doivent être contrôlées lors de chaque inspection afin de déceler une éventuelle évolution ou l'apparition de défauts mais il est possible également de contrôler une ou plusieurs zones à des emplacements différents ce qui étend le champ des zones contrôlées du réservoir.

5.8. Planning d'inspection

L'intervalle entre deux inspections faites à partir de l'extérieur sera défini selon la position du réservoir sur le diagramme de criticité présenté dans le paragraphe 5.2. L'intervalle pourra être beaucoup plus court que celui séparant deux inspections internes conventionnelles. Les périodicités des contrôles par ultrasons, faits à partir de l'extérieur, pourront être de 3 à 5 ans par exemple. L'inspection par l'extérieur doit permettre de couvrir dans l'intervalle d'inspection recommandé en annexe 2, les mêmes pourcentages de zones de contrôles que ceux prévus au tableau du chapitre 5.4, en dehors des tôles de fond.

5.9. Traitement des observations et actions correctives

Toutes les indications doivent être identifiées, documentées et évaluées. Le type, la taille et l'orientation doivent être déterminés et comparés aux critères d'acceptation correspondants.

5.10. Traitement des cas spécifiques

Si nécessaire, un calcul spécifique est mené pour déterminer si certains défauts peuvent être acceptés. Ces défauts doivent être bien documentés pour les inspections ultérieures.

Une extension du champ des contrôles peut être décidée pour vérifier la présence éventuelle d'autres défauts de même type.

Un programme d'inspections complémentaires avec des périodicités réduites peut être décidé pour suivre une éventuelle évolution des défauts.

Dans l'impossibilité de garantir la non-dangereuse potentielle d'un défaut, une inspection interne pourra être entreprise après débat avec les autorités de tutelle.

Dans ce cas, les recommandations du guide EFMA pour les manœuvres d'arrêt puis de remise en service seront scrupuleusement respectées afin de limiter autant que possible les effets sur l'intégrité du réservoir.

Si des réparations par soudage doivent être faites, les procédures doivent être homologuées avant mise en œuvre. Il est notamment recommandé d'utiliser, autant que faire se peut, des métaux d'apport permettant de garantir des valeurs de résiliences et ténacités des soudures et des zones affectées les plus élevées possibles.

Une réparation non optimisée pouvant augmenter le risque d'apparition de fissures, les zones qui ont fait l'objet de réparation doivent faire l'objet d'un suivi particulier. Enfin, d'autres mesures peuvent être prises telles que la limitation du volume stocké c'est-à-dire du niveau maximum de liquide. Les contraintes maximales induites sont ainsi réduites.

5.10.1. Comptes-rendus

Tous les rapports d'inspection d'un réservoir doivent au minimum comprendre les éléments suivants :

1. Identification du réservoir et informations sur les matériaux, métaux d'apport, etc.
2. Date de l'inspection et temps écoulé depuis la dernière inspection
3. Zones inspectées (plan, dessin, description)
4. Plan de repérage des défauts des précédentes inspections, réparés ou non réparés (défauts de construction)

5. Méthodes d'inspection
6. Qualification du ou des inspecteurs/contrôleurs
7. Qualification de la méthode d'inspection/contrôles
8. Référence aux rapports d'évaluation et au plan d'inspection
9. Indications avec un plan où les détails sont reportés. Evaluation et documentation des défauts enregistrés
10. Révision du plan d'inspection (si nécessaire)
11. Conclusions, recommandations, préconisations pour les futures inspections et actions de maintenance.

5.10.2. Autres actions d'inspection

L'inspection d'un réservoir doit être complétée par d'autres actions de suivi et de contrôle d'exploitation afin de garantir que les accessoires de sécurité, les vannes, les piquages, les supportages, etc. sont maintenus en bon état.

Ces inspections et contrôles ont leur propre périodicité, ils doivent être documentées.

Ils couvriront l'ensemble des équipements critiques.

L'ensemble des actions d'inspection, de contrôle, de suivi quotidien en exploitation constitue le système de sécurité du stockage.

Contrôles d'exploitation

Ils comprennent notamment :

- La supervision continue des paramètres d'exploitation et des détecteurs d'ammoniac
- Les visites régulières (journalières, mensuelles, etc.) sur le site avec un contrôle visuel des équipements et des installations
- Les essais de fonctionnement réguliers (6 mois, 1 an, etc.) de certains équipements de sécurité (vanne de pied de tank, vannes automatiques en ligne, etc.)

Maintenance préventive

Elle comprend :

- La maintenance des capteurs d'ammoniac (6 mois*)
- Le contrôle des équipements électriques, mise à la terre, paratonnerres, etc. (1 an*)
- Le contrôle des équipements de mesure et de régulation (niveau, pression, température, etc.) (1 à 2 ans*)
- La maintenance des équipements de maintien en froid (3 ans*)
- La révision et le tarage des accessoires de sécurité (5 ans*)

Contrôles et inspections spécifiques

Ils comprennent :

- Le contrôle visuel des réservoirs, des équipements et de la rétention (6 mois à 1 an*)
- L'inspection des fondations en béton avec relevé altimétrique (1 à 3 ans*)
- Les contrôles par Ultra Sons des portions de soudures portées dans le plan d'inspection (3 à 5 ans*)
- Le contrôle thermographique de l'isolation (3 à 5 ans*)
- Le contrôle des piquages et des vannes de pied de réservoir (5 à 10 ans*)
- Le contrôle de boulons d'ancrage (10 ans*)

Unifa

- Le contrôle visuel de la tôle extérieure du réservoir à différents emplacements après décalorifugeage localisé (5 à 10 ans*)
- L'inspection des tuyauteries et des supports dans l'enceinte du stockage (5 à 10 ans*)
- Cette liste est indicative. Elle doit être adaptée à chaque stockage selon sa conception, son procédé, son environnement et les caractéristiques locales.

* : Les périodicités sont également indicatives. Elles doivent être définies pour chaque stockage. L'évaluation du risque est un des principaux éléments à prendre en compte.

Chaque exploitant doit disposer et tenir à jour une documentation complète du réservoir :

- dossier d'origine
- historique
- liste des actions de suivi spécifiques à chaque réservoir
- étude IBC, calculs de mécanique de la rupture
- plan d'inspection et ses révisions justifiées
- courriers échangés avec les administrations de tutelle
- échéanciers mis à jour des actions de suivi, d'inspection et de contrôles
- rapports des inspections, PV des contrôles, CR de maintenance
- documents attachés aux interventions

5.11. Tableau récapitulatif des modes de dégradation, méthodes d'inspection et solutions techniques

Le tableau qui suit définit, pour chaque élément constitutif d'un réservoir de stockage, les modes potentiels de dégradation, leurs origines, le type de dégradation constaté puis les méthodes d'inspection permettant de les détecter et enfin les remèdes et actions en cas de découverte.

Modes Potentiels de Dégradation	Origines de la Dégradation	Types de Dégradation / Constats	Méthodes d'Inspection	Remèdes Actions
RESERVOIR				
Virole				
Fissuration à froid des soudures montantes	Procédure de soudage non respectée strictement lors de la construction	Fissures transverses sur les cordons de soudure et en Zone Affectée Thermiquement Pas de propagation en métal de base	Contrôle par ultra sons sur zones témoin, suivant méthode homologuée	- Point zéro - Comparaison par rapport aux défauts critiques calculés
Fissuration à froid des soudures circulaires	Procédure de soudage non respectée strictement lors de la construction	Fissures transverses et longitudinales sur les cordons de soudure en Zone Affectée par la Température Pas de propagation en métal de base	Contrôle par ultra sons sur zones témoin, suivant méthode homologuée	- Point zéro - Comparaison par rapport aux défauts critiques calculés
Corrosion Fissurante sous Tension	A la fois milieu, matériau et contraintes	Grand nombre de fissures de profondeur limitée Très peu probable	Contrôle par ultra sons sur zones témoin, suivant méthode homologuée	Suivi périodique
Corrosion extérieure de la tôle sous frigorifuge	Rétention d'eau sous frigorifuge - partie basse : risque négligeable - partie haute : peu probable sauf détérioration notable du frigorifuge	- jamais constaté (-33°C) - Risque de corrosion superficielle au droit du frigorifuge détérioré	Contrôle par thermographie Zones témoin visitées Contrôle par examens visuels	- Suivi périodique - Remise en état du frigorifuge

MODES POTENTIELS DE DEGRADATION	ORIGINES DE LA DEGRADATION	TYPES DE DEGRADATION/ CONSTATS	METHODES D'INSPECTION	REMEDES ACTIONS
Corrosion extérieure des piquages sous frigorifuge	Rétention d'eau sous frigorifuge - partie basse : risque négligeable - partie haute : peu probable sauf détérioration notable du frigorifuge	Risque de corrosion superficielle au droit du frigorifuge détérioré	Contrôles visuels, mesures d'épaisseur et défrigorifugeages locaux	- Suivi périodique - Remise en état du frigorifuge
Fissuration des soudures : - TH/virole - piquages/virole - selles de renfort/virole	- Procédure de soudage non respectée strictement lors de la construction - sollicitations externes	Fissures des cordons de soudures et des Zones Affectées thermiquement Pas de propagation en métal de base	Contrôle magnétoscopique de zones témoin, suivant méthode homologuée	- Point zéro - Suivi périodique - si nécessaire, recherche de fuite au travers du trou de dégazage des selles de renfort
Toit				
Corrosion extérieure des tôles sous frigorifuge	Rétention d'eau sous frigorifuge Peu probable sauf détérioration notable du frigorifuge	Risque de corrosion superficielle au droit du frigorifuge détérioré	Zones témoins visitées (en particulier en périphérie) Contrôle par examen visuel	- Suivi périodique - si nécessaire contrôle thermographique - Remise en état du frigorifuge et du revêtement
Corrosion extérieure des piquages sous frigorifuge	Perte d'étanchéité du frigorifuge au niveau des piquages	Risque de corrosion superficielle au droit du frigorifuge détérioré	Piquages visités Contrôle par examen visuel et mesures d'épaisseurs si nécessaire	- Suivi périodique - Remise en état du frigorifuge et du revêtement
Fond				
Fissuration à froid soudure virole/fond	Procédure de soudage non respectée strictement lors de la construction	Fissures des cordons de soudures et des Zones Affectées thermiquement Pas de propagation en métal de base	Contrôle par ultra sons sur zones témoin, suivant méthode homologuée	- Point zéro - Suivi périodique
Fissuration des soudures à clin	Dilatation relative en phase transitoire non reprise uniformément sur l'ensemble des soudures	Fissures des soudures à clin lors des phases d'arrêt et de remise en service	Détection de fuite par capteurs ammoniac	- si nécessaire, validation et suivi par émission acoustique - Procédure de réchauffage et de refroidissement maîtrisée
Corrosion extérieure sous le fond	Négligeable	Jamais constatée à – 33°C		

MODES POTENTIELS DE DEGRADATION	ORIGINES DE LA DEGRADATION	TYPES DE DEGRADATION/ CONSTATS	METHODES D'INSPECTION	REMEDES ACTIONS
Ancrages				
Fissuration à froid des soudures platines/virole	Procédure de soudage non respectée strictement lors de la construction	Limitée à la ZAT des soudures Pas de propagation en métal de base	Contrôle magnétoscopique de zones témoin, suivant méthode homologuée	- Suivi périodique
Liaison par goujons	Concentration de contraintes	Amorce de fissures en fond de filet	- Sondage au marteau - Contrôle par ultra sons de goujons témoin	- Suivi périodique - action de maintenance si nécessaire
GENIE CIVIL SOUS RESERVOIR, ESPACE ANNULAIRE				
Tassement de la galette sous réservoir	Mouvement de sol	Contraintes possibles sur piquages, tuyauteries et robinetterie	Vérification périodique des tassements différentiels	
Tassement du mur de protection	Mouvement de sol	Contraintes possibles sur piquages, tuyauteries et robinetterie	Vérification périodique des tassements différentiels	Assurer le libre passage des tuyauteries au travers du mur
Dysfonctionnement du chauffage de la galette	Défaillance alimentation électrique	Gel du sol sous fondations	Vérification périodique du bon fonctionnement	Remise en état
TUYAUTERIE ROBINETTERIE				
Corrosion tuyauteries sous frigorigé	Peu probable sauf détérioration du frigorigé	Risque de corrosion au droit du frigorigé détérioré	Défrigorigéage Contrôles visuels, mesures d'épaisseur	Remise en état des frigoriges et si nécessaire des tuyauteries
Fuite aux joints sur tuyauteries ou accessoires dans espace annulaire	Tassement différentiel, défaillance d'un joint	Evaporation confinée dans l'espace annulaire	Détection par capteurs NH3	Changement des joints ou resserrage liaisons
Blocage des lignes	Dysfonctionnement au droit des supports		Examen visuel	Remise en état des supports
Robinetterie	Défauts d'origine de compacité de soudage (conception mécano- soudée)		- Contrôle par radiographie - Contrôle par magnétoscopie	

ACCESSOIRE DE SECURITE

Les accessoires de sécurité (soupapes, casses-vide, IPS, ...) font l'objet d'un suivi périodique (vérification, retarage, ré-étalonnage). Ils peuvent être déposées et subir une révision complète.

5.12. Vérification de l'état initial d'un réservoir

Le tableau des modes potentiels de dégradation fait apparaître à plusieurs reprises des défauts venant de la construction des réservoirs. C'est le but du suivi de la construction ou inspection initiale que de détecter et de corriger ces défauts avant la mise en service de l'ouvrage. Ce ne devrait plus être une préoccupation durant l'exploitation du stockage.

Force est de reconnaître que ces défauts d'origine constituent l'essentiel des découvertes effectuées lors des contrôles internes des réservoirs. Leur nombre est heureusement très limité. Le risque de les voir évoluer est extrêmement faible, seules des sollicitations alternées le pourraient et nous avons vu que ce risque n'était pas à craindre. Il n'en reste pas moins que les contrôles internes habituels par magnétoscopie constituent une garantie complémentaire de celles obtenues par le contrôle initial. La technique de la magnétoscopie apporte vraisemblablement une vue différente qui permet ce supplément d'information. C'est surtout vrai pour les réservoirs les plus anciens dont le contrôle initial ne faisait pas appel à cette technique.

Le contrôle par l'extérieur est susceptible de détecter également ce genre de défaut. Par contre, son étendue est inévitablement plus restreinte. Il ne peut pas à lui seul constituer un point zéro complet et encore moins compléter une inspection initiale jugée insuffisante. Il est recommandé de faire un premier contrôle par l'extérieur très étendu.

5.13. Elaboration des procédures d'inspection par l'extérieur

L'élaboration des procédures doit comporter au minimum les étapes suivantes :

1. Caractérisation des types, localisations, orientations, dimensions critiques des défauts à détecter (approche IBC, calcul de mécanique de la rupture,...),
2. Sélection des portions de soudures les plus critiques,
3. Choix des méthodes les plus sensibles pour le contrôle par l'extérieur,
4. Homologation des méthodes de contrôles, des personnels chargés de mettre en oeuvre et interpréter les contrôles,
5. Définition des localisations, étendues et périodicités des contrôles.

Comme exposé précédemment nous préconisons de rester le plus proche possible des étendues et localisations définies lors d'un contrôle par l'intérieur, ce qui englobe les zones où la probabilité de présence de CFT est la plus forte celles où des fissures éventuelles seraient les plus critiques pour l'intégrité du réservoir. C'est à dire les endroits où la taille maximum acceptable pour un défaut est la plus faible.

6. CONCLUSION

La nature et la quantité de produit stocké dans les réservoirs cryogéniques d'ammoniac, existant en France, imposent un suivi régulier de ces équipements. Leur classement dans la nomenclature des installations classées ne laisse aucun doute à ce sujet. Cela implique des règles d'exploitation, de maintenance, un Système de Gestion de la Sécurité mais aussi un contrôle technique périodique de l'état des installations de stockage y compris le réservoir proprement dit (contrôle habituellement désigné par le terme d'inspection). C'est ce dernier point qui a fait l'objet du présent document.

L'exploitation usuelle de ces réservoirs ne les soumet pratiquement à aucun mode de dégradation. La température de - 33°C à laquelle est stocké l'ammoniac ne permet pas aux corrosions extérieures de se développer. Les cycles de remplissage et de vidange sont trop peu fréquents pour que des phénomènes de fatigue soient à craindre. La Corrosion Fissurante sous Tension en présence d'ammoniac à - 33°C est très rare et de plus elle est peu évolutive. Tous les contrôles effectués en France sur ce type de réservoir ont souvent révélé quelques défauts d'origine non évolutifs mais jamais aucune fissure de corrosion fissurante sous tension. Elle ne peut cependant pas être complètement exclue.

Cela justifie une inspection périodique capable de détecter son apparition sur la paroi interne des réservoirs.

Cette inspection se fait habituellement en arrêtant l'exploitation du réservoir. Cela demande de l'inertiser, de le réchauffer, de le mettre à l'atmosphère puis, une fois les contrôles magnétoscopiques effectués, de le remettre en ammoniac et de le refroidir à - 33 °C. Toutes ces opérations doivent être conduites avec beaucoup de soin car elles créent les conditions d'apparition de toutes les dégradations possibles sur ces ouvrages entre autre la Corrosion Fissurante sous Tension.

Force est de constater que l'inspection interne augmente le risque d'apparition des phénomènes qu'elle a pour mission de détecter. Cela légitime pleinement la recherche d'une technique d'inspection praticable à partir de l'extérieur sans nécessité d'arrêt de l'exploitation.

L'Unifa recommande de procéder à des contrôles ultra sonores sous réserve de satisfaire aux conditions suivantes :

- Avoir effectué une évaluation de la criticité du réservoir concerné suivant annexe 2 concluant que le réservoir n'est pas en zone rouge du diagramme de criticité,
- Avoir, au moins, procédé à une inspection étendue du réservoir par magnétoscopie suivant extension définie par l'arrêté du 9 octobre 1980 soit avant la mise en service, soit depuis le début de l'exploitation,
- Avoir effectué des calculs de mécanique de rupture qui garantissent que la taille critique des défauts potentiels est nettement inférieure à celle détectable par la méthode retenue,
- Avoir vérifié la tenue de l'enveloppe extérieure en cas de rupture de la paroi interne pour les réservoirs à double paroi acier
- Pouvoir conclure, au vu des calculs de mécanique de la rupture, que le réservoir a une bonne probabilité d'être en situation de "fuite avant rupture",
- Disposer d'une procédure de contrôle par ultra sons, approuvée par un organisme compétent, cohérente avec les résultats de mécanique de la rupture,
- Avoir établi un plan d'inspection pour l'ensemble du stockage

Ces conditions étant respectées, l'inspection d'un réservoir de stockage sans arrêt de son exploitation donnera un niveau de sécurité au moins équivalent et vraisemblablement supérieur à celui obtenu par les visites internes pratiquées jusqu'à présent.

Unifa

L'intégration de ces contrôles par l'extérieur dans un plan d'inspection global regroupant toutes les opérations de suivi périodique et prenant en compte tous les composants du stockage renforce encore la sécurité des ouvrages et constitue donc un progrès indéniable.

La nécessité de devoir vider et ouvrir un réservoir n'est jamais exclue. Cette opération ne se fera qu'en dernier recours. Elle devra être menée avec le plus grand soin de façon à ménager des transitions très progressives entre les conditions d'exploitation et celles de visite. Ces occasions doivent être mises à profit pour réaliser les inspections internes.

Le 7 juillet 2008

ANNEXES

Annexe 1

Bibliographie sur les endommagements potentiels des réservoirs cryogéniques de stockage d'ammoniac

Annexe 2

Questionnaire et mode opératoire d'évaluation de la criticité d'un réservoir

Annexe 3

Configurations des fissures potentielles à évaluer par un calcul de mécanique de la rupture

Annexe 4

Relation entre les teneurs en eau et en oxygène pour éviter la Corrosion Fissurante sous Tension en présence d'ammoniac

Annexe 1

Bibliographie sur les endommagements potentiels des réservoirs cryogéniques de stockage d'ammoniac

1. Chemical Industry Association (UK). *Guidance for the large scale storage of fully refrigerated anhydrous ammonia in the UK*. June 1997.
2. Seveso Directive 2003/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2003 amending Council Directive 96/82/EC on the control of major-accident hazards involving dangerous substances. OJ L 345 Of 31 December 2003 pages 97-105.
3. API 620 R: *Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks*.
4. EN 14620 series: *Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0°C and -165°C*. (Replaces BS 7777-1: Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service).
5. R. A. Selva and .M. Dickson. *On the structural integrity of a refrigerated liquid ammonia storage tank at Norsk Hydro Fertilizers Ltd, NV*. Report SS/870305'/RAS, April 1987.
6. R. Nyborg, P. E. Drønen and L. Lunde. *Stress Corrosion Cracking in Low Temperature Ammonia Storage Tanks*. AIChE Ammonia Safety Symposium, Vancouver, 1994.
7. R. Nyborg, L. Lunde and M. Conley. *Integrity of Ammonia Storage Vessels – Life Prediction Based on SCC Experience*. Material Performance, November 1991, p. 61 ff.
8. J. R. Byrne, F. E. Moir and R. D. Williams. *Stress Corrosion in a Fully Refrigerated Ammonia Storage Tank*. AIChE Safety in Ammonia Plants and Related Facilities Symposium, Denver 1988.
9. M. Appl, K. Fässler, D. Fromm, H. Gebhardt and H. Portl. *New Cases of Stress Corrosion Cracking in Large Atmospheric Ammonia Storage Tanks*. AIChE Safety in Ammonia Plants and Related Facilities Symposium, San Fransisco 1989.
10. R. A. Selva and A. H. Heuser. *Structural Integrity of a 12,000-Tonne Refrigerated Ammonia Storage Tank in the Presence of Stress Corrosion Cracks*. AIChE Safety in Ammonia Plants and Related Facilities Symposium, San Fransisco 1989.
11. S.B. Ali and R. E. Smallwood. *Inspection of an Anhydrous Ammonia Atmospheric Pressure Storage Tank*. AIChE Safety in Ammonia Plants and Related Facilities Symposium, San Diego 1990.
12. R. Nyborg and Liv Lunde. *Measures for Reducing Stress Corrosion Cracking in Anhydrous Ammonia Storage Tanks*. AIChE Ammonia Safety Symposium, Vancouver, 1994.
13. M. Walter and R. Lesicki. *Measures taken to ensure safe operation of ammonia storage tank*. Ammonia Technical Manual 1998, p. 127 ff.
14. L. Lunde and R. Nyborg. *Stress Corrosion Cracking of Carbon Steel Storage Tanks for Anhydrous Ammonia*. Proceedings of the International Fertiliser Society, York, UK. No. 307, 1991.
15. S. Hewerdine. *Ammonia Storage Inspection* Proceedings of the International Fertiliser Society, York, UK No. 308, 1991.
16. L. Lunde, R. Nyborg and P. E. Drønen. *Control of Stress Corrosion Cracking in Liquid Ammonia Storage Tanks*. Proceedings of the International Fertiliser Society, York, UK No. 382, 1996.

17. EFMA Meeting (Internal), European ammonia storage meeting Proceedings, Oslo, November 1999.
18. AIChE 50 years proceedings CD-ROM, 2005
19. BS 7910: *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. July 2005, ISBN: 0580459659.
20. EN 13445-2:2002/A2:2006: *Unfired pressure vessels - Part 2: Materials*
21. API 579: *Recommended Practice for Fitness-For-Service and Continued Operation of Equipment*.
22. EN 473: *Non-destructive testing. Qualification and certification of NDT personnel*.

Annexe 2

Questionnaire et mode opératoire d'évaluation de la criticité d'un réservoir.

1 Caractéristique des produits d'apport de soudage pour la construction d'un réservoir de stockage d'ammoniac :

STRENGTH LEVEL	TYPE OF WELDING CONSUMABLES	STANDARD/ GRADE/ DESIGNATION	TYPICAL YIELD STRENGTH in MPa	TYPICAL TENSILE STRENGTH in MPa
“LOW” STRENGTH	SMAW	AWS E60xx	min. 331	min. 414
	FCAW	AWS E6xT-x	min. 345	min. 428
	SAW	AWS F6x-Exxx	min. 330	415-550
	SMAW, FCAW and SAW	EN E 38 x x x x	min. 380	470-600
“MEDIUM” STRENGTH	SMAW	AWS E70xx	min. 390	min. 480
	FCAW	AWS E7xT-x	min. 414	min. 497
	SAW	AWS F7x-Exxx	min. 400	480-650
	SMAW, FCAW and SAW	EN E 42 x x x x	min. 420	500-640
“HIGH” STRENGTH	SMAW	AWS E80xx	min. 460	min. 550
	SMAW, FCAW and SAW	EN E 46 x x x x	min. 460	530-680

SMAW : soudage par électrodes enrobées

SAW : soudage sous flux en poudre

FCAW : soudage semi automatique en fil fourré

2 Matrice de Criticité probabilité de défaillance / conséquence :

RISK MATRIX						
Consequence of Failure	81 - 100					RED High risk Immediate mitigation actions shall be taken
	61 - 80					ORANGE Medium High risk Limited inspection interval, maximum 5 - 10 years
	41 - 60					YELLOW Medium risk Average inspection interval, maximum 10 - 15 years
	21 - 40					GREEN Low risk Extended interval, maximum 15 - 20 years
	0 - 20					DARK GREEN Very Low risk Extended interval, 20-25 years
		0 - 24	25 - 36	37 - 48	49 - 60	61 - 100
		Probability of Failure				

Zone verte foncée (DARK GREEN) : elle correspond a une situation idéale au vu de l'état de l'art actuel, les risques sont très faibles. Un intervalle d'inspection de 20 à 25 ans est préconisé.

Zone verte claire (GREEN) : elle correspond à une situation très bonne, les risques sont faibles. Un intervalle d'inspection de 15 à 20 ans est préconisé.

Zone jaune (YELLOW) : elle correspond à une situation bonne, les risques sont faibles. Un intervalle d'inspection de 10 à 15 ans est préconisé.

Zone orange (ORANGE) : elle correspond à une situation moyenne. La conception du réservoir ou ses conditions d'exploitation nécessite une plus grande fréquence d'inspection. Un intervalle d'inspection de 5 à 10 ans est préconisé.

Zone rouge (RED) : elle correspond à une situation où le réservoir n'est pas dans les conditions habituelles préconisées par les règles de l'art. La conception du réservoir ou ses conditions d'exploitation nécessite une plus grande fréquence d'inspection. Un programme d'amélioration du réservoir doit être mis en œuvre.

3 Questionnaire d'évaluation d'un réservoir:

Identification du réservoir :

Société	
Site	
Identification du Réservoir	
Dernière inspection	
Intervalle entre deux inspections	

Probabilité de défaillance :

La probabilité de défaillance est la somme des probabilités de défaillance liées à la CFT, aux autres mécanismes de dégradations et aux conditions opératoire (les points obtenus sont donc à sommer pour déterminer la position d'un réservoir sur la matrice).

Probabilité du risque de Corrosion Fissurante sous Tension :

1				Points Possible	Points	Facteur	Total	% of total
1-1	Oxygène et teneur en eau				0	2	0	0%
	Il y a-t-il une teneur en eau garantie supérieur à 0,2% si oui le nombre de point est de 0 si non il faut répondre aux questions suivantes			0				
	Est-ce que le rapport eau / oxygène est dans la zone de sécurité définie dans l'annexe 4., si non, le nombre de point est de 10, si oui il faut répondre aux questions suivantes			10				
	Fréquence du suivi de la teneur en Oxygène et Eau de l'ammoniac (notamment dans le cas d'ammoniac importé)							
		Stockage uniquement de l'ammoniac produite sur place						
			au moins une mesure par mois	0				
			moins d'une mesure par mois	5				
		Dans le cas d'ammoniac importé						
			Au moins une mesure pour chaque livraison par bateau ou tous les 50 wagons	0				
			Au de là fréquence ci avant	5				
1-2	Nuances des matériaux de base et d'apport et pré commissiong				0	1,5	0	0%
	Tôles							
		LS (SMYS <300Mpa)		0				
		MS (SMYS >300 and < 360Mpa)		1				
		HS (SMYS >360Mpa)		2				
	Matériaux d'apport							
		LS / MS / HS		0 / 2 / 4				
	Le réservoir a-t-il fait l'objet d'un suivi soudage documenté avant la première mise en service du réservoir			0 / 2				
		Avez-vous pratiqué des réparations lors de la première mise en service?		0 / 2				
1-3	Trou d'homme et connexions de tuyauteries				0	0,5	0	0%
		Les connexions de tuyauterie ont -elles été préfabriquées et ont-elles subis un traitement de détensionnement avant leur installation		0 / 5				
		trou d'homme préfabriqué et ayant subi un traitement de détensionnement (oui/non)		0 / 5				

1-4	historiques d'inspection					0	1,5	0	0%
	Contast de CFT sur le réservoir								
		aucune CFT détectée et les inspections précédentes étaient conformes aux prescriptions de ce guide			0				
		Non, mais il n'y a pas eu d'inspection des soudures conformément à ce guide			5				
		Non, mais il n'y a pas eu d'inspection des soudures			10				
		Oui mais un faible nombre de défaut (<5) ont été caractérisés comme de la CFT, et les inspections étaient conformes aux exigences de ce guide;			5				
		oui et découvertes de plusieurs défauts caractérisés comme de la CFT			10				
1-5	Réparations	0	0,5	0	0%				
	Reparation après la première mise en service								
		Aucune			0				
		Oui mais aucune réparation par soudage			2				
		Oui avec des réparation par soudage							
			réparations mineures avec traitement de détensionnement		2				
			réparations mineures sans traitement de détensionnement		6				
			réparations majeures avec traitement de détensionnement		4				
			réparations majeures avec traitement de détensionnement		10				
			Réparations majeures correspond à une réparation avec une profondeur supérieure à 20% de l'épaisseur de la zone concernée						
					Nombre de points total pour la CFT			0	60

Risques liés aux autres mécanismes de dégradations :

2	Autres mécanismes de dégradations	Points Possible	Points	Facteur	Total	% of total
2-1	Corrosion externe		0	0,2	0	0%
	Pas d'expérience préalable	0				
	Oui expérience préalable mais la protection du réservoir par peinture a été remise en état	4				
	Oui, mais pas de remise en état de la peinture	10				
2-2	Degradations mécaniques		0	0,2	0	0%
	Pas d'expérience préalable	0				
	Oui expérience préalable mais les réparations ont été correctement réalisées	5				
	oui, mais sans réparations correctement réalisées	10				
2-3	Fatigue à faible nombre de cycle		0	0,2	0	0%
	Les connections de tuyauterie sont flexibles (oui/non)	0 / 5				
	Les variations du niveau du réservoir du minimum au maximum sont elles fréquentes (>15 fois par an) ou non	5 / 0				
2-4	Risque de rupture fragile		0	0,8	0	0%
	. Les matériaux utilisés possède t-ils une garantie de résilience à -33°C ou ont -ils fait l'objet de caractérisation de résilience à -33°C conformément aux exigences du code de construction (oui/non)	0 / 10				
2-5	Conditions extérieures		0	0,2	0	0%
	Des conditions extérieures, comme des températures externes peuvent elles engendrer des contraintes exceptionnelles? Si non , le nombre de points est de 0 Si oui, mais que ces conditions ont fait l'objet d'étude et que les améliorations nécessaires ont été réalisées le nombre de points est de 2 sinon 4	0 / 2 / 4				
	Avez-vous observé des mouvements des fondations? Si non le nombre de points est de 0 Si oui, mais que ces désordres ont fait l'objet d'améliorations le nombre de points est de 2 Si, le nombre de point est de 6	0 / 2 / 6				
2-6	Inspection précédentes		0	0,4	0	0%
	Avez-vous pratiqué une inspection interne depuis la mise en service du réservoir (oui/non)?	0 / 10				
		nombre de points			0	20

Risques liés aux conditions opératoires :

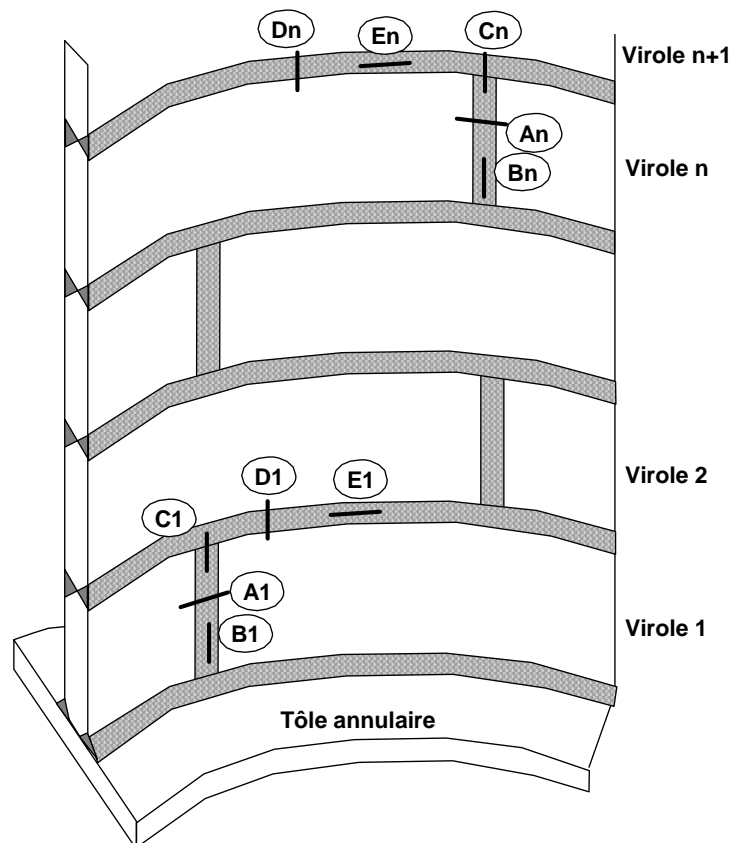
3	Conditions opératoires	nombre de points possibles	Points	Facteur	Total	% of total
3-1	Contrôle avant mise en service		0	0,4	0	0%
	Il y a-t-il eu une mise en pression hydraulique avant mise en service (oui/non)	0 / 10				
3-2	procédure mise en et hors service		0	1,2	0	0%
	Avez-vous une procédure de mise en et hors service du réservoir (Oui/Non)?	0 / 10				
	Est-ce que ces procédures sont en accord avec les impositions suivantes					
	Mise hors service	0 / 2				
	Le résiduel d'ammoniac du réservoir est-il évaporé lentement pour assurer un réchauffement du réservoir inférieur à 1°C/heure (oui/non)					
	La purge du réservoir est-elle réalisée avec l'ammoniac chaud ou de l'azote jusqu'à évaporation totale de l'ammoniac. Le fond du réservoir peut avoir besoin d'être nettoyé pour s'assurer de l'élimination totale d'ammoniac dans le réservoir (Oui/Non)?	0 / 2				
	Remise en Service	0 / 2				
	La purge du réservoir est-elle réalisée avec de l'azote jusqu'à un taux d'oxygène inférieur à 4% dans le gaz inclus dans le réservoir (Oui/Non)?					
	La purge du réservoir est-elle réalisée avec de l'ammoniac jusqu'à un taux d'oxygène inférieur à 0,5% dans le gaz inclus dans le réservoir (Oui/Non)?	0 / 2				
	Le refroidissement du réservoir fait-il l'objet avec une descente en température à une vitesse inférieure à 1°C/heure. Utilisez de préférence un système de spray (oui/non)?	0 / 2				
3-3	Expérience opératoire		0	0,4	0	0%
	Avez-vous rencontré des problèmes opératoires qui auraient pu avoir des conséquences vis-à-vis du réservoir : blocage de soupape, surpression ou dépression hors données de calcul, défaillance prolongée des résistances chauffantes sous le réservoir. Si un de ces événements s'est produit depuis la dernière visite interne alors le nombre de points est de 10	0 / 10				
Nombre total de points					0	20

Conséquences d'une défaillance du réservoir :

Evaluation de la conséquence de la défaillance d'un réservoir		Nombre de points possibles	Points	Factor	Total	% of total
1	relachement d'ammoniac dans l'atmosphère		0	5	0	0%
	a)) Réservoir en acier avec mur en béton de même taille près de lui, ayant la capacité de contenir le plein contenu du réservoir					
	b) Réservoir en acier logé dans un autre réservoir en acier pour contenir le plein contenu du réservoir, avec un seul toit ou des toits indépendants	2				
	c) Réservoir en acier avec un mur en béton de taille inférieure au réservoir avec un sol imperméable dans la zone de rétention et aucun toit au-dessus de l'espace	2				
	d) Réservoir en acier avec un remblai de terre pour contenir le plein contenu du réservoir et aucun toit au-dessus de l'espace entre le réservoir et le remblai	6				
	e) réservoir simple paroi acier	8				
2	Caractérisation des risque de fuite avant rupture	10	0	2,5	0	0%
2-1	Les calculs ont-ils été réalisés					
	Non	10				
	Oui, la conclusion est rupture avant fuite	10				
	Oui mais la conclusion entre fuite et rupture n'est pas évidente	7				
	Oui, la conclusion est fuite avant rupture	0				
3	Localisation du réservoir	10	0	2,5	0	0%
	Le réservoir est loin de la population (>2km) et de l'eau (>200 m)	0				
	La population extérieure au site se situe à moins d'un kilomètre	8				
	La population extérieure au site se situe entre un et deux kilomètres	5				
	Le réservoir est à moins de 200 m de l'eau	2				
Nombre total de points					0	100

Annexe 3

Configurations des fissures potentielles à évaluer par un calcul de mécanique de la rupture



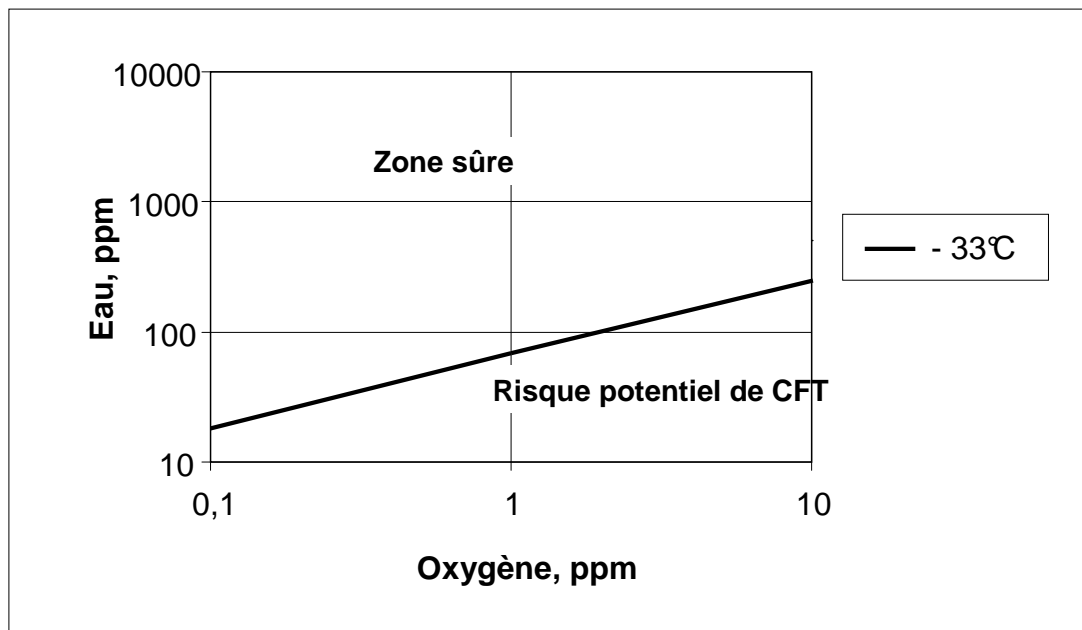
Le croquis ci-dessus montre l'orientation et la localisation des différents types de fissure qui doivent faire l'objet d'un calcul de taille maximale acceptable. Si nécessaire les résultats de ces calculs doivent être interprétés pour les viroles 2 à $n - 1$.

- A1 (n): Fissures transversales dans une soudure verticale de la virole 1 (ou n).
- B1 (n): Fissures longitudinales dans une soudure verticale de la virole 1 (ou n).
- C1 (n): Fissures transversales dans une soudure horizontale entre viroles 1 et 2 (ou n et $n+1$), situé à un raccordement de soudure en T.
- D1 (n): Fissures transversales dans une soudure horizontale entre les viroles 1 et 2 (ou n et $n + 1$)
- E1 (n): Fissures longitudinales dans une soudure horizontale entre les viroles 1 et 2 (ou n et $n + 1$).

La virole n est à un niveau plus élevé dans la paroi du réservoir, elle est donc a priori d'un matériau à plus faibles caractéristiques.

Annexe 4

Relation entre les teneurs en eau et en oxygène pour éviter la Corrosion Fissurante sous Tension en présence d'ammoniac



La zone normale d'exploitation d'un réservoir atmosphérique réfrigéré se situe en dessous de 0,5 ppm d'oxygène et entre 100 et 1000 ppm d'eau.